

Д.А. Яровая, М.В. Шокуров

## Мезомасштабные циклонические вихри, возникающие над Черным морем вблизи Кавказского побережья

В статье рассматриваются ранее не изучавшиеся подветренные циклонические вихри, возникающие над Черным морем вблизи Кавказского побережья. Метод исследования – региональное климатическое моделирование, в качестве начальных и граничных условий для которого использовались результаты глобального моделирования по модели *HadAM3P* и данные реанализа *ERA-40*. На основании результатов моделирования определены характерные размеры и интенсивность вихрей. Показано также, что их возникновение и эволюция характеризуются наличием соответственно сезонного и суточного циклов.

**Ключевые слова:** мезомасштабные атмосферные вихри, число Фруда, региональное климатическое моделирование.

### Введение

Взаимодействие воздушного потока с рельефом приводит к различным явлениям – горным волнам, подветренным захваченным волнам, обрушению внутренних гравитационных волн над гребнем, сильным склоновым ветрам, блокированию потока горным хребтом, образованию подветренных вихрей. Эти явления исследовались разными авторами теоретически, в лабораторных экспериментах, по данным натурных измерений и при помощи численного моделирования [1, 2]. Из всех этих явлений наиболее сложным является образование подветренных вихрей.

Натурные наблюдения подветренных вихрей проводились в разных географических регионах, было дано описание их структуры, динамики, причин возникновения. Например, достаточно хорошо изучены подветренные вихри, которые образуются весной и летом вблизи южного побережья Калифорнии, в районе о. Санта-Каталина [3, 4]. Каталинский вихрь имеет горизонтальный масштаб порядка 100 км, вертикальный – порядка 1 – 2 км, его развитие характеризуется отчетливо выраженным суточным циклом: вихрь образуется в послеполуденные часы, усиливается ранним вечером, достигает зрелой стадии ночью и рассеивается утром на следующий день.

Подветренные вихри в окрестности Кавказских гор ранее не исследовались. В данной статье впервые изучаются мезомасштабные циклонические вихри, образующиеся над Черным морем при взаимодействии северо-восточного ветра с Кавказскими горами. По месту своего зарождения эти вихри в дальнейшем будут называться «кавказскими».

В отличие от хорошо изученной классической задачи об образовании вихрей при обтекании цилиндра вязкой жидкостью, в которой источником завихренности является вязкий пограничный слой, причины возникновения вихрей при обтекании трехмерных гор стратифицированным потоком могут быть разными. Вопрос об относительной роли различных источников завихренности в литературе был поднят сравнительно недавно и до настоящего времени окончательно не решен.

© Д.А. Яровая, М.В. Шокуров, 2012

Значительным достижением стало обнаружение того, что подветренные вихри образуются в численной модели идеальной жидкости с граничным условием скольжения на поверхности [5]. На подветренной стороне препятствия возникает пара вихрей с вертикальной осью, один из которых циклонический, а другой – антициклонический. Образуются эти вихри только тогда, когда число Фруда  $Fr = V/NH$  (где  $V$  – скорость потока,  $N$  – частота плавучести,  $H$  – высота горы) принимает значения меньше единицы. Физически это означает, что набегающий поток переваливает через препятствие не полностью: частицы воздуха с нижних уровней не могут достичь вершины и обтекают гору с обеих сторон. Когда число Фруда больше единицы, вихри не образуются. Это означает, что поток полностью переваливает через препятствие. Механизм возникновения этих вихрей – бароклинная генерация горизонтальной завихренности с дальнейшим превращением ее в вертикальную.

В последующих работах было показано, что в образовании подветренных вихрей важную роль играет диссипация. В статье [6] исследовалось образование вихрей в модели мелкой воды, с условием скольжения на дне, но при наличии вязкости в объеме жидкости. Было получено, что при достаточно большой высоте горы формируются подветренные вихри. Причина возникновения вихрей – диссипация в гидравлическом скачке, образующемся на подветренном склоне. Для интерпретации результатов моделирования авторами была использована доказанная ими общая теорема о связи между генерацией завихренности и диссипацией. Аналогичные результаты были получены в модели с непрерывной стратификацией [7, 8].

К числу эффектов, которые могут играть роль при образовании реальных подветренных вихрей, также относятся: поверхностное трение, отрыв вязкого пограничного слоя, турбулентность в пограничном слое. Первые два явления изучались в лабораторных экспериментах для не очень больших чисел Рейнольдса [9]. Обтекание рельефа с учетом турбулентности в реальном атмосферном пограничном слое с большими числами Рейнольдса начали исследовать сравнительно недавно [10].

В упомянутых выше работах сила Кориолиса не учитывалась. Относительная роль силы Кориолиса традиционно описывается числом Россби  $Ro = V/fL$ , где  $f$  – параметр Кориолиса,  $L$  – горизонтальный размер горы. Для гор небольшого размера ( $L < 10$  км) число Россби велико и силой Кориолиса можно пренебречь. Для противоположного предельного случая  $Ro \ll 1$  разработана квазигеострофическая теория, которая дает следующий результат – квазигеострофический подветренный циклогенез [1].

Механизм генерации вертикальной завихренности при переваливании стратифицированного потока через гору в квазигеострофическом режиме заключается в вертикальном растяжении планетарной завихренности. Вследствие вращения Земли набегающий поток обладает вертикальной планетарной завихренностью. Как следует из квазигеострофической теории, над горой толщина слоя между двумя изопикнами уменьшается, а на подветренном и наветренном склонах горы – увеличивается. Это приводит к тому, что на подветренном и наветренном склонах вихревые трубки растягиваются, а над горой – сжимаются. В результате над вершиной горы образуется антициклоническая завихренность, а над склонами – циклоническая.

Рассматриваемые в нашей статье кавказские вихри имеют горизонтальный размер порядка 100 км, число Россби не мало (порядка единицы), поэтому квазигеострофическая теория для них не применима. Не вызывает сомнения, что для кавказских циклонов имеет место механизм растяжения планетарной завихренности, однако его нельзя количественно описать с помощью квазигеострофической теории.

Детальный анализ различных механизмов генерации завихренности при образовании кавказских вихрей над Черным морем в данной статье не будет выполняться из-за сложности этой задачи, как видно из приведенного выше обзора. Это будет сделано в следующих статьях.

### Исходные данные и методика выделения вихрей

Мезомасштабные атмосферные явления над Черным морем на сегодняшний день почти не изучены, поскольку о состоянии атмосферы отсутствовали данные с высоким разрешением и за достаточно большой срок. Однако, благодаря созданию новых климатических региональных моделей, теперь такая возможность появилась. В нашей работе для изучения эволюции и характеристик кавказских вихрей использовались данные о полях приповерхностного ветра с 1961 по 1990 гг. с пространственным разрешением 25 км и временным разрешением 1 ч, полученные при помощи региональной гидростатической модели *PRECIS* [11]. В качестве начальных условий для регионального моделирования принимались результаты глобального моделирования с разрешением 150 км (модель *HadAM3P*) и данные реанализа *ERA-40* (с 1958 по 1996 гг.). При сопоставлении результатов моделирования с различными начальными условиями было обнаружено, что, независимо от начальных условий, характерные высота, радиус и интенсивность кавказских вихрей одинаковы. Также в обоих случаях в региональной модели сходно воспроизводятся суточный и сезонный циклы вихря, его траектория над морем.

Методика обнаружения кавказских вихрей в поле скорости приводного ветра состояла в следующем. На первом этапе ставилась цель определить характерный вид кавказского вихря на зрелой стадии. Под зрелой стадией имеется в виду тот период, когда кавказский вихрь, оторвавшись от побережья, полностью располагается над морем и имеет наибольшую за все время своей жизни скорость вращения. Были проанализированы поля скорости ветра для сроков, когда завихренность над восточной частью Черного моря была наиболее велика, и отобраны поля ветра, соответствующие наиболее интенсивным и симметричным кавказским вихрям на зрелой стадии. После этого отобранные поля скорости ветра осреднили; полученное в результате осреднения поле скорости в дальнейшем будем называть композиционным.

На втором этапе рассчитывался коэффициент пространственной корреляции всех полей скорости ветра с композиционным полем скорости по формуле

$$r = \frac{(\overline{V_x - \overline{V_x}})(\overline{V_x^{\text{com}} - \overline{V_x^{\text{com}}}}) + (\overline{V_y - \overline{V_y}})(\overline{V_y^{\text{com}} - \overline{V_y^{\text{com}}}})}{\sigma\sigma^{\text{com}}},$$

где  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_x^{\text{com}}$ ,  $V_y^{\text{com}}$  –  $x$ - и  $y$ -компоненты скорости обычного и композиционного полей ветра соот-

ветственно;  $\sigma = \sqrt{(\overline{V_x} - \overline{V_x})^2 + (\overline{V_y} - \overline{V_y})^2}$  и  $\sigma^{\text{com}} = \sqrt{(\overline{V_x^{\text{com}}} - \overline{V_x^{\text{com}}})^2 + (\overline{V_y^{\text{com}}} - \overline{V_y^{\text{com}}})^2}$

– среднеквадратические отклонения для обычного и композиционного полей скорости ветра соответственно. Горизонтальная черта сверху означает осреднение по пространству.

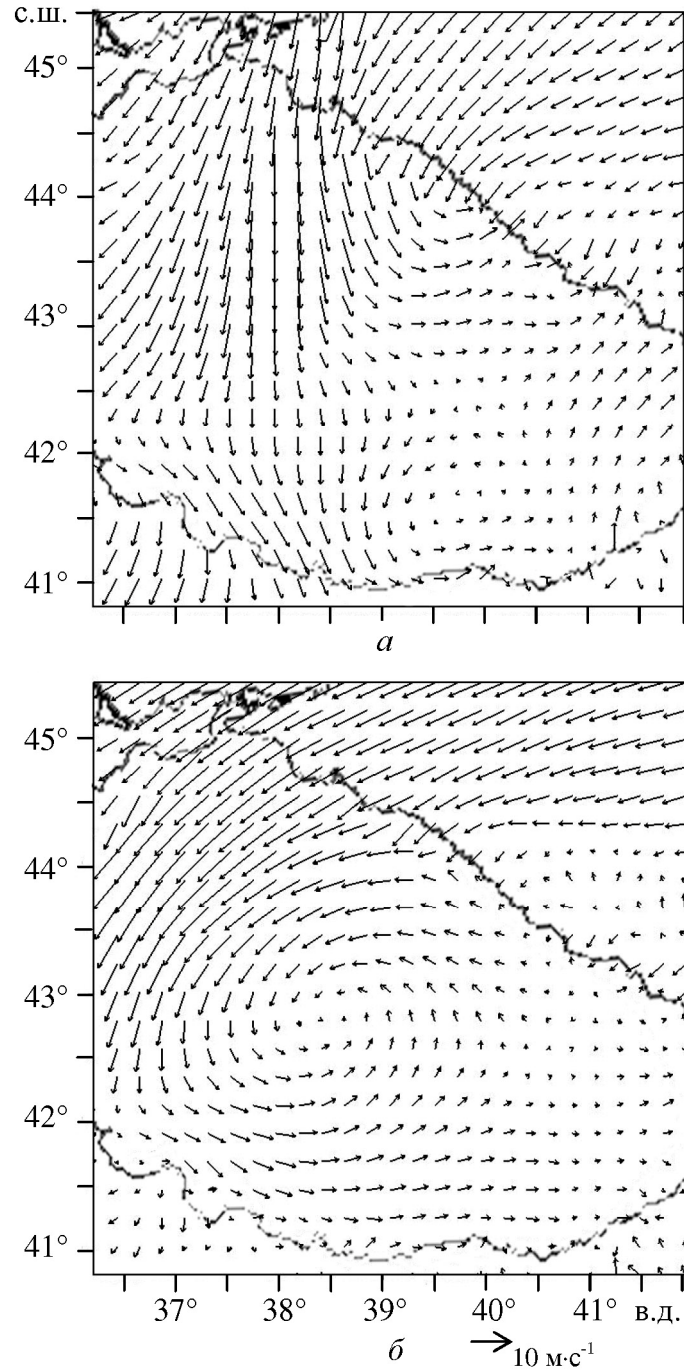
На третьем этапе были отобраны только те вихри, у которых коэффициент корреляции с композиционным полем скорости ветра в течение определенного времени превышал некоторую эмпирически установленную величину. Ограничение по времени было необходимо, чтобы исключить случайное кратковременное сходство и гарантированно выделить только долгоживущие вихри.

Кавказские вихри достаточно разнообразны, и поэтому построение только одного композиционного поля не гарантирует полноты выборки. Так, место отрыва вихрей от Кавказского побережья определяется направлением ветра над сушей. Когда ветер над Кавказскими горами близок к восточному, вихри отрываются от северной части Кавказского побережья, а при северо-восточном ветре область отрыва смещается к юго-востоку. Вихри могут различаться также направлением перемещения (от юго-западного до юго-восточного) и местоположением над морем на зрелой стадии. Кроме того, на зрелой стадии вихри могут иметь как круглую, так и вытянутую форму. Чтобы учесть эти отличия, было построено шесть композиционных полей, которые различались между собой в основном положением центра вихря на зрелой стадии. По этим композиционным полям было получено шесть выборок кавказских вихрей, которые затем объединили в одну для изучения общих свойств вихрей: времени жизни, суточного цикла, интенсивности, сезонного цикла.

Кавказские вихри составляют только малую часть из всего множества мезомасштабных вихрей, возникающих над восточной частью Черного моря. В связи с этим в выборку неизбежно попадут вихри, которые возникли над восточной частью моря по каким-то иным причинам, но поле скорости которых достаточно долгое время было похоже на композиционное. После просмотра выборки были оставлены только наиболее ярко выраженные кавказские вихри, окончательное количество которых составило 129. Это гарантировало, что в дальнейшем будут рассматриваться только интересующие нас вихри. Основным отличительный признак кавказских вихрей, по которому они отделялись от остальных вихрей восточной части моря, – это возникновение в непосредственной близости от суши. При этом ветер над морем, как правило, характеризуется циклонической завихренностью и имеет юго-восточное направление, а над сушей – северо-восточное.

## Основные результаты

**Описание кавказских вихрей по результатам численного моделирования.** Кавказские мезомасштабные вихри над юго-восточной частью моря возникают преимущественно в летне-осенний период и имеют явно выраженный суточный цикл. Характерный вид кавказского вихря на стадии зарождения и на зрелой стадии показан на рис. 1.



**Р и с. 1.** Поле приповерхностной скорости ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) характерного кавказского вихря, полученное по результатам климатического моделирования по модели *PRECIS* с начальными условиями из реанализа *ERA-40*: *а* – на стадии зарождения вихря, *б* – на зрелой стадии вихря

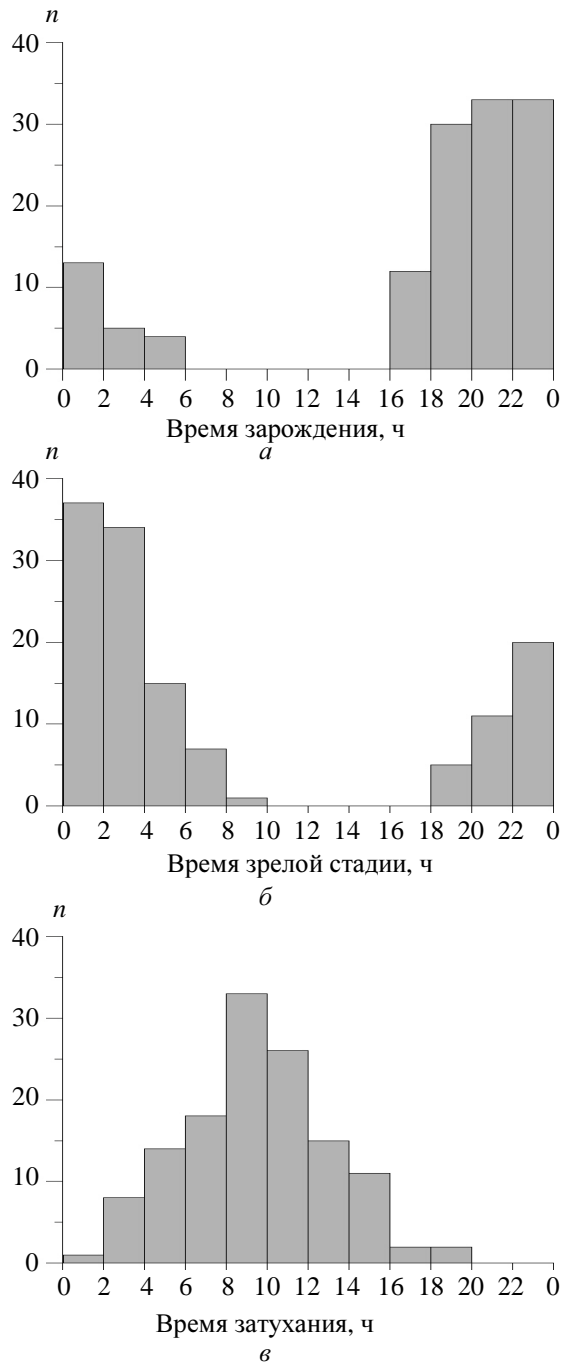
Кавказский вихрь начинает формироваться, когда ветер, дующий над морем вдоль Кавказских гор, имеет северо-западное направление, а набегающий на горы над сушей, – северо-восточное. На рис. 1, *а* показано поле скорости ветра над Кавказским побережьем, которое благоприятствует возникновению таких вихрей. Там, где северо-восточный поток встречается с северо-западным, во второй половине дня начинает формироваться вихрь. Постепенно отделяясь от побережья, он перемещается над морем в южном направлении. К ночи вихрь полностью располагается над морем и, как правило, приобретает круглую форму, а утром, заметно сместившись на юг от места своего зарождения, распадается. На зрелой стадии кавказского вихря поле скорости ветра, как видно из рис. 1, *б*, асимметрично: в западной части вихря скорость ветра больше, чем в восточной. На рис. 2 приведены гистограммы времени суток, когда вихрь зарождается, достигает зрелой стадии и затухает. Как видно из рисунка, начало развития вихрей, их усиление и затухание приходится на вторую половину дня, ночь и первую половину следующего дня соответственно, т.е. зрелая стадия вихрей наступает именно ночью, а не днем. Очевидно, что в развитии вихрей этого типа наблюдается отчетливый суточный цикл. В основном они образуются в послеполуденные часы (16 – 22 ч), достигают зрелой стадии ночью (22 – 06 ч) и рассеиваются утром (08 – 10 ч) на следующий день.

Кроме суточного цикла, кавказские вихри обладают также сезонным циклом. На рис. 3 приведена диаграмма частоты появления вихрей в разные месяцы, из которой видно, что кавказские вихри образуются в основном в июле и августе, а зимой практически не возникают. Более того, в июле и августе эти вихри, как правило, образуются один за другим: новый вихрь у Кавказского побережья начинается формироваться уже через несколько часов после того, как затухнет предыдущий. Количество вихрей в такой «цепочке» может достигать до шести.

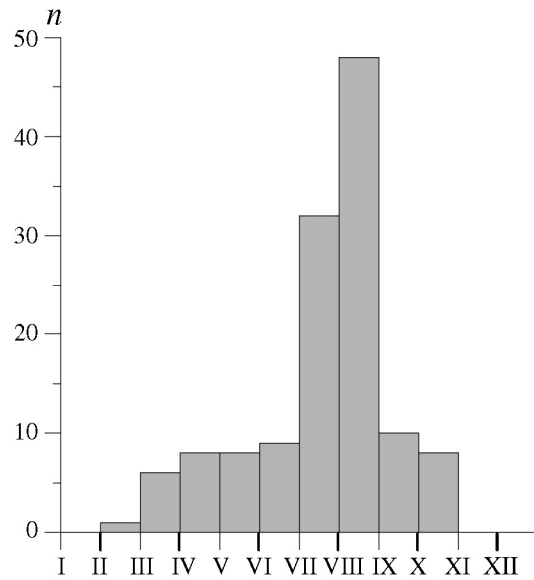
По результатам моделирования была также изучена вертикальная структура вихрей. Было обнаружено, что все рассмотренные кавказские вихри обладают следующим общим свойством: располагаются ниже уровня 1200 м, т.е. являются невысокими и приповерхностными. В основном эти вихри являются короткоживущими: у 77% вихрей время жизни не превышает 8 ч. Вообще же среднее время жизни вихрей составляет около 9 ч.

Кроме того, кавказские вихри довольно слабые, со скоростью приповерхностного ветра около  $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . На рис. 4 приведена гистограмма максимальных за время их жизни значений завихренности скорости. В среднем эта величина составляет  $2\cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

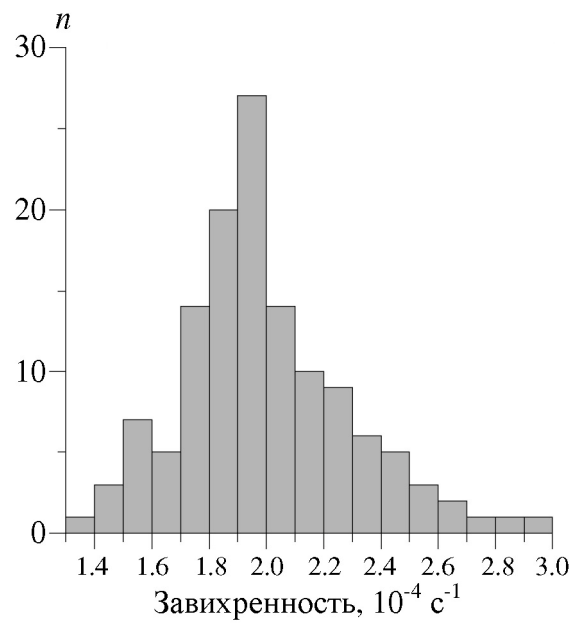
Таким образом, кавказские вихри – короткоживущие, приповерхностные, образуются в основном летом, полностью располагаются над морем, имея вид почти круглого циклонического вихря.



**Р и с. 2.** Суточный цикл эволюции кавказских вихрей по результатам климатического моделирования по модели *PRECIS* с начальными условиями из реанализа *ERA-40*: *а* – зарождение, *б* – зрелая стадия, *в* – затухание (*n* – количество вихрей)



**Р и с. 3.** Сезонный цикл возникновения кавказских вихрей по результатам климатического моделирования по модели *PRECIS* с начальными условиями из реанализа *ERA-40* ( $n$  – количество вихрей)



**Р и с. 4.** Гистограмма максимальных значений завихренности скорости ( $10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) кавказских вихрей за все время их жизни ( $n$  – количество вихрей)



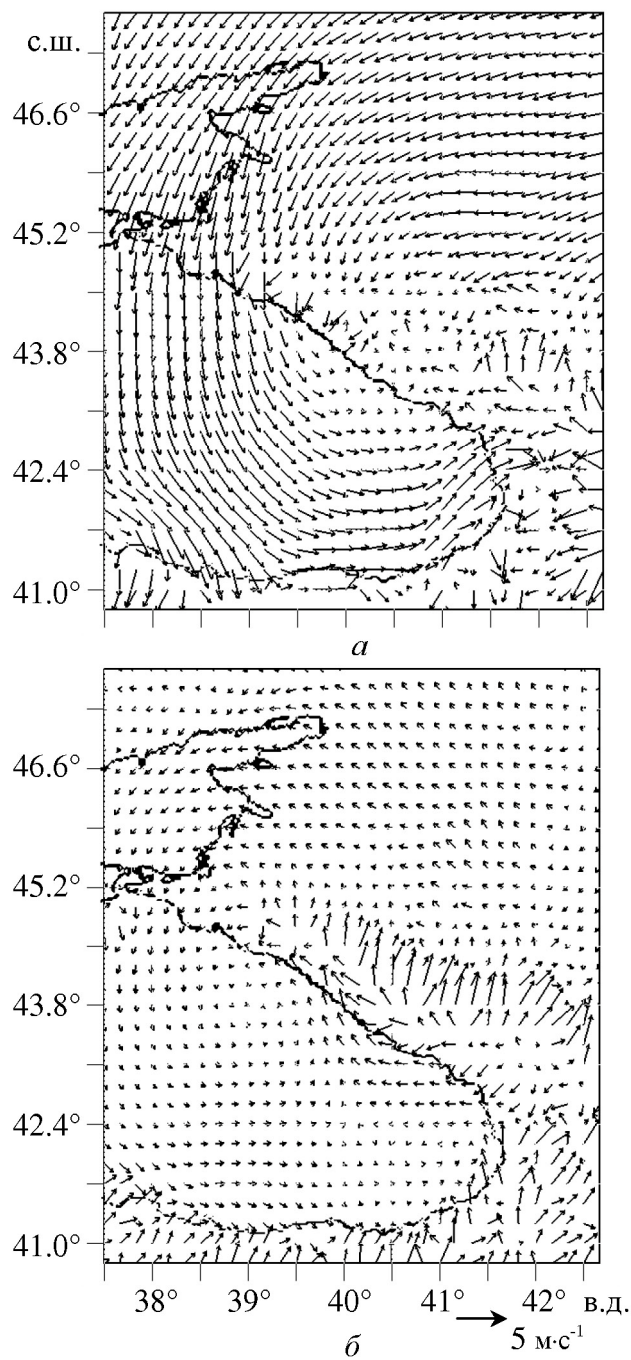
**Суточный и сезонный циклы кавказских вихрей.** По многим характеристикам, наличию суточного цикла и, возможно, механизму образования кавказские вихри сходны с каталинскими [3, 4], которые, как уже упоминалось, образуются во второй половине дня, начинают усиливаться ранним вечером, достигают зрелой стадии ночью и рассеиваются утром следующего дня.

Впервые каталинский вихрь был обнаружен на спутниковых снимках в 1986 г. и с тех пор исследовался как по данным наблюдений, так и при помощи атмосферных моделей. В работах [3, 4] были выделены основные причины зарождения каталинского вихря: достаточно сильная устойчивость атмосферы и сильный нисходящий поток воздуха с высокого берега на море, приводящий к подветренному циклогенезу за счет растяжения вертикальных вихревых трубок. К второстепенным факторам, влияющим на развитие каталинского вихря, относятся структура морского пограничного слоя, детали прибрежного рельефа и климатическое северо-западное течение вдоль калифорнийского берега.

Первоначально предполагалось, что суточный цикл каталинского вихря обусловлен морским бризом, который «размывает» циркуляцию в полуденные часы. Однако численные эксперименты не подтвердили это предположение. В статье [3] было показано, что суточный цикл явления обусловлен вариациями толщины и частоты плавучести устойчиво стратифицированного потока воздуха, набегающего на гору. Для каталинского вихря скорость набегающего на прибрежные горы потока также имеет суточный цикл: она максимальна в конце дня и минимальна утром. Ночью скорость потока мала, пограничный слой тонок и сильно устойчив, что дает малое число Фруда и приводит к обтеканию горного хребта. Во второй половине дня скорость потока увеличивается, а устойчивость уменьшается за счет нагревания от подстилающей поверхности, что приводит к увеличению числа Фруда и переваливанию потока через хребет. Это свидетельствует, таким образом, о суточном цикле изменений числа Фруда. Вследствие переваливания возникают сильные нисходящие по склонам гор потоки воздуха, которые при опускании адиабатически нагреваются. Это вызывает увеличение приповерхностной температуры воздуха над морем и формирование циклонической циркуляции. В работе [3] подчеркивается роль термического механизма в подветренном циклогенезе, помимо основного механизма, связанного с растяжением вихревых трубок.

Далее на конкретном примере будет показано, что суточный цикл летнего кавказского циклона над Черным морем обусловлен теми же причинами, что и каталинского вихря.

Сезонный цикл кавказского вихря обусловлен преимущественным направлением ветра над Кавказским побережьем в зимние и летние месяцы. На рис. 5 показано осредненное за 20 лет (1960 – 1980 гг.) поле ветра над восточной частью Черноморского региона для августа, когда кавказские вихри возникают наиболее часто, и января, когда эти вихри не возникают. Необходимое условие возникновения кавказских вихрей (северо-западный ветер над морем и северо-восточный над сушей) выполняется только в июле, августе и сентябре, и только в эти месяцы ветер над восточной частью моря имеет четко выраженную циклоническую завихренность (рис. 5, а).



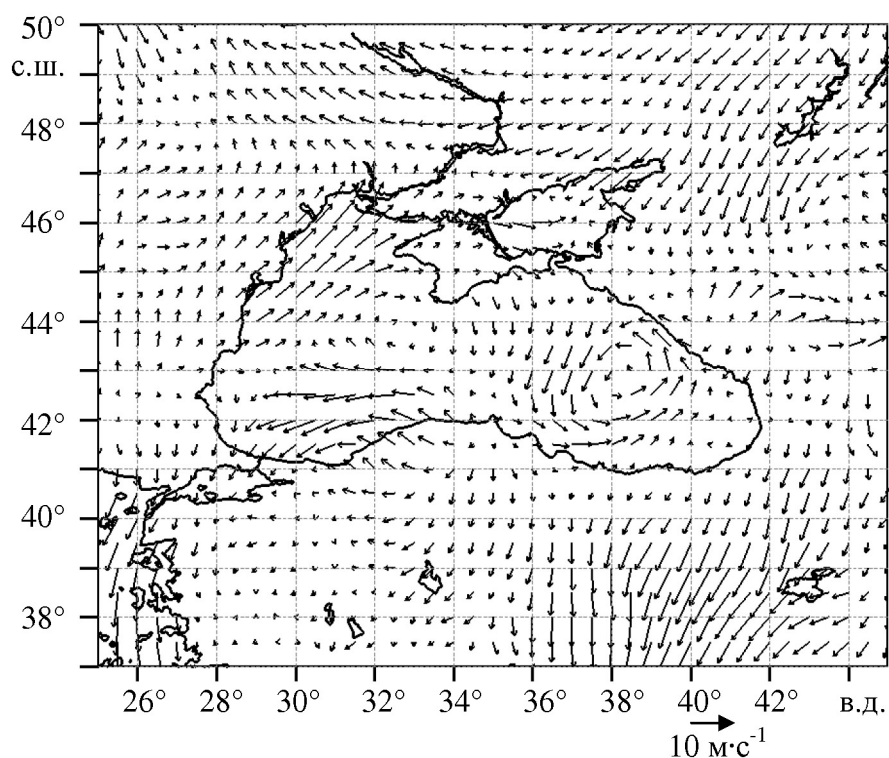
**Р и с. 5.** Преимущественное направление ветра в Кавказском регионе по результатам климатического моделирования по модели *PRECIS* с начальными условиями из реанализа *ERA-40*: *a* – для августа, *б* – для января

Кроме того, именно в летние месяцы ветер над Кавказскими горами имеет преобладающее северо-восточное направление, а в зимние месяцы какого-

*ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2012, № 3* 23

либо преобладающего направления ветра нет (рис. 5, б). При этом приповерхностная скорость набегающего на препятствие потока в среднем составляет  $1,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  для августа и  $0,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  для декабря, т.е. в зимние месяцы она приблизительно в 9 раз меньше.

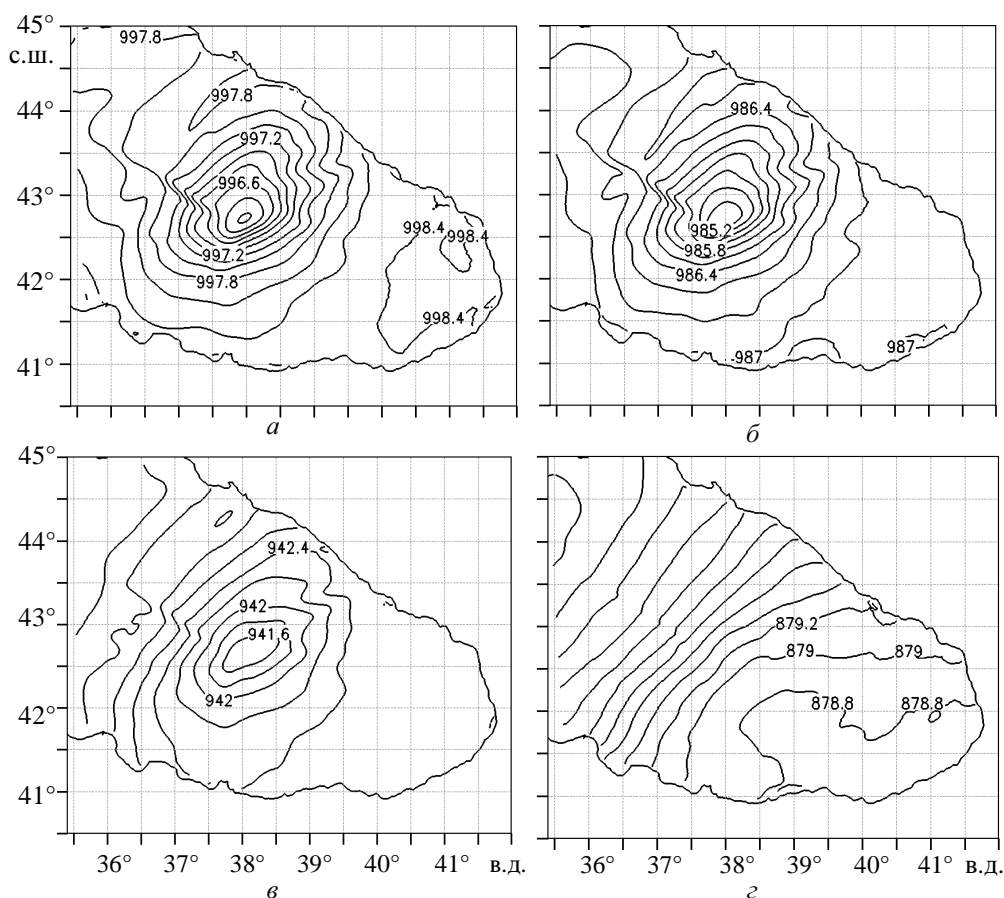
**Характерный пример кавказского вихря.** Рассмотрим более детально структуру вихря, причину суточного цикла его развития, а также возможный механизм возникновения. В качестве характерного кавказского вихря возьмем вихрь, существовавший над юго-восточной частью Черного моря с 22 по 23 июля 2007 г. Из рис. 6, на котором показано поле скорости приводного ветра по данным оперативного анализа *GFS* (*Global Forecast System*) с разрешением  $0,5^\circ$ , видно, что к 0 ч 23 июля над юго-восточной частью моря сформировался почти круглый циклон, сходный с характерным вихрем на рис. 1, б.



**Р и с. 6.** Поле скорости ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) приповерхностного ветра по данным оперативного анализа *GFS* с разрешением  $0,5^\circ$  для 0 ч 23 июля 2007 г.

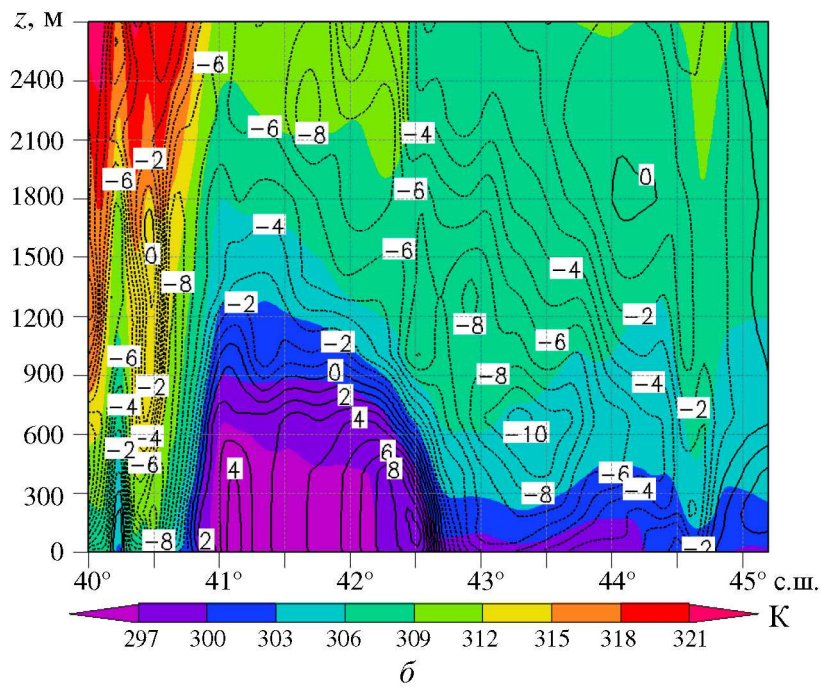
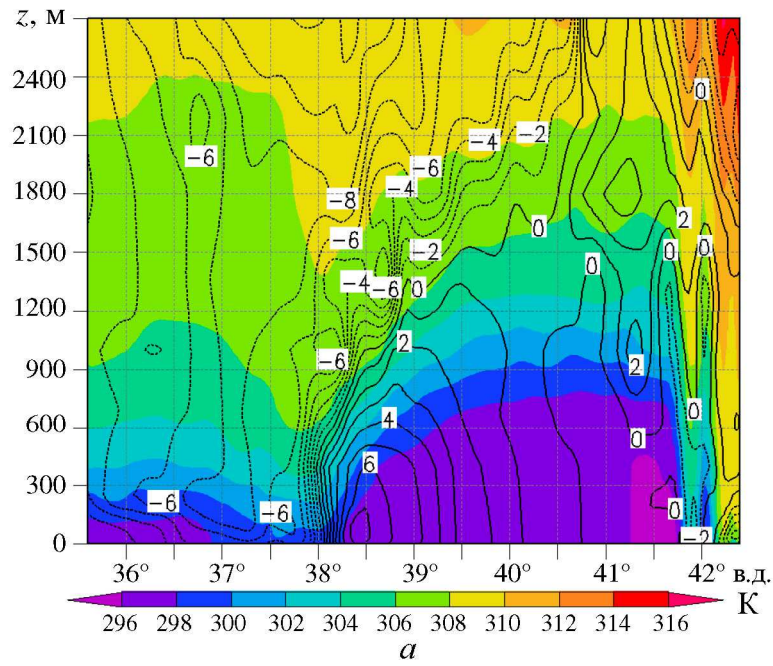
Согласно результатам негидростатического моделирования с использованием модели *MM5* с начальными и граничными условиями, взятыми из оперативного анализа, и разрешением 4 км время жизни вихря составляло 18 ч, и его развитие подчинялось описанному выше суточному циклу (рис. 2). Вихрь начал формироваться в 18 ч, достиг зрелой стадии в 0 ч и рассеялся на

следующий день к 6 ч. По полям давления над морем (рис. 7) было определено, что в высоту вихрь не превышал 1200 м.



**Р и с. 7.** Давление (гПа) над уровнем моря для 0 ч 23 июля 2007 г. по результатам негидростатического моделирования по модели *MM5* с разрешением 4 км на высоте: *а* – 100 м, *б* – 200 м, *в* – 600 м, *г* – 1200 м

На рис. 8, *а*, *б* приведены разрезы потенциальной температуры, проведенные через приповерхностный центр вихря при постоянных широте ( $42,7^\circ$  с.ш.) и долготе ( $38^\circ$  в.д.) соответственно, и компоненты скорости ветра, перпендикулярные линии разреза. Из рис. 8 видно, что связанная с вихрем циркуляция была сосредоточена вблизи поверхности. Таким образом, так же как и каталинский вихрь, кавказский циклон был невысоким. Максимальные за время его жизни завихренность скорости ( $7,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) и скорость ветра ( $20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) достигались на уровнях 230 и 360 м соответственно. Вторжение теплого воздуха при его переваливании через Кавказские горы в вечерние часы приводит к понижению давления и уменьшению толщины пограничного слоя над морем в области образующегося вихря. Так как данный вихрь имеет теплое ядро, то в соответствии с формулой для термического ветра скорость в нем должна уменьшаться с высотой, что и имеет место в действительности.



**Р и с. 8.** Потенциальная температура (К) и скорость ветра ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) по результатам моделирования по модели *MM5* с разрешением 4 км для 0 ч 23 июля 2007 г.: *a* – зональный разрез потенциальной температуры (цвет) и *y*-компонента скорости ветра (изолинии), *б* – меридиональный разрез потенциальной температуры (цвет) и *x*-компонента скорости ветра (изолинии) (по оси *y* отложена высота в метрах над уровнем моря)

В отличие от синоптических циклонов в свободной атмосфере в нашем случае геострофический баланс нарушается: поскольку вихрь мезомасштабный, нельзя пренебречь центробежной силой и, так как вихрь приповерхностный, нельзя также не учитывать силу трения. Поэтому соотношение для термического ветра нельзя использовать для количественных оценок уменьшения скорости ветра в вихре с высотой. Но тем не менее качественно это соотношение верно описывает картину, имеющую место в модели *MM5*: начиная с высоты 100 м скорость ветра в вихре в среднем с высотой уменьшалась. В этом отношении данный вихрь подобен тропическому циклону, имеющему теплое ядро, и отличается от обычного высотного среднеширотного циклона с холодным ядром, в котором скорость растет с высотой.

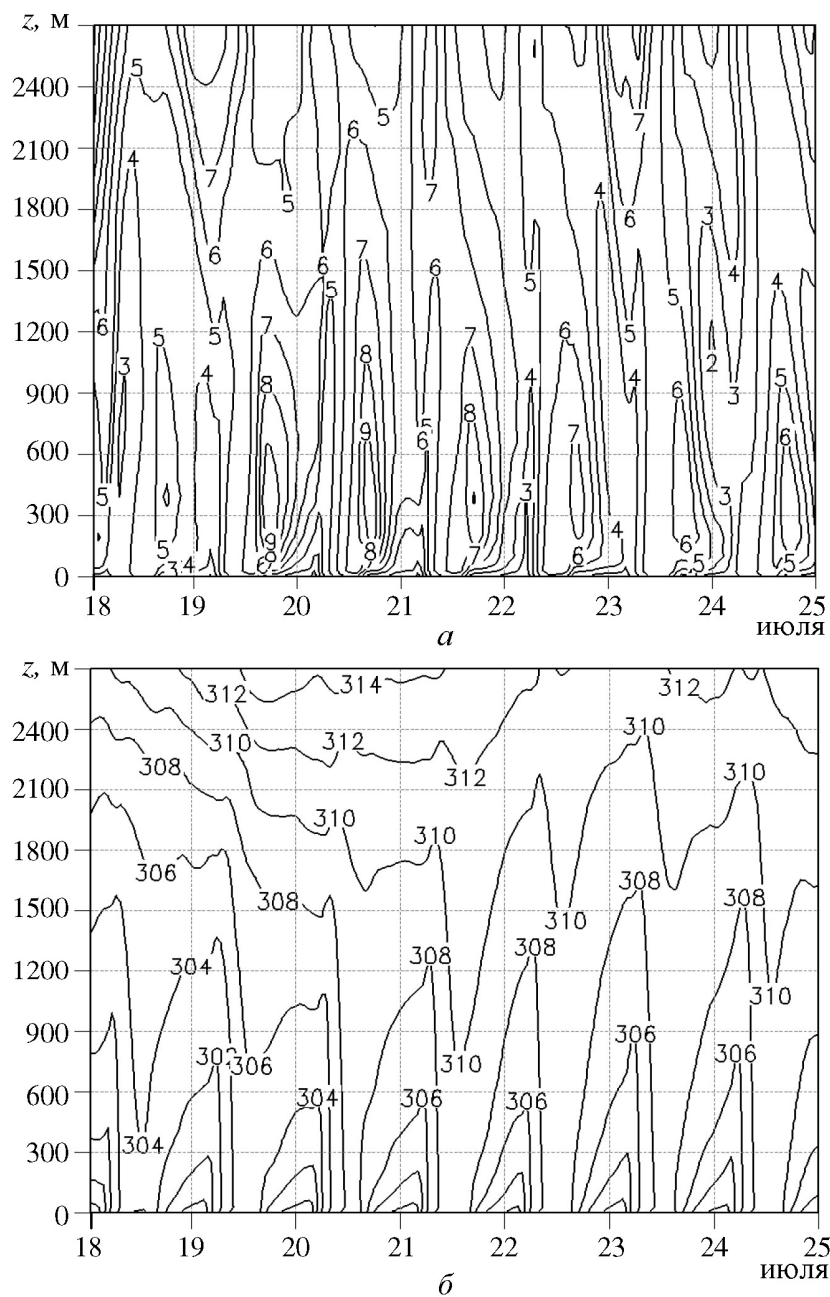
На рис. 9, *а* показано вертикальное распределение модуля скорости ветра с 18 по 25 июля, осредненное для территории Краснодарского края между Азовским и Черным морями. То есть на рис. 9, *а* показан суточный цикл модуля скорости набегающего на гору ветра. Видно, что модуль скорости ветра достигает максимума в вечерние часы.

На рис. 9, *б* показано вертикальное распределение потенциальной температуры с 18 по 25 июля, осредненное для той же области на суше. На этом рисунке виден суточный цикл частоты плавучести пограничного слоя над сушей, связанный с дневным прогревом и ночным охлаждением подстилающей поверхности. Днем пограничный слой толстый и безразлично стратифицирован, ночью – тонкий, сильноустойчивый. Суточный цикл модуля скорости ветра и частоты плавучести пограничного слоя над Краснодарским краем такой же, как и над Калифорнийской долиной, когда формируется каталинский вихрь. Кавказские вихри, как и каталинские, возникают в основном в послеполуденные часы, когда скорость ветра уже достаточно велика, а пограничный слой еще слабоустойчивый. Над Кавказскими горами наблюдается суточный цикл изменения компоненты скорости ветра, перпендикулярной к хребту, совпадающий с суточным циклом числа Фруда набегающего потока.

Таким образом, можно предположить следующий механизм возникновения кавказского вихря. Когда непрерывно стратифицированный поток воздуха набегающий на препятствие, на верхних уровнях он переваливает через хребет, а на нижних – обтекает его. За горой, таким образом, над морем образуется область, куда не может проникнуть воздух с нижних уровней набегающего на гору потока и куда, в соответствии с уравнением неразрывности, спускается воздух с верхних уровней после того, как поток перевалил через гору. Причем это оседание происходит не до той высоты, на которой частица воздуха находилась в набегающем потоке, а значительно ниже, почти до поверхности моря. Поэтому вследствие адиабатического нагрева температура частицы воздуха после переваливания становится больше, чем была до переваливания. Когда число Фруда мало, лишь малая часть набегающего потока переваливает через хребет, из-за чего прогрев приповерхностного воздуха на подветренной стороне препятствия будет невелик. Когда число Фруда увеличивается, увеличиваются масса воздуха, переваливающего через препятствие, и, следовательно, прогрев приповерхностного воздуха на подветренной стороне хребта. В связи с этим за хребтом образуется приповерхност-



ная область пониженного давления, что и способствует возникновению вихря. После возникновения кавказский вихрь не стоит на месте, а сносится фоновым потоком от препятствия на юг.



**Р и с. 9.** Суточные изменения с 0 ч 18 июля по 0 ч 25 июля 2007 г. по результатам моделирования по модели *MM5* с разрешением 4 км средних по Кавказскому побережью: *а* – модуля горизонтальной скорости ветра ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), *б* – потенциальной температуры (K) (по оси  $y$  отложена высота в метрах над уровнем моря)

В статье [7] использовалась более сложная, чем в предыдущих работах [1, 5, 6, 8], модель взаимодействия непрерывно стратифицированного потока с препятствием, в которой учитывались нелинейные слагаемые, вязкость, сила Кориолиса. В работе [7] было обнаружено, что при уменьшении числа Фруда до некоторого критического значения порядка единицы поток воздуха на нижних уровнях за горой меняет свое направление на противоположное: течет не от препятствия, а к нему. Поскольку по реалистичности использовавшаяся в этой работе модель сравнима с *ММ5*, можно предположить существование подобного явления и по результатам моделирования, представленным в нашей статье. Однако, поскольку в данном случае с одной стороны горного хребта находится море, а с другой – суша (в отличие от других моделей [1, 5 – 8, 10], где горы целиком располагались на суше), проследить это явление не представляется возможным, так как оно неизбежно будет перекрываться бризом.

### Заключение

В статье сравнивались климатические характеристики кавказских вихрей, определенные по результатам регионального моделирования с различными начальными и граничными условиями: по глобальной атмосферной модели и по данным реанализа. В обоих случаях развитие вихрей протекает одинаково, четко выражен суточный цикл явления, частота появления вихрей в зимние и летние месяцы качественно воспроизведена правильно. Траектории движения вихрей также одинаковы: вихри, формируясь, движутся в южном направлении, при этом они могут отклоняться как на запад, так и на восток. Основные свойства явления, которые также подтверждаются результатами негидростатического моделирования, проведенного для одного характерного случая, следующие: кавказские вихри – короткоживущие, приповерхностные, образуются в основном летом и на зрелой стадии полностью располагаются над морем. Время жизни кавказского вихря не превышает 1 сут, горизонтальный размер ~100 км, вертикальный ~1 км, скорость ветра составляет приблизительно  $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Было показано, что суточный цикл развития вихря связан с суточным циклом изменения скорости ветра и частоты плавучести набегающего потока, а значит, и с суточным циклом числа Фруда.

Для подтверждения существования кавказских вихрей и изучения их структуры и динамики необходимо выполнение целенаправленных натуральных экспериментов с использованием приземных метеонаблюдений с высоким пространственным разрешением, запусков радиозондов и падающих зондов, самолетных и корабельных измерений. К настоящему времени таких целенаправленных экспериментов в восточной области Черного моря не проводилось. Приведенные в данной статье результаты получены только при помощи численного регионального моделирования.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Smith R.B.* Some aspect of the quasi-geostrophic flow over mountains // *J. Atmos. Sci.* – 1979. – 36, № 12. – P. 2385 – 2393.
2. *Гилл А.* Динамика атмосфери і океана. Т. 1. – М.: Мир, 1986. – 396 с.
3. *Davis C.A., Simon L.-N.* Dynamics of a Catalina eddy revealed by numerical simulation // *Mon. Wea. Rev.* – 2000. – 128, № 8. – P. 2885 – 2904.
4. *Skamarock W.C., Rotunno R., Klemp J.B.* Catalina eddies and coastally trapped disturbances // *J. Atm. Sci.* – 2002. – 59, № 14. – P. 2270 – 2278.
5. *Smolarkiewicz P.K., Rotunno R.* Low Froude number flow past three-dimensional obstacles. Part I: Baroclinically generated lee vortices // *Ibid.* – 1989. – 46, № 8. – P. 1154 – 1164.
6. *Schär C., Smith R.B.* Shallow-water flow past isolated topography. Part I: Vorticity production and wake formation // *Ibid.* – 1993. – 50, № 10. – P. 1373 – 1400.
7. *Epifanio C.C., Rotunno R.* The dynamics of orographic wake formation in flows with upstream blocking // *Ibid.* – 2005. – 62, № 9. – P. 3127 – 3150.
8. *Schär C.* Vortex formation and vortex shedding in continuously stratified flows past isolated topography // *Ibid.* – 1997. – 54, № 4. – P. 534 – 554.
9. *Hunt J.C.R.* Experiments on stably and neutrally stratified flow over a model three-dimensional hill // *J. Fluid. Mech.* – 1979. – 96, № 4. – P. 671 – 704.
10. *Qingfang J., Smith R.B., Doyle J.D.* Impact of the atmospheric boundary layer on mountain waves // *J. Atm. Sci.* – 2008. – 65, № 2. – P. 592 – 608.
11. *Jones R.G., Noguer M., Hassell D.C. et al.* Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. – Exeter, UK: Met Office Hadley Centre. – 2004. – 40 p.

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, Севастополь  
E-mail: darik777@i.ua

Материал поступил  
в редакцию 10.06.10  
После доработки 21.11.10

АНОТАЦІЯ У статті розглядаються підвітряні циклонні вихори, які раніше не вивчалися, що виникають над Чорним морем поблизу Кавказького побережжя. Метод дослідження – регіональне кліматичне моделювання, для якого як початкові та граничні умови використовувалися результати глобального моделювання за моделлю *HadAM3P* і дані реаналізу *ERA-40*. На основі результатів моделювання визначені характерні розміри та інтенсивність вихорів. Показано також, що їх виникнення та еволюція характеризуються наявністю відповідно сезонного і добового циклів.

**Ключові слова:** мезомасштабні атмосферні вихори, число Фруда, регіональне кліматичне моделювання.

ABSTRACT Not studied before cyclonic lee vortices generated over the Black Sea near the Caucasian coast are considered. The method of studying is regional climatic modeling in which reanalysis *ERA-40* data and results of global modeling by *HadAM3P* model are used as initial and boundary conditions. Based on modeling results, characteristic space scale and intensity of vortices are defined. It is also shown that their generation and evolution are characterized by presence of seasonal and diurnal cycles, respectively.

**Keywords:** mesoscale atmospheric vortices, Froude number, regional climatic modeling.