

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
ОДЕССКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**МЕТЕОРОЛОГИЯ,  
КЛИМАТОЛОГИЯ  
И ГИДРОЛОГИЯ**

**Межведомственный научный сборник Украины**

**Основан в 1965 г.**

**ВЫПУСК 38**

Одесса  
"АстроПринт"  
1999

УДК 551.515.1

Хохлов В.Н., к.г.н., доц.

Одесский гидрометеорологический институт

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БЮДЖЕТ АНТИЦИКЛОНОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭВОЛЮЦИИ.

В рамках энергетического подхода проведен анализ эволюции антициклонов и исследована их энергетика.

Используя энергетические характеристики для анализа эволюции вихрей синоптического масштаба, можно получить результаты, которые в дополнение к обычно используемым для этих целей составляющим уравнения вихря скорости и адвекции температуры позволят существенно расширить представление о динамике вихрей. В данной работе энергетический подход используется для анализа эволюции двух антициклонов. Попутно заметим, что энергетика антициклонов, в отличие от циклонов, ранее практически не исследовалась, за исключением, пожалуй, работы [1]. Указанные два барических образования были выбраны для рассмотрения потому, что находясь приблизительно в одном и том же районе (Северная Атлантика), один из них с большой скоростью в последующем перемещался на юго-восток, а второй - превратился в стационарный. В табл.1 представлены данные о максимальном давлении и местоположении центров этих вихрей, а также высота, до которой они прослеживались в тропосфере.

**Табл.1.** Максимальное давление в центре ( $P_{\text{макс}}$ , гПа), координаты центра  $\varphi$ ,  $\lambda$  (град.)<sup>\*)</sup> и поверхность, до которой прослеживались антициклоны ( $H_{\text{макс}}$ , гПа), 20-25 октября 1993 г.

Дата	Стационарный антициклон				Северо-западный антициклон			
	$P_{\text{макс}}$	Координаты		$H_{\text{макс}}$	$P_{\text{макс}}$	Координаты		$H_{\text{макс}}$
		$\varphi$	$\lambda$			$\varphi$	$\lambda$	
20	1035	57.5	-20	850	1035	75	-32.5	925
21	1034	50	-15	700	1036	57.5	-10	850
22	1035	57.5	-5	700	1039	62.5	20	850
23	1036	55	-10	700	1042	60	40	700
24	1039	55	-10	300	1039	50	50	850
25	1040	55	-7.5	300	1043	45	60	700

<sup>\*)</sup>Отрицательные значения  $\lambda$  соответствуют западной долготе, положительные - восточной.

Как видно (табл.1), 21.10.1993 г. антициклоны находились близко друг от.

друга и представляли собой, судя по значениям давления в центре и максимальной высоте распространения по вертикали, практически идентичные барические образования. Для того, чтобы выяснить, что же привело к столь различному их поведению в будущем, воспользуемся расчетом составляющих уравнения бюджета кинетической энергии. Дополнительно привлечем также уравнение для доступной потенциальной энергии. При таком подходе трудно проследить всю цепочку перехода доступной потенциальной энергии в кинетическую (здесь не рассматриваются вихревые доступная потенциальная и кинетическая энергии), поэтому проанализируем начальное и конечное звенья этой цепи. Уравнения для рассматриваемых здесь видов энергии в  $p$ -системе координат можно записать, согласно [2] и [3], в виде:

$$\int \frac{\partial k}{\partial t} = -\int \nabla \bar{V} \bar{k} - \int \frac{\partial \tau k}{\partial p} - \int \bar{V} \nabla \Phi + \int D, \quad (1)$$

$$\int A = \frac{C_p}{2} \int \left[ \gamma_a (\gamma_a - \gamma)^{-1} (\bar{T})^{-1} (T')^2 \right], \quad (2)$$

где  $\int F = \frac{1}{gS} \int \int F dp ds$  (здесь  $F$  - любая функция);  $g$  - ускорение свободного падения;  $S$  - площадь, занятая вихрем;  $k = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$  - кинетическая энергия;  $t$  - время;  $\bar{V}$  - горизонтальный вектор скорости ветра;  $\tau$  - аналог вертикальной скорости;  $p$  - давление;  $\Phi = gz$  - геопотенциал;  $D$  - диссипация кинетической энергии;  $A$  - доступная потенциальная энергия;  $C_p$  - удельная теплоемкость при  $p = \text{const}$ ;  $\gamma_a$  и  $\gamma$  - сухоадиабатический и вертикальный температурный градиенты;  $T$  - температура; символ  $\bar{\quad}$  означает осреднение по площади, занятой вихрем;  $'$  - отклонение от средней величины.

В уравнении (1) член слева - есть локальное изменение кинетической энергии со временем; первые два справа - дивергенция горизонтального и вертикального потоков энергии соответственно; третий член - генерация кинетической энергии за счет работы силы барического градиента. При последующем анализе будут рассматриваться только сами запасы кинетической и доступной потенциальной энергии, а также первый и третий члены справа в уравнении (1), поскольку роль второго члена мала, а расчет диссипации сопряжен с большими погрешностями [4].

При расчетах использовали данные объективного анализа Гидрометцентра России за 20-25 октября 1993 г.; горизонтальное разрешение сетки -  $2.5^\circ$ . Аппрок-

симация производных в (1) производилась по схеме Шумана [5], а интегрирование - по формуле трапеций. Область интегрирования выбиралась таким образом, чтобы ее центр совпадал с центрами антициклонов в конкретный момент времени, а ее размеры соответствовали размерам вихрей. По мере перемещения барических образований область интегрирования смещалась вместе с ними.

Как показывает анализ табл.1, антициклон, который смещался на юго-восток (будем называть его северо-западным), на протяжении всего рассматриваемого периода прослеживался только лишь в средней тропосфере (~700 гПа). Второй антициклон (стационарный) с 20 по 23 октября находился также в этом слое атмосферы, а затем его вертикальные размеры существенно увеличились. Это позволяет для последующего анализа разбить тропосферу на два, приблизительно одинаковых по массе, слоя: земля-700 гПа, где вихри прослеживаются на протяжении всего периода, и слой 700-300 гПа, расположенный, в основном, над антициклонами. Таким образом, в нижнем слое можно будет проследить процессы, происходящие в самих барических образованиях, а в верхнем - над ними. Кроме того, верхний слой можно рассматривать как слой ведущего потока [6].

Перейдем теперь к анализу полученных результатов (рис.1 и 2). Прежде всего следует отметить, что проведенное разделение тропосферы на два слоя для анализа антициклонов оказалось правомочным, так как в них (слоях) временной ход энергетических характеристик существенно отличается друг от друга. Так, запасы кинетической энергии в северо-западном антициклоне в слое земля-700 гПа непрерывно увеличивались с 20 по 23 октября (от  $0.64$  до  $4.14 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>), в то время, как в стационарном они оставались практически постоянными ( $\sim 1.0 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>) (рис.1а). В слое же 700-300 гПа (рис.2а) для обоих антициклонов не отмечалось резких изменений со временем величин запасов кинетической энергии, а сами эти величины были примерно одинаковыми ( $\sim 8.5 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>), причем в период с 22 по 23 октября, то есть когда северо-западный антициклон начал активно смещаться на юго-восток, превышение запасов кинетической энергии в нем было не очень большим. Итак, можно сделать следующий вывод: над антициклонами наблюдался ведущий поток приблизительно одинаковой интенсивности, в то же время в северо-западном антициклоне по сравнению со стационарным отмечалось значительное (более чем в четыре раза) увеличение запасов кинетической энергии в нижней тропосфере, то есть в пределах самого вихря.

Рассмотрим теперь причины, которые привели к таким различиям во временном ходе кинетической энергии. В первую очередь следует отметить тот факт (рис.1б), что в слое земля-700 гПа в северо-западном антициклоне с 22 на 23 ок-

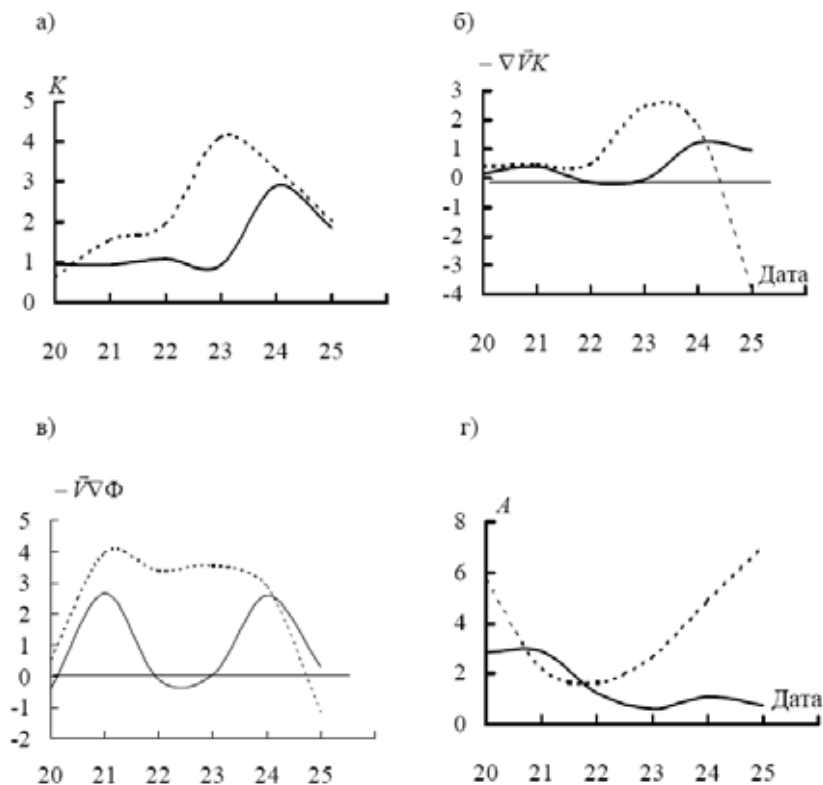


Рис.1. Временной ход кинетической энергии  $K$  ( $10^5$  Дж/м<sup>2</sup>) (а), горизонтальной дивергенции потока кинетической энергии (Вт/м<sup>2</sup>) (б), генерации кинетической энергии (Вт/м<sup>2</sup>) (в) и доступной потенциальной энергии ( $10^5$  Дж/м<sup>2</sup>) (г) в двух антициклонах (— - стационарный, - - - - - северо-западный) в слое земля-700 гПа за период 20-25.10.93 г.

тября произошло резкое (в пять раз) увеличение притока кинетической энергии через боковые границы (от  $0.48$  Вт/м<sup>2</sup> до  $2.49$  Вт/м<sup>2</sup>). В вихре, который стационарировал, аналогичные значения в период с 20 по 23 октября были близки к нулю ( $-0.14 \div 0.39$  Вт/м<sup>2</sup>). В слое 700-300 гПа (рис.26) лишь 20.10.93 г. значения  $-\nabla\bar{V}k$  для

первого вихря были существенно больше ( $1.43 \text{ Вт/м}^2$  против  $-4.54 \text{ Вт/м}^2$  в стационарном), а в других случаях были либо равны, либо, как, например, 22 октября, существенно меньше. Максимальный отток в этом слое для северо-западного антициклона отмечался в конце периода ( $-67.91 \text{ Вт/м}^2$ ), когда антициклональный вихрь начал разрушаться. Генерация кинетической энергии в слое 700-300 гПа (рис.2в) в период с 20 по 24 октября в северо-западном антициклоне в полтора-два

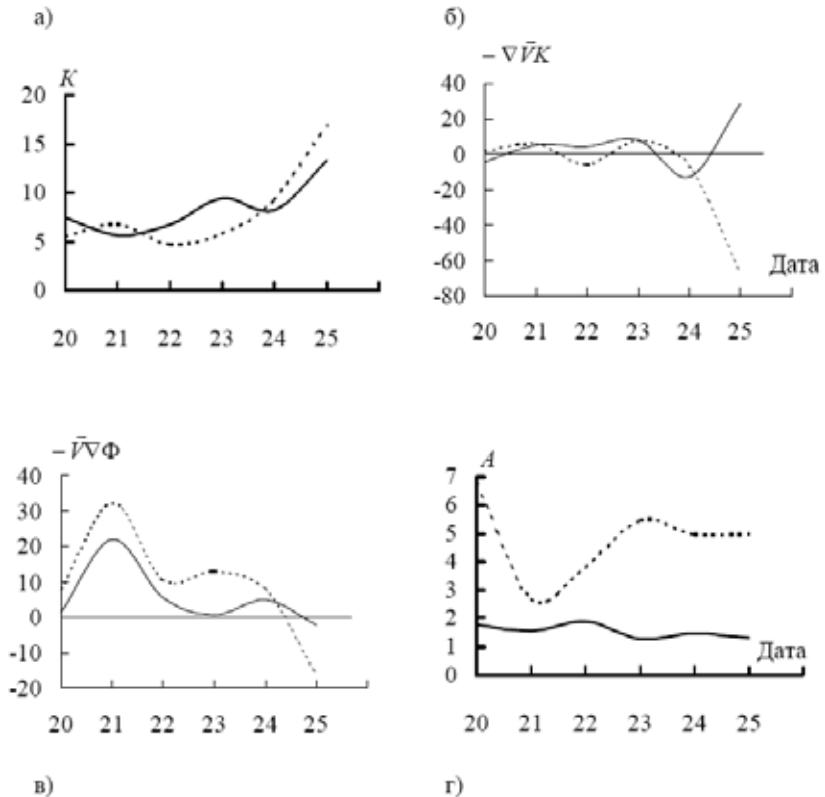


Рис.2. Временной ход кинетической энергии ( $10^5 \text{ Дж/м}^2$ ) (а), горизонтальной дивергенции потока кинетической энергии ( $\text{Вт/м}^2$ ) (б), генерации кинетической энергии ( $\text{Вт/м}^2$ ) (в) и доступной потенциальной энергии ( $10^5 \text{ Дж/м}^2$ ) (г) в двух антициклонах (— - стационарный, - - - - северо-западный) в слое 700-300 гПа за период 20-25.10.93 г.

раза больше, чем в стационарном. В нижнем слое тропосферы (рис. 1в) для северо-западного вихря в период с 20 по 24 октября отмечаются положительные значения величины генерации, тогда как для стационарного 22 и 23 октября они отрицательны и близки к нулю.

Итак, можно сделать следующий вывод: наибольшие отличия в механизмах изменения кинетической энергии за счет горизонтальной адвекции ( $-\nabla \vec{V} \vec{k}$ ) и ее генерации ( $-\vec{V} \nabla \Phi$ ) отмечаются в нижнем слое тропосферы, то есть в самих вихрях, в то время как в слое 700-300 гПа они для обоих вихрей приблизительно одинаковы. Кроме того, с помощью такого анализа можно выделить и период, в котором эти различия становятся наиболее существенными. В данном случае - это 22-23 октября когда северо-западный антициклон смещался с большой скоростью в юго-восточном направлении.

Что касается доступной потенциальной энергии (рис. 1г и 2г), то распределение со временем в северо-западном антициклоне во всей тропосфере характеризуется резким (более чем в два раза) уменьшением ее запасов в первые сутки рассматриваемого периода, что вызвано интенсивным преобразованием потенциальной энергии в кинетическую непосредственно перед тем, как этот вихрь начал свое перемещение. После 21 октября для этого антициклона отмечается медленное увеличение запасов доступной потенциальной энергии. Для стационарного антициклона доступная потенциальная энергия во всей тропосфере, как правило, значительно меньше, чем в северо-западном, и ее временной ход характеризуется медленным уменьшением (например, для слоя 700-300 гПа от  $1.76 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup> 20 октября до  $1.30 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup> 25 октября).

Итак, в качестве основных причин, приведших к стационарированию одного антициклона и перемещению другого, можно выделить следующие.

- запасы кинетической энергии в северо-западном антициклоне в слое земля-700 гПа в период с 21 по 23 октября были существенно больше, чем в стационарном. Аналогичной зависимости в слое 700-300 гПа не наблюдается.
- с 22 по 24 октября в слое земля-700 гПа для северо-западного антициклона отмечался активный приток кинетической энергии через боковые границы, в то время как для другого вихря он был близок к нулю.
- во всей тропосфере 22 и 23 октября для северо-западного антициклона отмечались положительные значения генерации кинетической энергии. Аналогичные значения для стационарного антициклона наблюдались лишь в слое 700-300 гПа.
- к перемещению антициклонического вихря привело активное преобразова-

ние доступной потенциальной энергии в кинетическую в начальной стадии его эволюции.

Итак, основной вывод данной работы заключается в том, что различие в эволюции двух антициклональных вихрей обусловлено, прежде всего, различиями в механизмах преобразования энергии в самих вихрях.

Литература.

1. Капитанова Т.П. Некоторые особенности структуры блокирующего антициклона // Труды ЦАО. - 1991. - Вып.178. - С. 102-112.
2. Хохлов В.Н. Особенности распределения кинетической энергии и влагосодержания в южных циклонах // Метеорология, климатология и гидрология. - 1997. - Вып. 34. - С. 13-20
3. Kung E.C., Tsui T.L. Subsynoptic scale kinetic energy balance in the storm area // J. Atmos. Sci. - 1975. - Vol. 32. - No. 4. - P. 729-740.
4. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы: Пер. с англ. - Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 259 с.
5. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. - Л.: Гидрометеоиздат, 1989. - 376 с.
6. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. - Л.: Гидрометеоиздат, 1977.-711 с.

## ENERGY BUDGET OF ANTICYCLONES DURING THEIR EVOLUTION

**Khokhlov V.N.**

**Summary:** Within the energy approach there have been given an analysis of the anticyclones evolution and studied their energetics.