

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.515.6

В.В. Ефимов, М.В. Шокуров, Д.А. Яровая, D. Hein

Статистика мезомасштабных циклонических вихрей над Черным морем

На основе результатов региональной климатической модели *PRECIS* с высоким пространственным разрешением (25 км) исследованы мезомасштабные особенности атмосферной циркуляции в Черноморском регионе за 30-летний период. Для выделения и отслеживания субсиноптических вихрей использовалась методика, основанная на критерии Окубо – Вейсса. Выделено и описано несколько типов циклонических вихрей: зимние кавказские прибрежные, летние кавказские «оторвавшиеся», циклонические вихри открытого моря, а также редкие квазитропические циклоны. Для различных типов вихрей приведены статистика времени жизни, интенсивности, гистограммы суточного и сезонного циклов.

Введение

Атмосферная циркуляция в Черноморском регионе находится под влиянием нескольких определяющих факторов. Прежде всего, это крупномасштабные синоптические циклоны, которые в основном возникают в Северной Атлантике и перемещаются в западном направлении через Европу или Средиземное море на Черное море. Их характерные пространственные масштабы 2 – 3 тыс. км, время жизни 3 – 5 суток. Они максимально развиваются в зимний сезон, а пути распространения во многом зависят от определяющего влияния Северо-Атлантического колебания. Статистика их штормтреков достаточно хорошо описана в литературе, например в [1]. Подобные синоптические циклоны являются основными синоптическими процессами внетропических широт, а по отношению к Черноморскому региону их можно отнести к внешним «внечерноморским» явлениям.

В то же время региональные особенности орографии Черноморского региона, такие как достаточно высокие окружающие море горы, а также и само Черное море, вносят мезомасштабные возмущения в атмосферную циркуляцию, в том числе влияют на возникновение и развитие циклонов. Такие эффекты рассматривались на примере соседнего Средиземноморского бассейна. Так, в работе [2] выделены три характерных механизма развития циклонов в этом регионе. Первый относится к случаю слабых и мелких циклонов, когда аномалия потенциальной завихренности в верхней тропосфере мала или отсутствует и первоначальные возмущения на нижних уровнях, создаваемые, например, орографией или аномалией поверхностной температуры, в даль

© В.В. Ефимов, М.В. Шокуров, Д.А. Яровая, D. Hein, 2009

нейшем не развиваются. Второй, наиболее распространенный и являющийся классическим для условий открытого океана, относится к циклонам, которые развиваются во фронтальных зонах и возбуждаются аномалиями потенциальной завихренности в результате адвекции холодного воздуха в верхней тропосфере. Наконец, третий механизм относится к региональным циклонам, наиболее быстро развивающимся из первоначально возникших возмущений в нижней тропосфере. Такие циклоны возникают в случае адвекции больших и достигающих нижних слоев тропосферы аномалий потенциальной завихренности (холодного воздуха). Поскольку возмущения на нижних уровнях в результате сложной орографии и тепловых контрастов между морем и сушей развиваются в регионе Средиземного моря достаточно часто, такой тип эволюции циклонов также наиболее распространен. Согласно работе [3], около 50% всех циклонов над Средиземным морем локализовано в небольших прибрежных областях, находящихся вблизи гор.

Кроме описанных случаев циклогенеза, в Средиземноморском регионе наблюдаются и особые мезомасштабные циклоны, определяемые как квазитропические. Для них, также как и для тропических циклонов и полярных депрессий, основным механизмом генерации является высвобождение скрытой теплоты в больших конвективных облачных скоплениях [4, 5].

Статистика черноморских циклонов изучена существенно хуже. Обычно регион Черного моря не рассматривался в работах, посвященных средиземноморским циклонам. Лишь в некоторых из них он был включен в анализ. Так, в [6, 7] дан анализ статистики циклонов в регионе, включающем Средиземное и Черное моря. Были изучены циклонические вихри в восточной части Черного моря и построено их распределение по месяцам на стадиях возникновения и наибольшего развития. И зимние, и весенне-летние восточно-черноморские циклоны были короткоживущими, со средним временем жизни около суток, они возникали при распространении синоптических высотных ложбин над теплой водой в зимний период или над бароклинной областью нижних уровней. Однако эти выводы основаны на данных оперативного анализа *ECMWF* за сравнительно небольшой период 1979 – 1996 гг. с 6-часовой дискретностью и разрешением $1,125 \times 1,125^\circ$, что не позволяло выделить циклоны меньшего пространственно-временного масштаба. Кроме того, статистика вихрей в открытой части Черного моря в этих работах не приводится, вероятно, в силу сравнительно небольшой продолжительности данных (18 лет) и соответственно малого числа таких выделенных циклонов.

Исследования поведения и частоты появления мезомасштабных циклонов над Черным морем необходимы для улучшения знаний о климате региона, его изменчивости, и лишь нехватка данных об атмосферной циркуляции над морем с высоким разрешением была причиной того, что подобные исследования не проводились. Однако сегодня появились новые глобальные и региональные модели, при помощи которых с использованием доступных данных наблюдений на всем земном шаре стало возможным воспроизводить климат прошлых десятилетий для конкретного региона.

В настоящей работе ставится задача изучения статистики мезомасштабных циклонов с использованием более длинного по времени массива данных (1960 – 1990) с большим пространственным разрешением (25×25 км) и часовой дискретностью по времени. Этот массив получен в рамках климатического проекта *PRECIS* [8] в результате численных расчетов атмосферной циркуляции с использованием региональной модели для Черного моря, на вход ко-

торой подаются данные с низким пространственным разрешением с выхода совместной глобальной модели *HadAM3P* для контрольного периода 1960 – 1990 гг. Таким образом, эти данные описывают не реальное развитие атмосферных полей с высоким разрешением за контрольный период, а лишь одну из возможных реализаций такого развития, одну траекторию развития климатического процесса. Их можно считать выборкой случайного процесса, имеющего вероятностные характеристики реального климата [9]. В то же время длительность контрольного периода в 30 лет обычно считается достаточной для такого вывода, т.е. и средние величины, и статистика отклонений от средних принимаются близкими к характеристикам реального климата за этот период. Исходными данными для настоящего исследования являются среднечасовые поля приповерхностного ветра над Черноморским регионом за 30 лет, полученные в результате климатического моделирования.

Методика выявления вихрей

Выявление циклонов и слежение за траекториями их перемещения является классической задачей в метеорологии. Ранее использовались как субъективные, так и объективные автоматизированные методы, последний обзор приведен, например, в [10]. Типичный метод выявления циклона — поиск локального минимума в поле давления на уровне моря или в поле геопотенциала 1000 гПа. В данной работе для выявления циклонических вихрей в поле ветра используется критерий Окубо – Вейсса, который является традиционным инструментом для выделения когерентных структур – осесимметричных вихрей при численном и лабораторном моделировании двумерной турбулентности [11].

Согласно теореме Коши – Гельмгольца, распределение скорости в бесконечно малой частице сплошной среды определяется суммой поступательного и вращательного движения частицы как абсолютно твердой и скорости чистой деформации $\mathbf{v}(\mathbf{r} + d\mathbf{r}) = \mathbf{v}(\mathbf{r}) + \mathbf{U} \cdot d\mathbf{r}$, где тензор \mathbf{U} имеет компоненты $U_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$; $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ – поступательная скорость, одинаковая для всех точек данной частицы. Антисимметричная часть тензора \mathbf{U} , определяемая как $\mathbf{A} = (\mathbf{U} - \mathbf{U}^T)/2$, описывает вращение, симметричная же часть $\mathbf{S} = (\mathbf{U} + \mathbf{U}^T)/2$ описывает чистую деформацию. В двумерном случае \mathbf{A} и \mathbf{S} имеют вид

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & u_y - v_x \\ v_x - u_y & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2u_x & u_y + v_x \\ v_x + u_y & 2v_y \end{pmatrix}.$$

Тензор скорости деформации \mathbf{S} можно в свою очередь разложить на сдвиговую \mathbf{S}_1 и объемную \mathbf{S}_2 деформацию:

$$\mathbf{S}_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u_x - v_y & u_y + v_x \\ v_x + u_y & v_y - u_x \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u_x + v_y & 0 \\ 0 & u_x + v_y \end{pmatrix}.$$

Величина $W = 4 \det(\mathbf{A} + \mathbf{S}_1) = \omega^2 - s^2$, равная разности квадрата завихренности $\omega = v_x - u_y$ и квадрата скорости деформации $s^2 = (u_x - v_y)^2 + (v_x + u_y)^2$, называется критерием Окубо – Вейсса (*OWC*). Он достигает максимальных положительных значений для круглого вихря с «твердотельным» вращением,

в котором деформация отсутствует, и минимальных отрицательных значений – в чисто деформационном поле скорости без вращения. Для сдвигового течения, например струи или фронта, обладающего и завихренностью, и деформацией, критерий Окубо – Вейсса принимает промежуточные значения. Таким образом, по максимальным величинам этого критерия в заданном поле скорости можно выделить интенсивные круглые вихри [11].

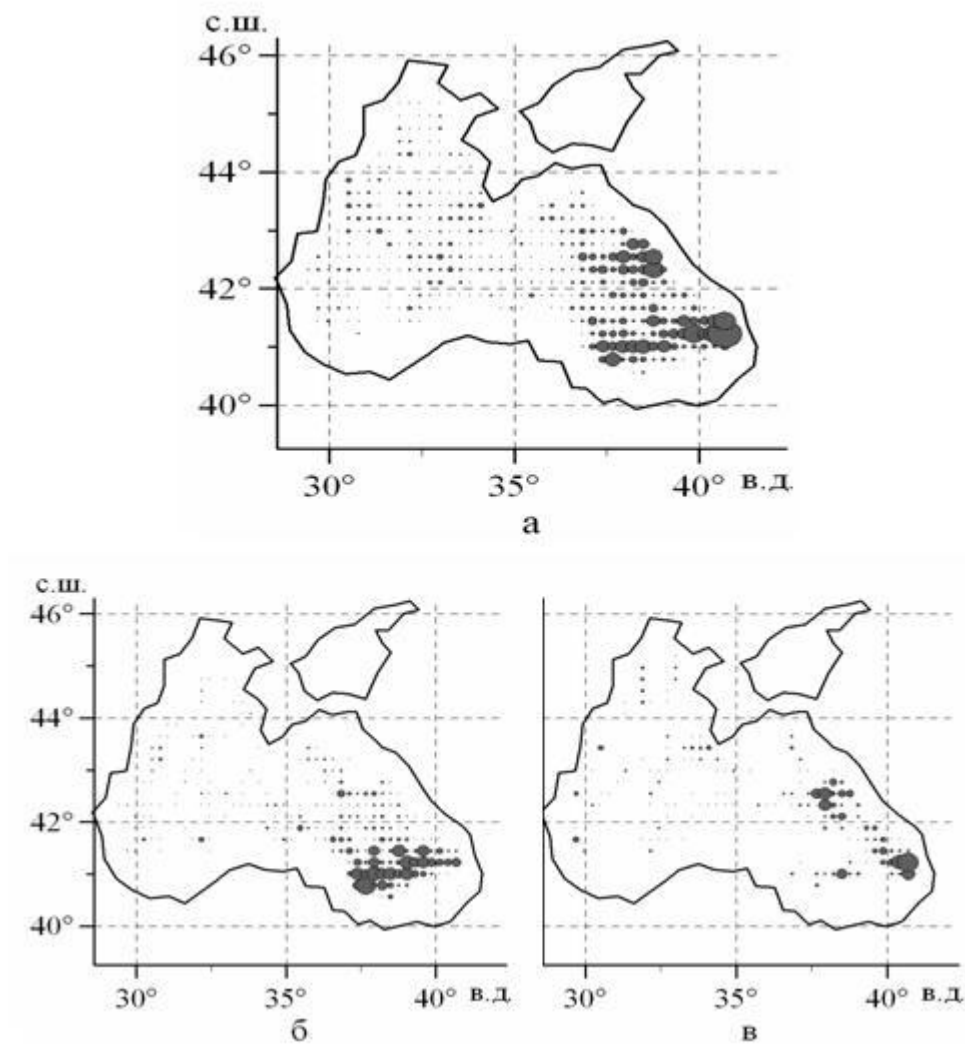
Методика выявления циклонов заключается в следующем: если над морем максимальный по пространству критерий Окубо – Вейсса превосходит некоторое установленное эмпирически пороговое значение, то из этого следует, что в поле ветра имеется достаточно сильный осесимметричный вихрь, а точка, в которой критерий достигает максимума, считается его центром. Для отслеживания траектории вихря использовалось эмпирически выбранное пороговое значение скорости его перемещения — 100 км/ч. Если через час центр вихря находится в пределах 100 км от текущего центра, полагается, что это тот же самый вихрь, но переместившийся в новое положение. В противном случае считается, что старый вихрь исчез и зародился новый.

Синоптические циклоны имеют размеры, превышающие размеры Черного моря, поэтому центр циклона может располагаться над сушей, окружающей море, тем не менее вся акватория будет находиться в области действия синоптического циклона. Таким образом, из всех синоптических образований, оказывающих влияние на море, мы выделяем лишь небольшую часть тех, центры которых приходятся на акваторию. Отметим, что применение указанной методики к определению центров циклонической завихренности по данным приземного ветра для суши приводит к появлению множества ложных центров, связанных лишь с орографическими возмущениями поля приземного ветра, но не с формированием циклонических мезомасштабных вихрей в тропосфере. Над морем такие орографические эффекты не возникают.

Далее рассматриваются только достаточно долгоживущие вихри, время жизни которых, проведенное непосредственно над Черным морем, превышает пороговое значение, равное 5 ч.

Статистика циклонов

На рис. 1, *а* показано распределение максимумов циклонической завихренности над Черным морем за 30 лет, на рис. 1, *б, в* — то же распределение для летних и зимних месяцев. Диаметр кружка соответствует количеству часов, проведенных циклонами в ячейке размером 25×25 км. Согласно методике вычисления критерия Окубо – Вейсса с использованием центральных разностей, самые прибрежные области моря из анализа исключались. Следует еще раз отметить, что на этом рисунке представлены только циклоны, центры которых находились над акваторией Черного моря, и поэтому синоптические циклоны, проходившие в окрестностях акватории, не учитывались.



Р и с. 1. Распределение максимумов циклонической завихренности над Черным морем за 30 лет. Размер кружка определяется количеством часов, проведенных циклоническими вихрями в ячейке 25×25 км: *а* – максимальный радиус «пузырька» соответствует 77 ч (полные 30 лет); *б* – 31 ч (только летние месяцы); *в* – 23 ч (только зимние месяцы). Минимальный радиус «пузырька» соответствует 1 ч

На основании рис. 1 можно выделить три группы черноморских циклонических вихрей:

- кавказские прибрежные вихри, центры которых расположены у кавказского берега;
- кавказские «оторвавшиеся» вихри, центры которых находятся в открытой юго-восточной части моря;
- циклонические вихри открытого моря, возникающие и перемещающиеся над всей акваторией, не привязанные к какому-то конкретному месту.

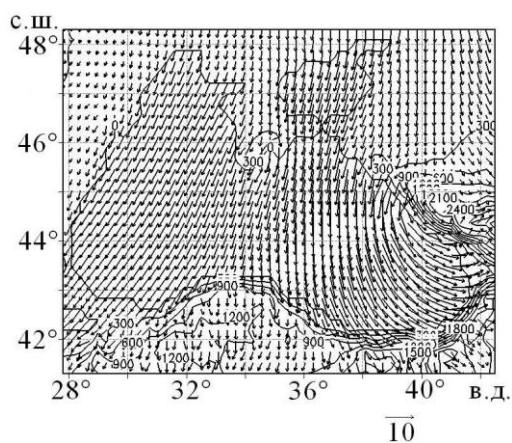
Рассмотрим эти группы более подробно.

Кавказские прибрежные вихри. Поскольку кавказские прибрежные «оторвавшиеся» вихри локализованы в пространстве, для их обнаружения использовался не критерий Окубо – Вейсса, а более простая методика, основанная

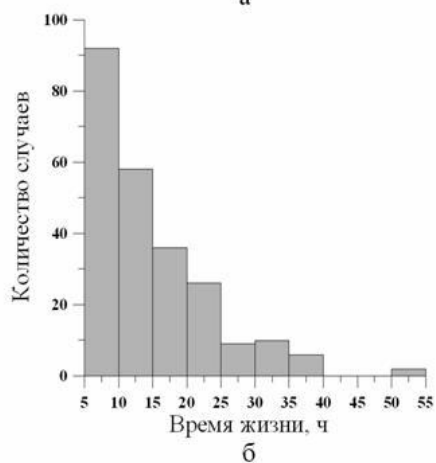
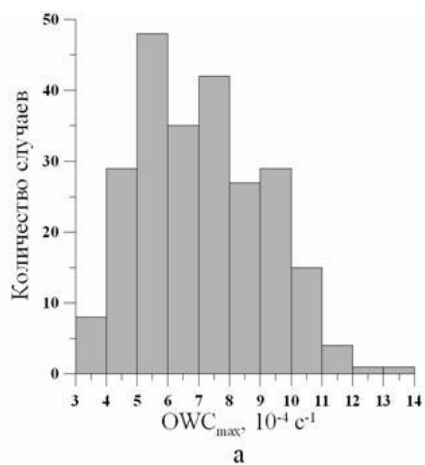
на построении композита. На первом этапе эмпирически отбираются несколько (~ 30) наиболее типичных ситуаций и по ним строится «затравочный» композит, т.е. среднее поле приводного ветра для характерных вихрей этого типа. Затем поиск характерных ситуаций производится автоматически – по коэффициенту пространственной корреляции каждого среднечасового поля ветра с полученным композитом по всем точкам восточной части моря. Из всех полей приводного ветра выбираются те, у которых коэффициент корреляции с полученным композитом превышает некоторое пороговое значение.

На втором этапе из выбранных случаев строится «окончательный» композит и с ним снова рассчитывается коэффициент корреляции всех среднечасовых полей ветра. Пороговое значение коэффициента корреляции эмпирически выбрано равным 0,8, и окончательно отобрано 239 случаев кавказских прибрежных вихрей.

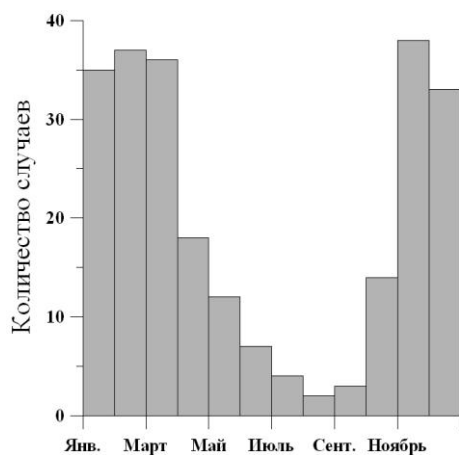
Результирующий композит приведен на рис. 2, где показана пространственная структура поля приповерхностного ветра для кавказских прибрежных вихрей. Согласно этому рисунку, вихри такого типа образуются при обтекании Кавказских гор сильным северным ветром и имеют форму полукруглой струи с циклонической кривизной, прижатой к берегу. По существу, над морем располагается морская половина такого циклонического вихря.



Р и с. 2. Композит приповерхностной скорости ветра ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) для кавказских прибрежных циклонических вихрей за 30 лет. Изолиниями показана высота рельефа (м) над уровнем моря



Р и с. 3. Гистограммы для всех обнаруженных кавказских прибрежных вихрей: *a* – максимальная величина *OWC* (10^{-4} c^{-1}); *б* – время жизни (ч)



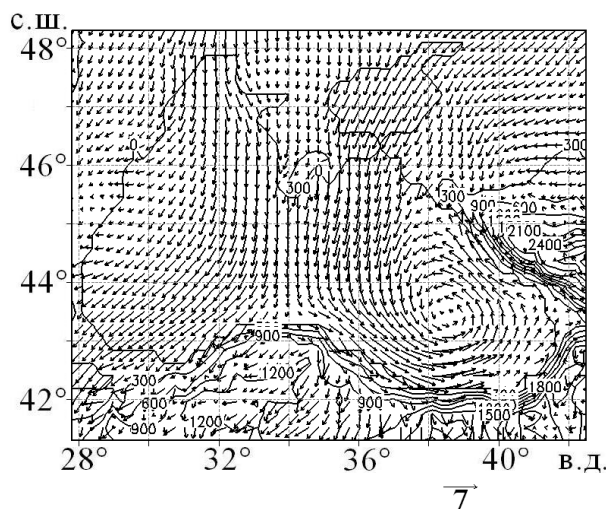
На рис. 3, *a* показана гистограмма распределения максимальных значений *OWC*, на рис. 3, *б* – гистограмма времени жизни таких вихрей. Почти у половины вихрей время жизни не превышает 12 ч при среднем времени 15 ч.

Для циклонических вихрей этой группы характерен явный сезонный цикл (рис. 4): максимум случаев возникновения приходится на позднюю осень – зиму, летом они практически не возникают. Объяснение этому заключается в сезонной изменчивости общей циркуляции атмосферы в Черноморском регионе. Летом для всей средиземноморской и черноморской области характерно преобладание крупномасштабной циркуляции антициклонического типа [12]. Восточная периферия этого антициклонического круговорота и соответственно северный ветер в нижней тропосфере приходятся на юго-восточную часть Европы. При обтекании этим потоком Кавказских гор над восточной частью моря образуется циклонический вихрь, что наглядно показано на рис. 2.

Таким образом, можно сделать общий вывод, что прибрежные кавказские циклонические вихри образуются при обтекании Кавказских гор сильным северным ветром, возникают в основном зимой над морем и представляют собой поток воздуха юго-восточного направления, имеющего циклоническую завихренность.

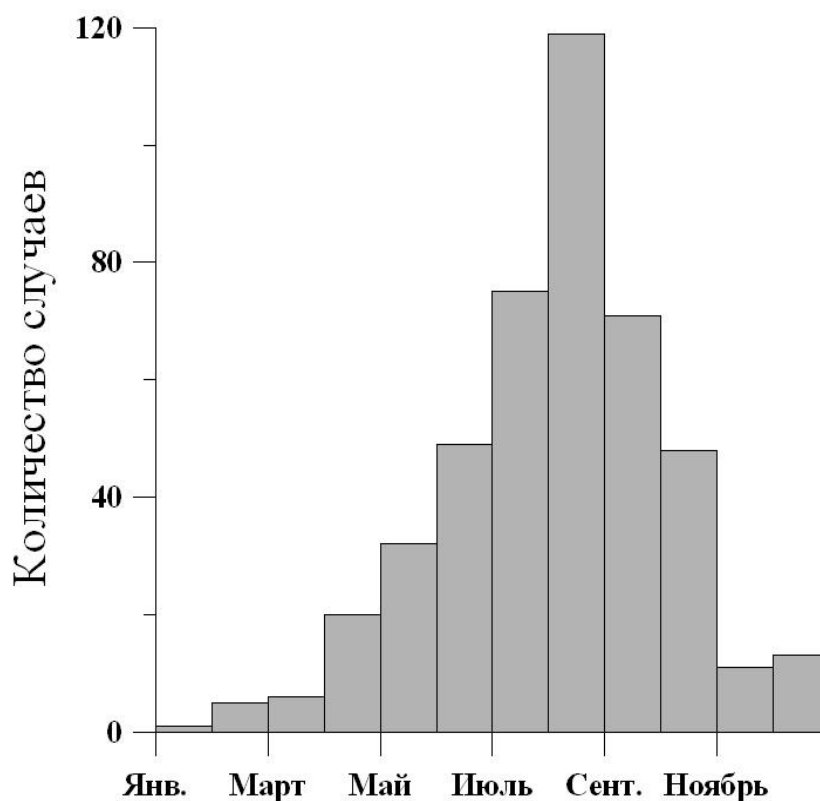
Р и с. 4. Сезонный цикл возникновения кавказских прибрежных вихрей

Кавказские «оторвавшиеся» вихри. Методика выделения кавказских «оторвавшихся» вихрей близка к применяемой для кавказских прибрежных вихрей. Отличие состоит в том, что вихри этого типа более подвижны, чем прибрежные. Поэтому при анализе среднечасовых полей приповерхностного ветра на основе превышения эмпирической пороговой величины коэффициента корреляции были выделены не один, а несколько характерных компози- тов таких вихрей, располагавшихся в юго-восточной части моря. Они разли- чались между собой в основном положением центра. Далее вычислялись ко- эффициенты корреляции каждого из компози- тов с полями приводного ветра в восточной части моря. Затем выбирались те случаи (поля ветра), для которых величина коэффициентов корреляции с каждым компози- том превышала не- который начальный пороговый уровень. Из совпадающих по времени полей выбиралось лишь одно, имеющее максимальную корреляцию. Этот времен- ной кадр (поле ветра) исключался из последующего анализа. Затем величина порогового уровня корреляции понижалась и для оставшихся кадров повто- рялось сравнение коэффициентов корреляции с пороговой величиной. В ре- зультате этой эмпирической процедуры была отобрана бóльшая часть кавказ- ских «оторвавшихся» вихрей, за исключением небольшого числа наиболее слабых и короткоживущих. Для массива из 450 отобранных вихрей вычисля- лись статистические характеристики. Конечно, такой эмпирический подход не позволяет исключить из рассмотрения циклоны, которые образовались в западной части моря, а впоследствии переместились в юго-восточную. Но, вероятно, это не приводит к большим ошибкам в оценке статистических ха- рактеристик, т.к. число таких «пришедших» циклонов в этой части моря на- много меньше кавказских «оторвавшихся» вихрей. Композит кавказских «оторвавшихся» вихрей, составленный из 90 отдельных случаев, можно рас- сматривать как характерный вид поля приводного ветра для вихрей этого типа (рис. 5).



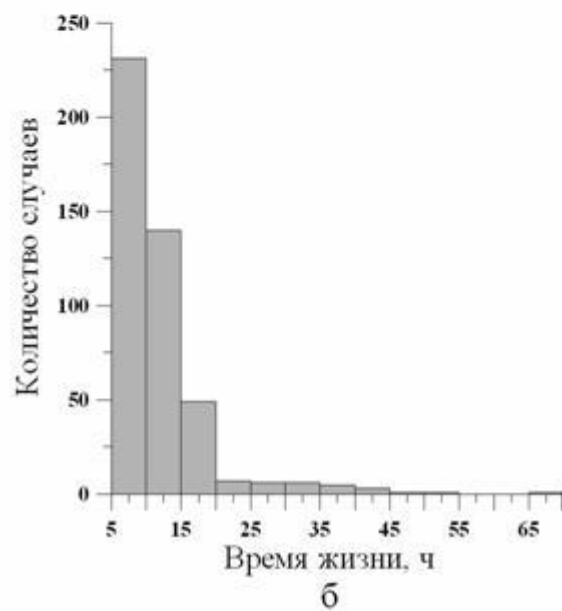
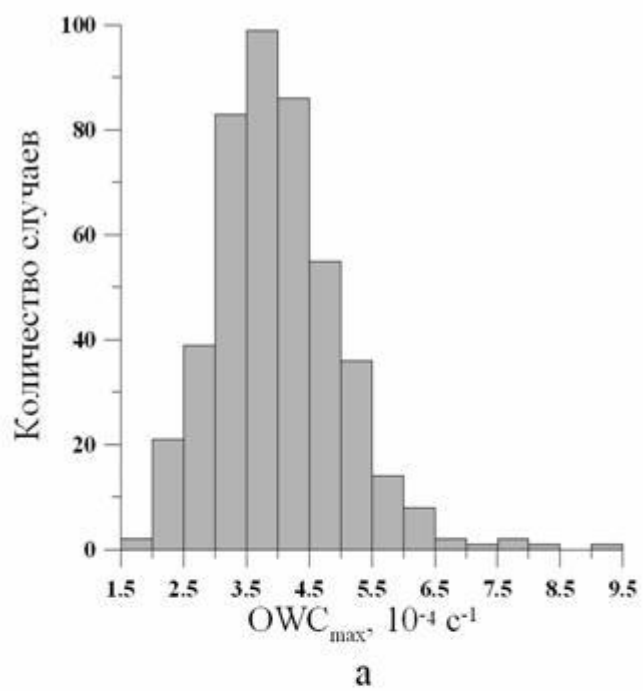
Р и с. 5. Композит приповерхностной скорости ветра ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) для кавказских «оторвавшихся» циклонических вихрей. Изолиниями показана высота рельефа (м) над уровнем моря

На рис.6 показан сезонный цикл кавказских «оторвавшихся» вихрей. Он существенно отличается от сезонного цикла кавказских прибрежных вихрей: максимум случаев возникновения кавказских «оторвавшихся» вихрей приходится на лето, минимум – на зиму. Гистограмма интенсивных отобранных вихрей приведена на рис. 7, а: максимум случаев приходится на величины $OWC \sim 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Гистограмма времени жизни вихрей показана на рис. 7, б. Видно, что в основном эти вихри являются короткоживущими: у 66% из них время жизни не превышает 12 ч при среднем времени около полусуток.

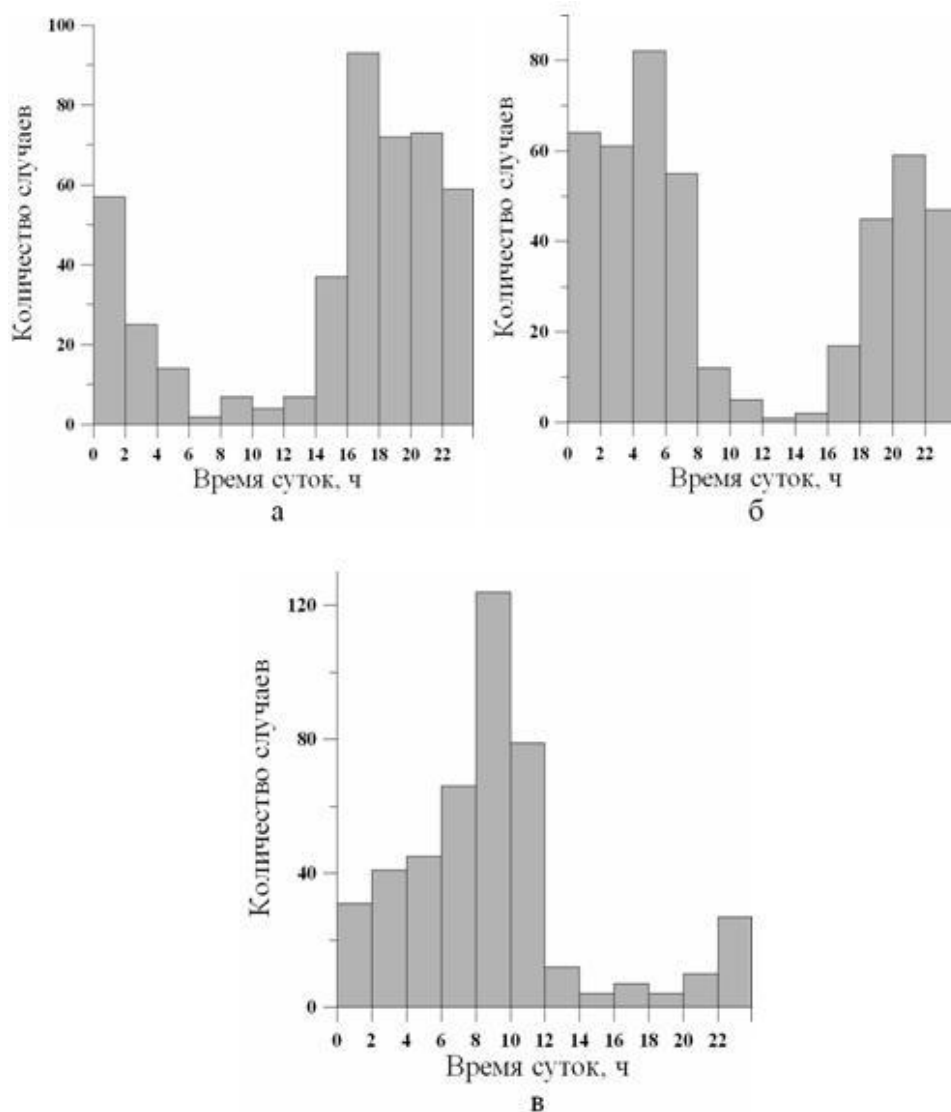


Р и с. 6. Сезонный цикл возникновения кавказских «оторвавшихся» вихрей

Для выделения суточного цикла, которого и следует ожидать для таких короткоживущих вихрей, использовалась процедура выборки вихрей в зависимости от стадии их развития. Вначале были выбраны развивающиеся вихри, т.е. обнаруженные впервые (впервые превысившие пороговый уровень коэффициента корреляции). Затем – вихри, достигшие максимального развития, т.е. имеющие максимальные значения коэффициента корреляции. Наконец, выбраны вихри, находящиеся на заключительной стадии развития, т.е. те вихри, у которых в последующий момент времени (через час) коэффициент корреляции с композитом меньше порогового значения. Распределение числа вихрей, находящихся на этих трех стадиях развития в течение суток, показано на рис. 8, а – в.



Р и с. 7. Гистограммы для всех обнаруженных кавказских «оторвавшихся» вихрей: *а* – максимальная величина OWC (10^{-4}с^{-1}); *б* – время жизни (ч)



Р и с. 8. Суточный цикл возникновения – *а*, усиления – *б*, затухания – *в* кавказских «оторвавшихся» вихрей

Таким образом, кавказские «оторвавшиеся» вихри – короткоживущие, приповерхностные – образуются в основном летом, полностью располагаются над морем, имея вид квазисимметричного кругового циклонического вихря. Для «оторвавшихся» мезомасштабных вихрей в юго-восточной части моря характерен суточный цикл и явно выраженный максимум возникновения в летне-осенний период. Однако методика отбора не позволяет отличать эти мезомасштабные вихри, имеющие явный суточный цикл, от фоновых синоптических циклонов, пришедших из других районов моря или суши. Поэтому для улучшения статистики из всех «оторвавшихся» кавказских вихрей были выбраны только образованные летом и для них построены те же гистограммы. Не приводя рисунков, укажем только, что характерное суточное поведение этих вихрей качественно не изменилось, а стало еще более явным.

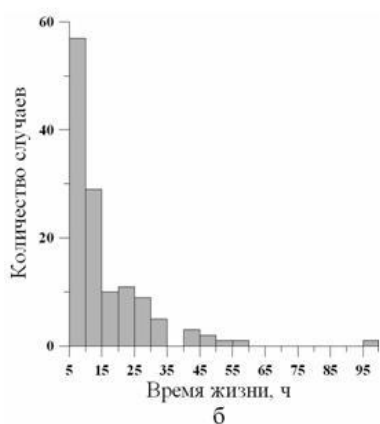
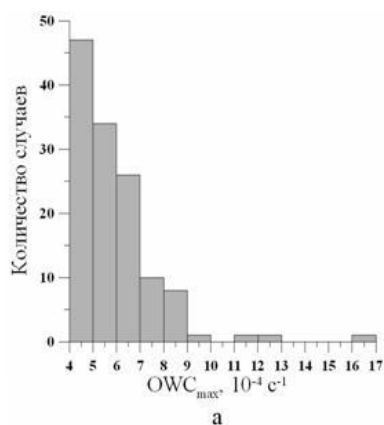
Физическая природа «оторвавшихся» вихрей представляет самостоятельный интерес. Пока лишь отметим, что по многим характеристикам – наличию суточного цикла и, возможно, механизму образования – кавказские «оторвавшиеся» вихри сходны с каталинскими вихрями, которые образуются весной и летом вблизи южного побережья Калифорнии [13,14].

Циклонические вихри открытого моря. Для выделения центров циклонов этой группы использовался критерий Окубо – Вейсса. При этом из всего массива ежечасных полей приводного ветра были удалены случаи, соответствующие выделенным ранее кавказским вихрям. Оставшиеся циклоны и были отнесены к фоновым циклонам открытого моря. Они представляют собой целый спектр циклонических вихрей различных пространственно-временных масштабов от сотен километров и суток до характерных масштабов синоптических циклонов, распространяющихся над морем.

Типичная траектория мезомасштабного циклона открытого моря – появление в за-падной части Черного моря, перемещение преимущественно в се-

веро-восточном направлении с огибанием в некоторых случаях Крымского п-ова и выходом на сушу. Кроме этого типичного маршрута, имеются также и другие разнообразные траектории перемещения циклонов.

В целом центры циклонов этой группы достаточно равномерно распределены над акваторией Черного моря. Их траектории движения носят характер случайных блужданий, хотя и наблюдается преобладание распространения в восточном – северо-восточном направлении. На рис. 9, а показана гистограмма интенсивности циклонов, средняя величина которых составляет $5,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Гистограмма их времени пребывания над морем приведена на рис. 9, б. Примерно у 80% обнаруженных циклонов оно не превышает 12 ч, в среднем составляет ~20 ч, и лишь небольшое число наименее подвижных циклонов находится над морем в течение 2 – 3 сут, что соответствует перемещению в северо-восточном направлении со скоростью 20 – 30 м·с⁻¹. В среднем над Черным морем проходил 1 циклон за 2-3 мес. Напомним, что такая статистика от-



Р и с. 9. Гистограммы для всех обнаруженных фоновых циклонов открытого моря: а – максимальная величина OWC (10^{-4} с^{-1}); б – время пребывания над морем (ч)

носится к циклонам с центрами над акваторией моря. Всего же число синоптических циклонов, захватывающих своим влиянием Черное море, существенно больше. В первом приближении больше на величину, равную квадрату отношения радиуса типичного синоптического циклона (1000 км) к характерному радиусу моря (250 км), т.е. в 16 раз.

Как и ожидалось, наиболее сильные вихри являются и наиболее долгоживущими: коэффициент корреляции между временем жизни и интенсивно-

стью циклона равен 0,7. За 30 лет обнаружено 129 случаев, когда центры циклонов располагались над морем, хотя, конечно, это число условно, поскольку зависит от выбранного эмпирически порогового значения критерия Окубо – Вейсса. Выбранный нами порог в $3,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ соответствует достаточно большим скоростям приводного ветра ($>10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

Квазитропические циклоны. Среди циклонов открытого моря можно выделить одну, хотя и малочисленную, но тем не менее важную группу квазитропических циклонов. Из условий развития таких циклонов отметим, например, конвективную неустойчивость тропосферы над морем и слабую синоптическую циркуляцию. Один из таких циклонов, сформировавшийся в сентябре 2005 г. над Черным морем, детально изучен в работах [15, 16]. Его структура была подобна структуре тропического циклона, скорость приводного ветра достигала значительной величины ($27 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

К сожалению, только по данным о приводной скорости ветра среди всех обнаруженных циклонов открытого моря трудно однозначно выделить квазитропические, можно лишь указать на некоторые из них как на возможные такого типа. Это были несколько вихрей, развитие которых происходило лишь над морем (т.е. траектории ограничивались акваторией моря) и поле скорости приводного ветра которых было близким к осесимметричному. Эти вихри возникали в наиболее благоприятный для них осенний период [15]. Всего за 30 лет обнаружено лишь три таких компактных осесимметричных циклона со скоростью ветра, превышающей $25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, и временем жизни от двух до пяти суток.

Заключение

В результате обработки 30-летнего массива данных о приводном ветре для акватории Черного моря были выделены четыре характерные группы циклонических мезомасштабных вихревых структур: кавказские прибрежные, кавказские «оторвавшиеся», циклонические вихри открытого моря и немногочисленные квазитропические циклоны.

Кавказские прибрежные вихри образуются при обтекании Кавказских гор сильным северным ветром, возникают в основном зимой и представляют собой поток воздуха юго-восточного направления над морем, имеющий циклоническую завихренность.

Кавказские «оторвавшиеся» вихри – короткоживущие, приповерхностные – образуются в основном летом, полностью располагаются над морем, имея вид симметричного круглого циклонического вихря. По многим характеристикам – наличию суточного цикла и, возможно, механизму образования – такие вихри сходны с каталинскими, которые образуются весной и летом вблизи южного побережья Калифорнии.

Фоновые циклоны открытого моря представляют собой целый спектр циклонических вихрей различных пространственно-временных масштабов – от сотен километров и суток до «стандартных» параметров синоптических циклонов, перемещающихся над морем. В целом центры циклонов этой группы достаточно равномерно распределены над акваторией Черного моря. Их траектории движения носят характер случайных блужданий, хотя и наблюдается преобладание распространения в восточном – северо-восточном направлении. Можно полагать, что такие циклонические образования имеют разную физическую природу – от стандартных крупномасштабных циклонов внетропических широт до вторичных мезомасштабных вихревых структур,

связанных и с влиянием окружающих гор, и с баротропно-бароклиной неустойчивостью атмосферы над морем. Их дальнейшая систематизация планируется с привлечением данных численного регионального анализа с высоким пространственным разрешением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lefevre R.J., Nielsen-Gammon J.W.* An objective climatology of mobile troughs in the Northern hemisphere // *Tellus*. – 1995. – 47A. – P. 638 – 655.
2. *Genoves A., Jansa A.* The use of potential vorticity maps in monitoring shallow and deep cyclogenesis in the Western Mediterranean // *WMO/TD*. – 1991. – № 420. – P. 55 – 65.
3. *Campins J., Jansa A., Genoves A.* Three-dimensional structure of western Mediterranean cyclones // *Intern. J. Climatol.* – 2006. – 26. – P. 323 – 343.
4. *Homar V., Romero R., Stensrud D.J. et al.* Numerical diagnosis of a small, quasi-tropical cyclone over the western Mediterranean: Dynamical vs. boundary factors // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* – 2003. – 129. – P. 1469 – 1490.
5. *Pytharoulis L., Craig G.C., Ballard S.P.* The hurricane-like Mediterranean cyclone of January 1995 // *Meteorol. Appl.* – 2000. – 7. – P. 261 – 279.
6. *Trigo I.F., Davis T.D., Bigg G.R.* Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region // *J. Climate*. – 1999. – 12. – P. 1685 – 1696.
7. *Trigo I.F., Bigg G.R., Davis T.D.* Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean // *Mon. Wea. Rev.* – 2002. – 130. – P. 549 – 569.
8. <http://precis.metoffice.com/>
9. *Anagnostopoulou Chr., Tolika K., Maheras P. et al.* Performance of the general circulation adAM3P model in simulating circulation types over the Mediterranean region // *Intern. J. Climatol.* – 2008. – 28. – P. 185 – 203.
10. *Raible C.C., Della-Marta P.M., Schwierz C. et al.* Northern hemisphere extratropical cyclones: a comparison of detection and tracking methods and different reanalyses // *Mon. Wea. Rev.* – 2008. – 136. – P. 880 – 897.
11. *Daniel W.B., Rutgers M.A.* Topology of two-dimensional turbulence // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – 89. – P. 1 – 4.
12. *Rodwell M. J., Hoskins B. J.* Subtropical anticyclones and summer monsoons // *J. Climate*. – 2001. – 14. – P. 3192 – 3211.
13. *Skamarock W.C., Rotunno R., Klemp J.B.* Catalina eddies and coastally trapped disturbances // *J. Atmos. Sci.* – 2002. – 59. – P. 2270 – 2278.
14. *Davis C. A., Simon L.-N.* Dynamics of a Catalina eddy revealed by numerical simulation // *Mon. Wea. Rev.* – 2000. – 128. – P. 2885 – 2904.
15. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А.* Численное моделирование квазитропического циклона над Черным морем // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2007. – 43, №6. – С. 723 – 743.
16. *Ефимов В.В., Станичный С.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А.* Наблюдение квазитропического циклона над Черным морем // *Метеорология и гидрология*. – 2008. – №4. – С. 53 – 62.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
Hadley Centre Met Office and University of Reading,
UK

Материал поступил
в редакцию 22.04.08
После доработки 12.06.08

ABSTRACT Based on the results of the regional climatic model PRECIS with high spatial resolution (25 km), mesoscale features of the Black Sea region atmospheric circulation during 30 years are studied. To reveal and trace sub-synoptic vortices, the method based on the Okubo – Weiss criterion is used. A few types of cyclonic vortices – winter Caucasian near-coastal ones, summer Caucasian “broken away” ones, cyclonic open sea vortices, and also rare quasi-tropical cyclones – are distinguished and described. For different types of the vortices presented are the statistics of their life time and intensity, histograms of diurnal and seasonal cycles.