

Д.А. Яровая, В.В. Ефимов

Численное моделирование валиковых структур в мезомасштабных вихрях над Черным морем

Рассматриваются возможные причины возникновения узких протяженных валиков, наблюдающихся в результатах численного моделирования мезомасштабных вихрей над Черным морем. В качестве характерного примера рассмотрена мелкомасштабная структура вихря, образовавшегося вблизи Крыма 15 августа 2007 г. Определены свойства валиков, указаны механизмы их появления: конвективная неустойчивость Рэля – Бенара, динамическая неустойчивость, а также адвекция в фоновом потоке локальных неоднородностей поля скорости, связанных с положительными значениями критерия Окубо – Вейса.

Ключевые слова: валиковая циркуляция, региональное численное моделирование.

Введение

Атмосферная циркуляция над Черным морем характеризуется рядом мезомасштабных особенностей, которые на сегодняшний день изучены недостаточно. В работах [1 – 4] кратко описаны некоторые из таких мезомасштабных структур, воспроизведенных в результате численного моделирования атмосферной циркуляции в Крымском регионе. Среди них можно выделить квазидвумерные вихри, образующиеся летом вблизи Кавказского и южной части Крымского побережья и названные по месту своего зарождения соответственно кавказскими и крымскими [2 – 4]. Детально структура и динамика таких вихрей на примере крымского вихря рассмотрена в работе [2]. Помимо этого, при моделировании атмосферной циркуляции часто возникают явления более мелкого масштаба, такие, как узкие и протяженные циркуляционные валики, размеры которых составляют $\sim 3 - 5$ км в ширину и до 50 км в длину, а вертикальная скорость подъема и оседания воздуха в них достигает $0,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. В высоту циркуляционные валики не превосходят 700 – 1000 м, и их оси могут располагаться как под углом, так и вдоль направления фонового ветра. Причинами возникновения таких атмосферных валиков обычно является конвективная и динамическая неустойчивость [5]. В первом случае валики возникают за счет высвобождения доступной потенциальной энергии (работа сил плавучести), во втором – за счет уменьшения кинетической энергии среднего потока. В природе эти механизмы действуют одновременно и достаточно сложно выделить один из них в чистом виде, причем, согласно [5], оба механизма могут играть сравнимые роли в развитии валиковой циркуляции.

Данная статья является развитием работы [2], в которой исследовалась динамика крымского вихря над Черным морем и в процессе моделирования была выделена мелкомасштабная циркуляция в виде валиковых структур в приводном пограничном слое атмосферы. Механизмы образования таких структур были не совсем ясны.

© Д.А. Яровая, В.В. Ефимов, 2013

Описание численной модели

Основным инструментом при исследовании являлось численное моделирование, поскольку данные наблюдений с достаточно высоким пространственным разрешением отсутствуют.

При моделировании использовалась численная модель региональной атмосферной циркуляции *Advanced Research WRF (ARW)* версии 3.3.1 на трех вложенных доменах с горизонтальным разрешением 9×9 , 3×3 и 1×1 км. По вертикали было задано 37 неравномерно расположенных по высоте η -уровней с увеличенным разрешением в пограничном слое. Поскольку исследуемые атмосферные явления низкие, количество вертикальных уровней в пограничном слое было увеличено по сравнению с заданным в модели по умолчанию.

Использовались следующие схемы параметризации: *Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)* и схема *Dudhia* для расчета радиационного баланса длинноволновой и коротковолновой радиации соответственно, схема *Kain – Fritsch* – для расчета кучевой конвекции в доменах с разрешением 9 и 3 км (в домене с разрешением 1 км кучевая облачность рассчитывалась явно и параметризация была не нужна). Для описания фазовых переходов в атмосфере применялась схема *Single-Moment 3-class*, для параметризации приземного слоя трения – схема *MM5 similarity* [6].

Планетарный пограничный слой параметризовался при помощи схемы *Yonsei University* [7], в которой коэффициент вертикальной турбулентной вязкости K_z задается в виде линейно-параболического профиля $K_z = \kappa w z (1 - z/H)^2$, где $\kappa = 0,4$ – постоянная Кармана; w – масштаб вертикальной скорости ветра; H – толщина пограничного слоя. Процессы нелокального перемешивания учитывались введением противогradientного слагаемого, пропорционального потоку от поверхности. Коэффициенты турбулентного обмена теплом и влагой подсчитывались через K_z с учетом переменного числа Прандтля, безразмерные функции профилей скорости, тепла и влаги задавались с помощью известных соотношений Монина – Обухова. Для свободной атмосферы использовалась локальная схема замыкания, где K_z задавался пропорциональным квадрату пути смешения, вертикальному градиенту скорости и заданной функции локального числа Ричардсона. На верхней границе планетарного пограничного слоя учитывались также процессы вовлечения. В пределах переходного слоя, в зоне вовлечения, K_z задавался как геометрическое среднее между величинами для свободной атмосферы и верхней границы планетарного пограничного слоя, высота которого определяется критическим числом Ричардсона, равным 0,5.

Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии в модели рассчитывается как $K_h = C^2 \Delta x \Delta y \sigma$, где $C \approx 0,25$; Δx , Δy – горизонтальное разрешение модели; σ – величина деформации поля горизонтальной скорости ветра.

Входными для внешнего домена являлись данные оперативного анализа *Global Final Analyses (FNL)* с разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$, которые обновлялись каждые 6 ч. После адаптации модели к заданным начальным условиям развитие атмосферных процессов во всех трех доменах определялось лишь периодически обновляющимися граничными условиями на внешнем домене.

Циркуляционные валики в контрольном прогоне

Рассмотрим мелкомасштабную структуру крымского вихря, рассчитанного в ходе численного моделирования атмосферной циркуляции для 15 – 16 августа 2007 г. (в дальнейшем этот прогон будем называть контрольным) [2]. Этот сравнительно низкий квазидвумерный вихрь зародился ночью вблизи южной оконечности Крыма, оторвался от побережья и затем, монотонно затухая, переместился на расстояние $\sim 200 - 250$ км от берега. Его крупномасштабная структура и эволюция подробно описаны в работе [2], нас же будет интересовать мелкомасштабная валиковая конвективная циркуляция, возникающая в области вихря, в планетарном пограничном слое атмосферы над морем.

На рис. 1 показано поле вертикальной и горизонтальной скорости ветра на высоте $z = 400$ м, где скорость подъема и опускания воздуха в валиках наиболее велика. Видно, что кроме основного крупномасштабного, близкого к осесимметричному, вихревого движения с орбитальными скоростями до $4 - 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ возникают характерные мелкомасштабные циркуляционные валики, расстояние между которыми составляет $3 - 5$ км. На увеличенной части рис. 1 видно, что валики проявляются не только в поле вертикальной скорости ветра, но и в поле завихренности скорости.

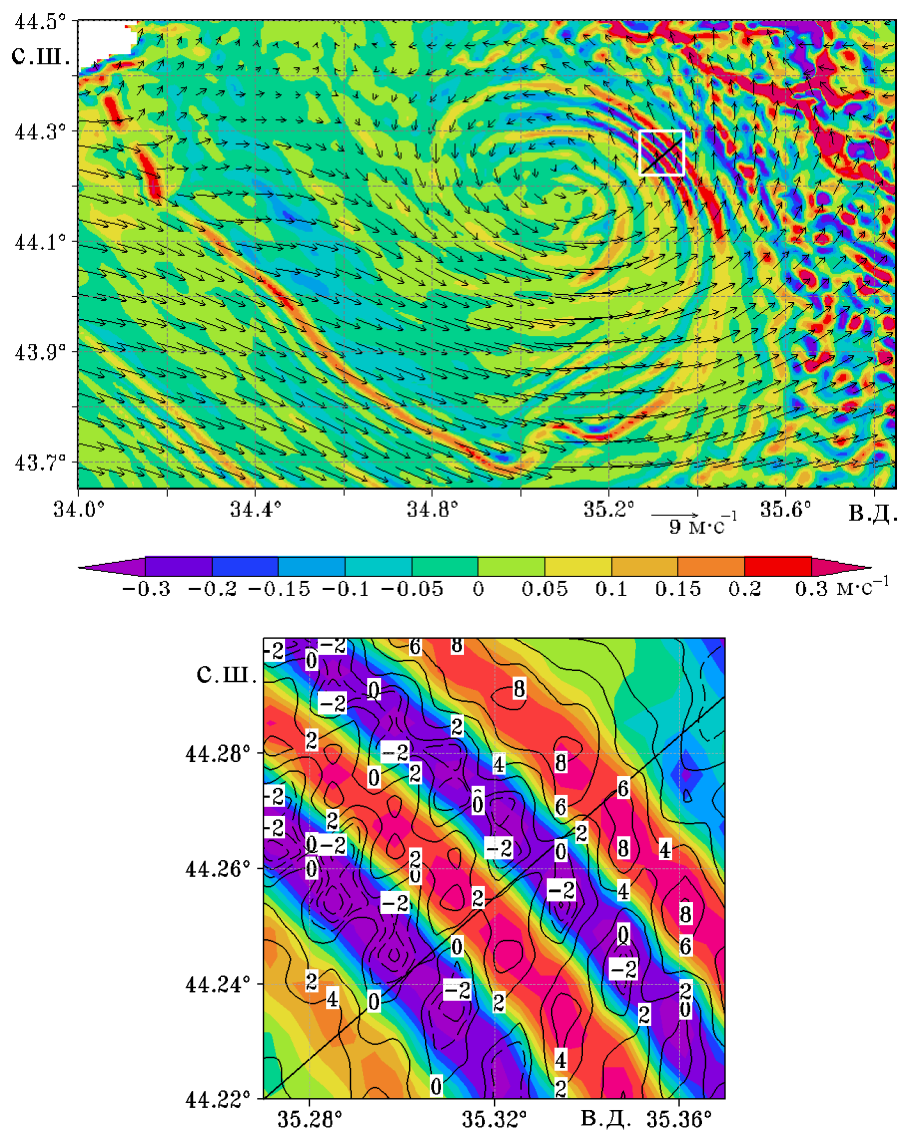
На рис. 2 вертикальная структура валиков представлена на вертикальном разрезе, проходящем по нормали к одному из валиков. Изолиниями показана горизонтальная компонента скорости, лежащая в плоскости разреза, цветом – вертикальная скорость. Видно, что горизонтальный и вертикальный масштабы валиков соотносятся как $5 : 1$, характерные величины вертикальной скорости в центральной части валика составляют $\pm (0,4 - 0,6) \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, горизонтальной компоненты циркуляционной скорости $\sim 0,3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Таким образом, эта мелкомасштабная валиковая циркуляция представляет собой квазидвумерные вихри с горизонтально ориентированными осями. Аспектное соотношение $5 : 1$ укладывается в диапазон величин, полученных в наблюдениях и численных расчетах многих авторов [8].

Поскольку, как упоминалось выше, ширина валиков невелика и составляет $3 - 5$ км, может возникнуть сомнение, что разрешения в 1 км достаточно для их воспроизведения. Поэтому с целью проверки основных результатов моделирования был проведен дополнительный прогон на четырех вложенных доменах. В связи с вычислительными трудностями четвертый домен с разрешением 300×300 м охватывал лишь небольшую область над морем вблизи Крымского побережья, и можно было отследить только начальную стадию развития крымского вихря. Тем не менее было отмечено, что циркуляционные валики, наблюдавшиеся в расчете с разрешением 300 м, по своим характеристикам не принципиально отличаются от валиков, воспроизведенных в прогоне с разрешением 1 км.

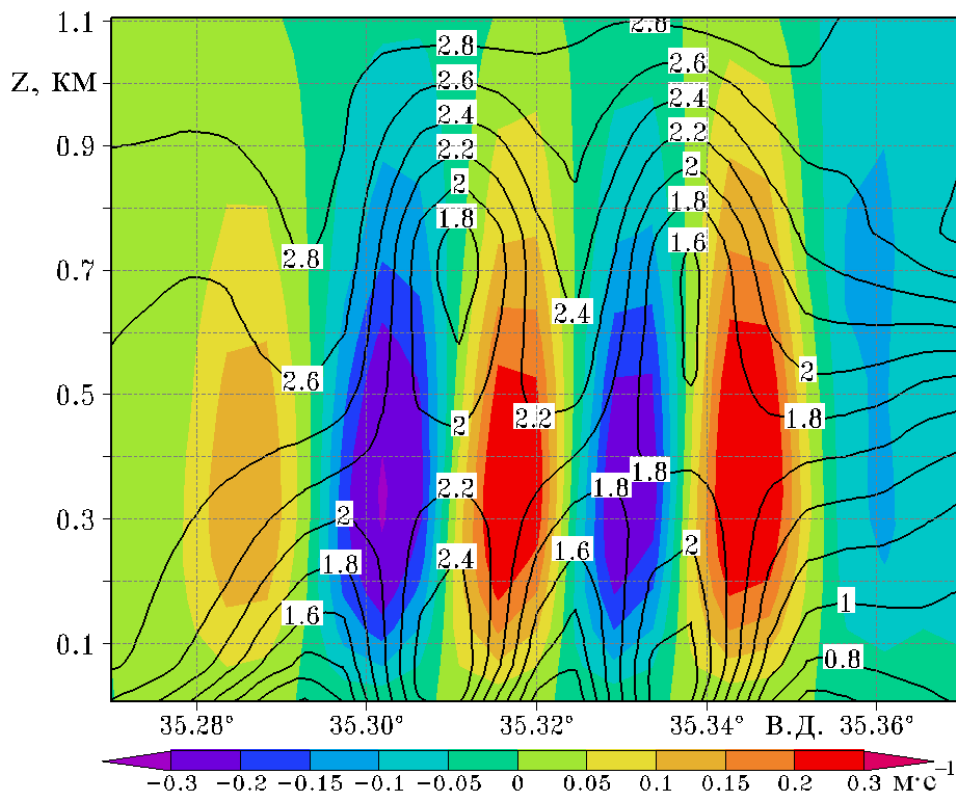
Основной причиной возникновения валиков является конвекция в пограничном слое атмосферы над морем. Параметром, определяющим конвективную неустойчивость, является число Рэля, которое представляет собой отношение

силы плавучести к силе трения: $Ra = \frac{\Delta\theta g H^3}{\theta K_z K_T}$, где $\Delta\theta$ – перепад потенциалной температуры в конвективном слое; K_T – коэффициент турбу-

лентной теплопроводности [8]. Для нашего случая $\Delta\theta$ составляет $\sim 0,1 - 0,3$ К, $H \sim 10^3$ м. Принимая K_z и K_T равными ~ 1 м²·с⁻¹, получим $Ra \sim 10^6$, что намного превышает критические значения, при которых возникает конвекция. На практике для выявления конвективной неустойчивости используется не число Рэлея, а отношение высоты инверсии z_i к параметру Монина – Обухова L_{MO} , которое позволяет определить, какой вклад вносит работа сил плавучести в генерацию турбулентной кинетической энергии в неустойчиво стратифицированном сдвиговом потоке.



Р и с. 1. Поле вертикальной (цвет) и горизонтальной (стрелки) скорости ветра на высоте 400 м по результатам контрольного прогона (9.00 16 августа 2007 г.). Ниже основного рисунка показан увеличенный фрагмент в белой рамке, изолиниями – завихренность (10^{-4} с⁻¹) скорости ветра

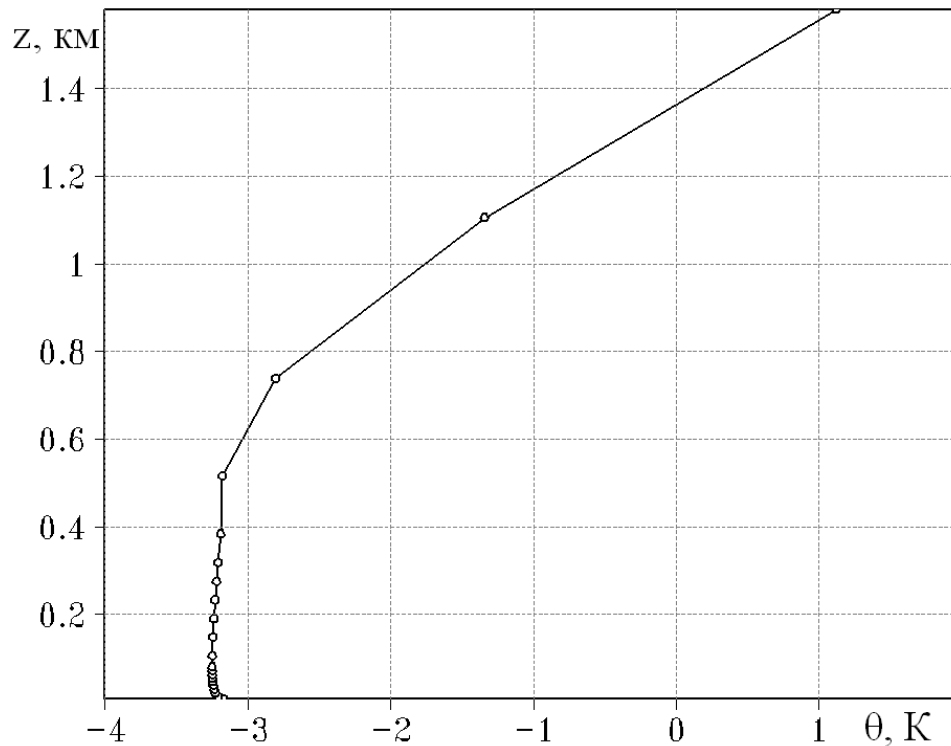


Р и с. 2. Разрез вертикальной скорости ветра (цвет) по результатам контрольного прогона. Изолиниями показана горизонтальная компонента скорости ветра, лежащая в плоскости разреза. Разрез обозначен черной линией на рис. 1

На рис. 3 для контрольного прогона показан профиль потенциальной температуры, осредненной по пространству, занимаемому валиками. Видно, что высота инверсии, начиная с которой пограничный слой стратифицирован устойчиво, равна ~ 800 м и в этом, близком к нейтрально стратифицированному, пограничном слое формируются валики. Отношение z_i/L_{MO} для вихревой области (рис. 1) составляет $-20 \dots -16$. Согласно [5], при $z_i/L_{MO} > -5$ конвекция происходит в основном в виде валиков, при $z_i/L_{MO} < -25$ – в виде ячеек. Указанный выше диапазон значений z_i/L_{MO} , таким образом, соответствует смешанному типу конвекции. Поток явного тепла от поверхности моря в области, занимаемой валиками, невелик, $\sim 6 - 9 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$.

Таким образом, конвективная неустойчивость действительно была одной из причин возникновения валиковых структур во вложенном домене с разрешением 1×1 км. Причем валики появлялись как в самой области близкого к осесимметричному вихря (где они были ориентированы, как правило, под углом к направлению орбитального вихревого движения), так и вне ее, где помимо валиков также имели место ячейки. Как известно, в том случае, когда валиковые структуры образуются в результате конвективной неустойчивости типа Рэля – Бенара, они вытянуты примерно по направлению вектора скорости фоновго потока [8], что, как видно из рис. 1, в нашем случае не везде

выполняется. В связи с этим возникает вопрос о других, кроме конвективной неустойчивости, возможных причинах появления валиковых структур, среди которых рассмотрим адвекцию и деформацию неоднородностей полем скорости приводного ветра.



Р и с. 3. Профиль средней по области, занимаемой валиками, потенциальной температуры (К) по результатам контрольного прогона (9.00 16 августа 2007 г.)

Для определения степени деформации поля скорости используем критерий Окубо – Вейса $W = (\sigma^2 - \zeta^2)/4$, равный разности между квадратом скорости деформации $\sigma^2 = (u_x - v_y)^2 + (v_x + u_y)^2$ и квадратом завихренности $\zeta^2 = (v_x - u_y)^2$, где u_x, u_y, v_x и v_y обозначают производные x - и y -компонент скорости по соответствующим координатам. Как известно, критерий Окубо – Вейса является мерой скорости относительного рассеяния лагранжевых частиц, т. е. мерой расхождения первоначально близких траекторий [9, 10]. В зависимости от знака W возможны три случая движения частиц жидкости: эллиптический, гиперболический и переходный. В тех областях потока, где $W < 0$, расстояние между частицами периодически изменяется во времени. В тех же областях, где $W > 0$, расстояние между ними экспоненциально растет в одном направлении и уменьшается – в другом, $\sim \exp(\pm\sqrt{W}t)$. Таким образом, величина W позволяет определить баланс между завихренностью и деформацией в заданной точке неизменного во времени потока [9, 10], а в на-

шем случае – оценить, насколько произойдет растяжение первоначально круглого «пятна» пассивной примеси. Одностороннее растяжение «пятен» неоднородностей приводит к появлению «лент» в поле пассивной примеси.

Для того чтобы выделить вышеописанный механизм появления валиков, был выполнен численный эксперимент, в котором конвективная неустойчивость искусственно подавлялась, а влияние адвекции и деформации в поле скорости на эволюцию неоднородностей сохранялось.

Циркуляционные валики в численном эксперименте

Были проведены два численных эксперимента с понижением температуры поверхности моря (ТПМ) сначала на 5°C , а затем на 10°C , все остальные условия при этом сохранялись неизменными. Можно предполагать, что подобное понижение ТПМ устраним конвективную неустойчивость и позволит выделить возможные дополнительные причины появления мелкомасштабных структур.

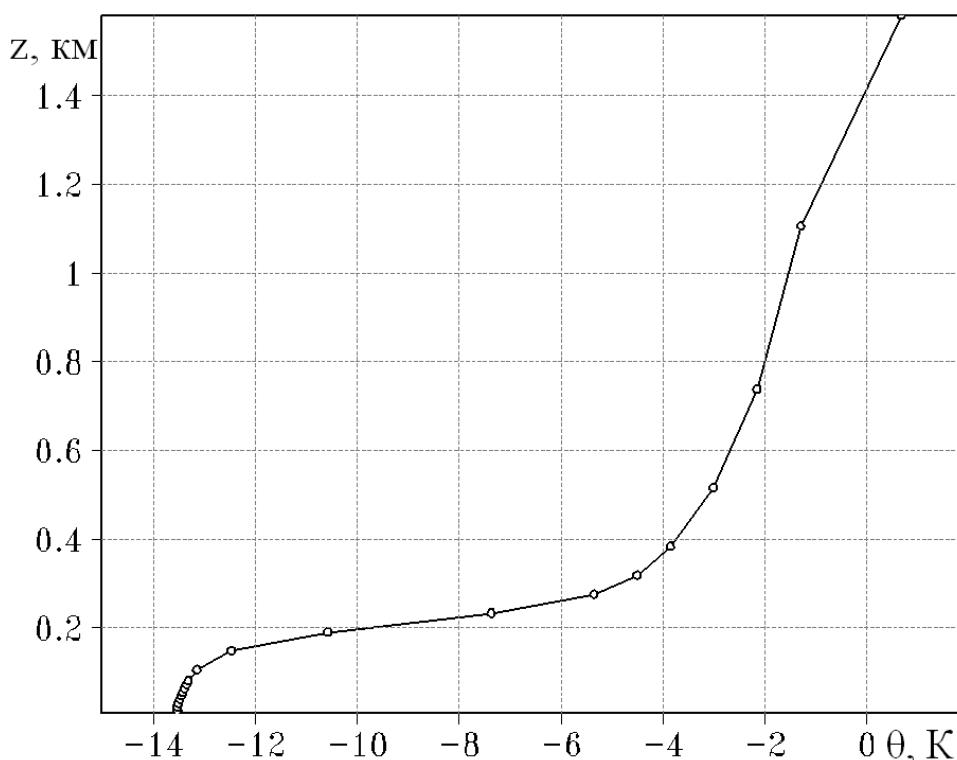
Не приводя иллюстраций, укажем, что понижение ТПМ на 5°C и затем на 10°C сократило время жизни крымского вихря (на ~ 20 и 30% соответственно), но не изменило существенно его крупномасштабную структуру. Высота, радиус и орбитальная скорость вихря в обоих экспериментах изменились незначительно. Высота пограничного слоя, как и следовало ожидать, существенно уменьшилась. На рис. 4 показан профиль потенциальной температуры при понижении ТПМ на 10°C . По существу, планетарный пограничный слой, в контрольном прогоне имеющий высоту $\sim 0,8 - 1$ км, выродился в тонкий квазиоднородный слой трения высотой $\sim 50 - 100$ м, выше которого сформировался устойчиво стратифицированный запирающий слой (толщиной ~ 400 м), переходящий в свободную атмосферу. Потоки явного тепла от поверхности отсутствуют. Очевидно, что конвекция в таком пограничном слое развиваться не может.

Динамическая неустойчивость, которая рассматривается как другая из возможных причин появления валиков [5], также не развивалась, причем как в контрольном прогоне, так и в численных экспериментах: необходимое условие для развития такого типа неустойчивости – наличие точек перегиба в вертикальных профилях горизонтальных компонент скорости фонового потока [11] – не выполнялось.

На рис. 5 показаны результаты численного эксперимента с понижением ТПМ на 10°C . Как и в контрольном прогоне (рис. 1), над морем присутствуют мелкомасштабные структуры в виде вытянутых ячеек (правая часть рис. 5), кроме того, в левой части выделяются узкие протяженные структуры (сходные с конвективными валиками на рис. 1), закручивающиеся по спирали к центральной области вихря.

Рассмотрим две вероятные причины сохранения валиковых структур. Прежде всего, их развитие может быть обусловлено положительными значениями показателя Окубо – Вейса для фонового поля ветра. На рис. 6 показано распределение сглаженных и осредненных значений W . Сглаживание было проведено по пространству по 121 точке, осреднение – по времени за 2 ч. Как видно, в правой части рис. 6 величины W положительны и составляют $\sim 10^{-7}\text{c}^{-2}$. Этого достаточно для того, чтобы за время t , равное $\sim 2 - 3$ ч, прошедшее по-

сле отрыва крымского вихря от побережья, развились короткие циркуляционные валики, наблюдаемые в правой части рис. 5, поскольку расстояние между первоначально близкими частицами за это время увеличится примерно в $\exp(\sqrt{10^{-7}t}) \approx 10 - 30$ раз.

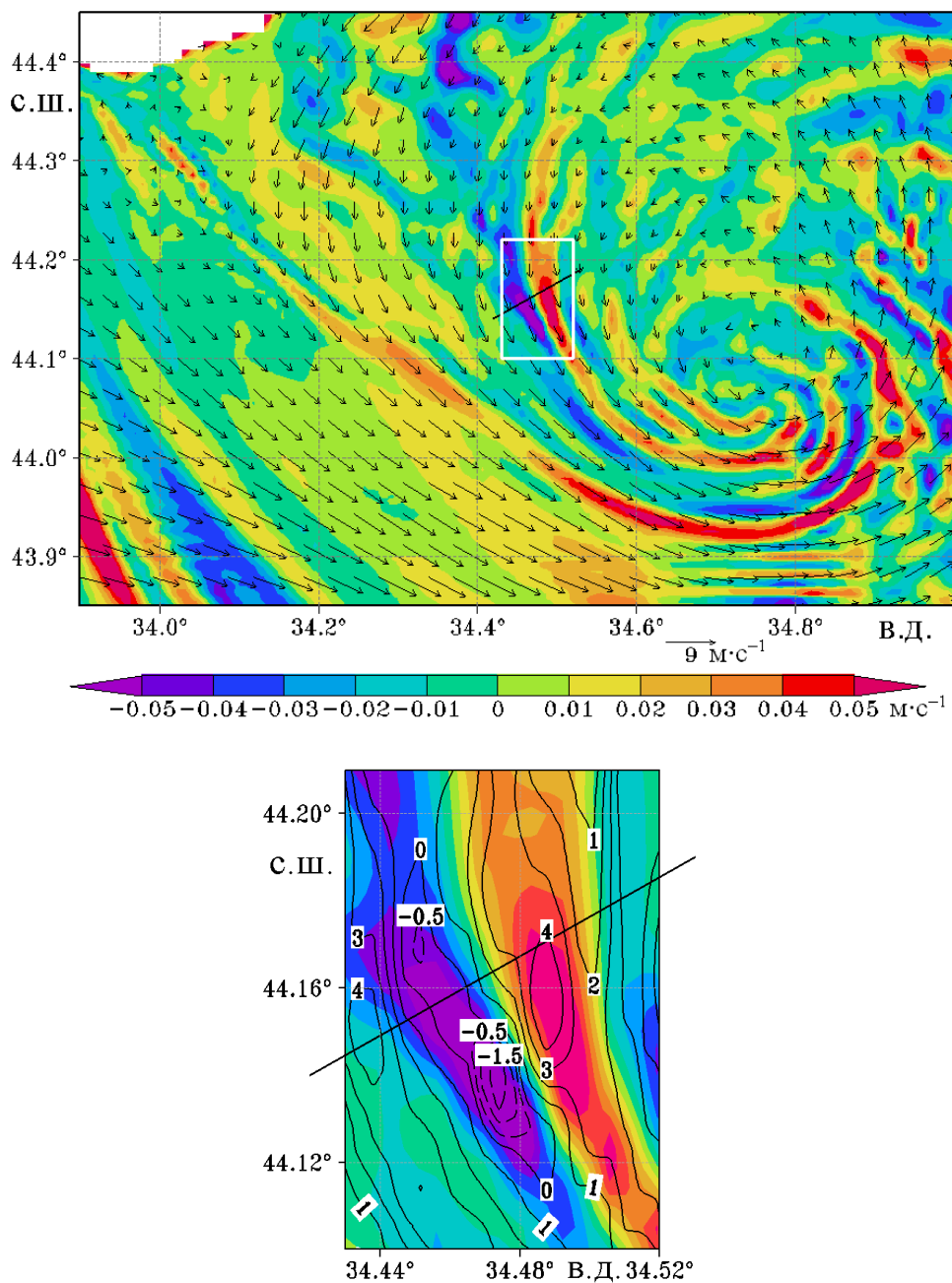


Р и с. 4. Профиль средней по области, занимаемой валиками, потенциальной температуры (К) по результатам численного эксперимента (7.00 16 августа 2007 г.)

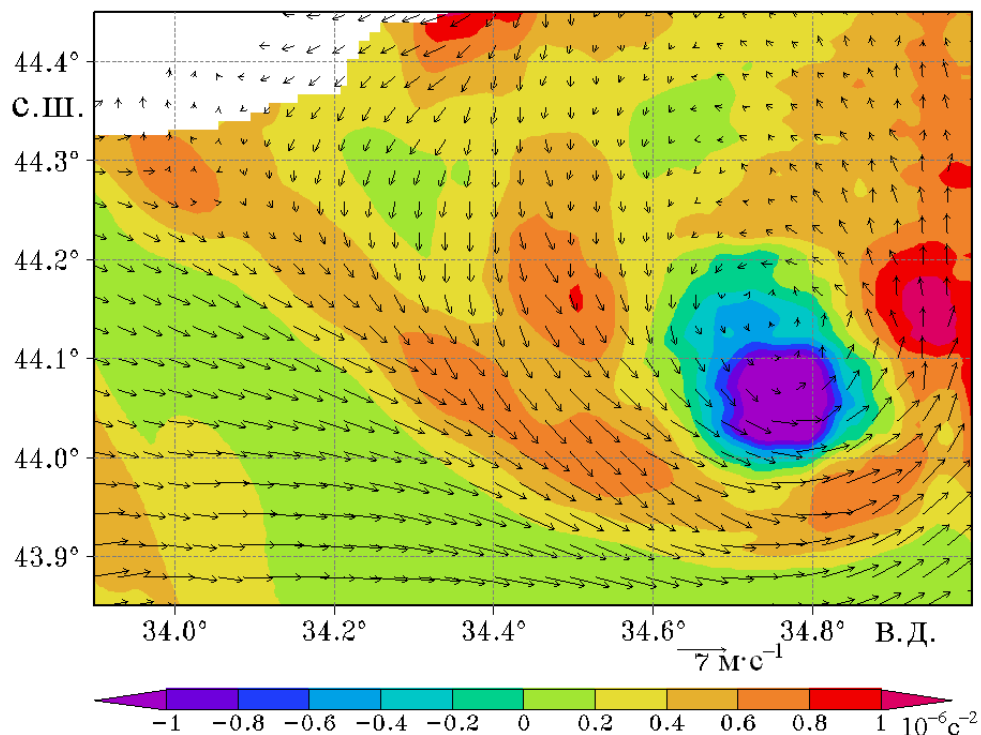
На рис. 5 обращают на себя внимание несколько протяженных спирале-видных валиков, начинающихся в прибрежной области и закручивающихся к центру вихря. На увеличенной части рис. 5 представлен фрагмент одного из таких валиков. Причиной их формирования является адвекция неоднородностей поля скорости, всегда возникающих при взаимодействии воздушного потока с берегом. Действительно, при характерных скоростях ветра $5 - 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ прибрежные неоднородности поля скорости переносятся за $2 - 3$ ч на расстояние $30 - 100$ км, что соответствует результатам моделирования.

Интересно отметить, что за время переноса такие неоднородности под действием естественной горизонтальной диффузии расширяются мало. Горизонтальная диффузия имеет скорость $\sqrt{K_h/t}$, равную $\sim 200 \text{ м}\cdot\text{ч}^{-1}$, что объясняет малое боковое расширение валика в процессе его адвекции. Вероятно, поперечному расширению протяженных валиков, показанных на рис. 5, препятствовало также и само поле скоростей деформации. Как видно из рис. 6,

в области, занятой этими валиками, $W > 0$, а это означает, что «пятна» аномалий поля пассивной примеси будут сужаться в процессе адвективного переноса.



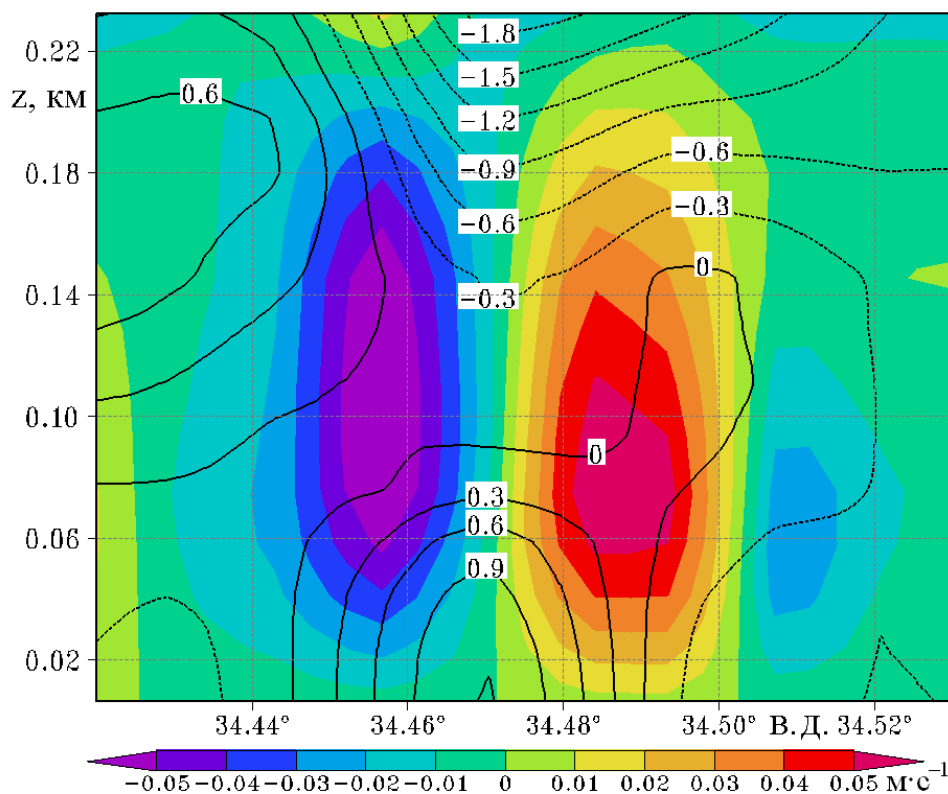
Р и с. 5. Поле вертикальной (цвет) и горизонтальной (стрелки) скорости ветра на высоте 100 м по результатам численного эксперимента (7.00 16 августа 2007 г.). Ниже основного рисунка показан увеличенный фрагмент в белой рамке, изолиниями – завихренность (10^{-4} c^{-1}) скорости ветра



Р и с. 6. Поля скорости ветра (стрелки) и критерия Окубо – Вейса (10^{-6} с^{-2}) (цвет) вблизи поверхности по результатам численного эксперимента. Поле критерия Окубо – Вейса сглажено по 121 точке и осреднено по времени за 2 ч (6.00 и 7.00 16 августа 2007 г.)

Вертикальное сечение выделенного на рис. 5 протяженного валика приведено на рис. 7. Как видно, он представляет собой компактный низкий вихрь, имеющий высоту ~ 200 м, ширину ~ 3000 м и циркуляционную скорость $\sim 0,05 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Заметим, что в расчетах с шагом сетки по горизонтали 300×300 м структура таких валиков изменялась мало.

Не во всех случаях возникающие вблизи берега и переносимые в открытую часть моря аномалии поля скорости формируются в виде описанных выше протяженных валиков. Иногда они представляют собой компактную область сильного подъема воздуха в квазиоднородном пограничном слое трения и обширную область слабого компенсационного опускания (левая часть рис. 1 и 5). Время жизни таких протяженных «лент» составляет несколько часов, т. е. они являются достаточно долгоживущими структурами. Эволюция атмосферных движений в основном определяется не процессами затухания за счет ньютоновского трения, а трением в экмановском пограничном слое. Время жизни квазидвумерного крымского вихря составляло 12 – 15 ч, определялось его высотой и трением в пограничном слое [2]. В численном эксперименте неоднородности поля скорости имели меньшую высоту, $\sim 150 - 200$ м, и соответственно – меньшее время жизни, $\sim 3 - 4$ ч, но этого оказалось достаточно для формирования протяженных валиков. В любом случае такие структуры представляют безусловный интерес, и их анализ в дальнейшем будет продолжен.



Р и с. 7. Разрез вертикальной скорости ветра (цвет) по результатам численного эксперимента. Изолиниями показана горизонтальная компонента скорости ветра, лежащая в плоскости разреза. Разрез обозначен черной линией на рис. 5

Заклучение

В настоящей работе были проанализированы особенности валиковой циркуляции, возникающей в численных расчетах атмосферных движений над Черным морем. Среди возможных причин появления этих структур рассмотрена конвективная и динамическая неустойчивость, а также адвективный перенос и деформация малых областей неоднородностей в поле приводного ветра. На характерном примере показано, что конвективная неустойчивость действительно играла большую роль в зарождении валиков. В то же время подавление этой неустойчивости в численном эксперименте с понижением ТПМ привело только к ослаблению валиков, но не исключило полностью их наличие. Динамическая неустойчивость, которая, согласно многочисленным исследованиям, является другой наиболее вероятной причиной возникновения циркуляционных валиков, по результатам контрольного прогона и эксперимента не была обнаружена. Показано, что появление валиковых структур также было связано как с адвекцией неоднородностей поля скорости, неизбежно возникающих в атмосфере вблизи побережья, так и с их деформацией, которая приводит к вытягиванию первоначально компактных «пятен» неоднородностей в направлении фонового ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов В.В., Барабанов В.С., Крупин А.В.* Моделирование мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в Крымском регионе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 1. – С. 64 – 74.
2. *Ефимов В.В., Яровая Д.А.* Численное моделирование квазидвумерных вихрей в атмосфере над Черным морем // Изв. РАН. ФАО. – 2013. – 49, № 2. – С. 1 – 17.
3. *Яровая Д.А., Шокуров М.В.* Мезомасштабные циклонические вихри, возникающие над Черным морем вблизи Кавказского побережья // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 3. – С. 3 – 20.
4. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А., Hein D.* Статистика мезомасштабных циклонических вихрей над Черным морем // Там же. – 2009. – № 4. – С. 19 – 33.
5. *Etiling D., Brawn R.A.* Roll vortices in the planetary boundary layer: a review // Bound. Lay. Met. – 1993. – 65. – P. 215 – 248.
6. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al.* A description of the advanced research WRF version 3. – http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.
7. *Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J.* A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes // Mon. Wea. Rev. – 2006. – 134, № 9. – P. 2318 – 2341.
8. *Гетлинг А.В.* Конвекция Рэлея – Бенара. Структуры и динамика. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 248 с.
9. *Okubo A.* Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergence // Deep-Sea Res. – 1970. – 17, № 3. – P. 445 – 454.
10. *Weiss J.* The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics // Physica D. – 1991. – 48. – P. 273 – 294.
11. *Kundu P.K., Cohen I.M.* Fluid Mechanics, Second Edition. – San Diego: Academic Press, 2002. – 755 p.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: vao@alpha.mhi.iuf.net

Материал поступил
в редакцию 20.02.12
После доработки 27.02.12

АНОТАЦІЯ Розглядаються можливі причини виникнення вузьких протяжних валиків, які спостерігаються в результатах чисельного моделювання мезомасштабних вихорів над Чорним морем. У якості характерного прикладу розглянута дрібномасштабна структура вихору, який сформувався поблизу Криму 15 серпня 2007 р. Визначені властивості валиків, зазначені механізми їх появи: конвективна нестійкість Релея – Бенара, динамічна нестійкість, а також адвекція у фоновому потоці локальних неоднорідностей поля швидкості, пов'язаних з позитивними значеннями критерію Окубо – Вейса.

Ключові слова: валикова циркуляція, регіональне чисельне моделювання.

ABSTRACT Possible mechanisms of origin of extended horizontal rolls observed in the results of numerical modeling of meso-scale vortexes over the Black Sea are studied. In particular, small-scale structure of the vortex that formed near the Crimea on August 15, 2007 is considered as a typical example of such rolls. The roll features are defined, and the mechanisms of their origin, such as the Rayleigh-Benard convective instability, dynamic instability, advection of wind field anomalies, and wind field anomalies deformation related to positive values of the Okubo-Weiss criterion, are studied.

Keywords: roll circulation, regional numerical modeling.