

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ МЕТЕОРОЛОГІЇ ТА КЛІМАТОЛОГІЇ

УДК 551.515

Недострелова Л. В.

Одеський державний екологічний університет

СТАТИСТИЧНА СТРУКТУРА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В АТМОСФЕРІ ПІД ЧАС ЇЇ БЛОКУВАННЯ

Ключові слова: блокуючі антициклони, енергетичні перетворення, статистичні характеристики

Постановка проблеми. Відомо, що багато аномальних явищ, такі як посухи, тривалі дощі і снігопади, сильні похолодання, весняні повернення холодів, пов'язані з процесами блокування. Тому діагноз і кількісна параметризація блокуючих ситуацій представляють великий інтерес в області їх вивчення і прогнозування. Не дивлячись на велику кількість робіт, присвячених експериментальному дослідженню блокування, кінцеві результати в оцінці характеристик блокуючих ситуацій у різних авторів виходять з великим розкидом [1]. В статті використовується енергетичний підхід для дослідження еволюції блокуючої ситуації. Енергетика вихорів синоптичного масштабу розглядається тривалий час, але енергетичні характеристики блокуючих антициклонів вивчені ще недостатньо. Отже, в роботі приділяється увага дослідженню статистичних характеристик перетворень енергії під час блокуючих антициклонів.

Матеріали та методи дослідження. У наукових працях, присвячених енергетиці атмосфери, повна потенціальна енергія розділяється на доступну та недоступну частини [2, 3]. Згідно з Лоренцем [3], недоступною енергією (НПЕ) вважається повна потенціальна енергія (ППЕ) відповідного еталонного стану, а доступна енергія (ДПЕ) визначається як перевищення повної потенціальної енергії над недоступною. Перетворення повної потенціальної енергії у КЕ є еквівалентом перетворення доступної потенціальної енергії у КЕ. По суті, доступна потенціальна енергія є мірою частини повної потенціальної енергії, здатної перетворитися у кінетичну енергію. Звідси й виник термін «доступна потенціальна енергія». Генерація ДПЕ за рахунок припливу тепла, перетворення ДПЕ у КЕ у випадку оборотних адіабатичних процесів і

дисипація КЕ за рахунок тертя можуть розглядатися як три складові основного енергетичного циклу загальної циркуляції атмосфери. Лоренц запропонував розглядати енергетичний цикл в атмосфері між середньої кінетичною, середньою доступною потенціальною, вихровою кінетичною та вихровою доступною потенціальною енергіями. Міхалідес же вивів рівняння для відкритої системи, якою є циклони та антициклони помірних широт [4].

Вплив блокуючого антициклону на енергетичні характеристики загальної циркуляції атмосфери вперше дослідили Кунг і Бейкер [5]. Вони показали, що взимку, коли блокуючий антициклон охоплює велику територію у Північній півкулі, під час процесу блокування кінетична енергія передається по спектру від хвильових чисел $n = 3 \div 10$ до $n = 1 \div 2$, що й є причиною виникнення та розвитку антициклону. Запаси кінетичної енергії на $n = 3 \div 10$ підтримуються інтенсивним барокліним перетворенням з доступної потенціальної енергії. Влітку, коли розміри антициклону були не такими великими, як взимку, процес блокування існував за рахунок передавання кінетичної енергії до хвильового числа $n = 4$ та її підживлення за рахунок барокліного перетворення в усьому спектрі хвильових рухів. Одним з головних недоліків схеми, використаної Кунгом та Бейкером, є те, що вона може бути застосована тільки для всієї атмосфери. Наприклад, для хвильового числа $n = 4$ одержані енергетичні характеристики стосуються усіх гребенів та улоговин, але тільки один гребінь може розглядатися як блокуючий процес. Цікавим продовженням їх роботи є дослідження, виконане Фурньє [6] за допомогою вейвлет-перетворення. Це дозволило йому виявити не тільки передавання вихрової кінетичної енергії від

вихорів меншого масштабу до великомасштабного блокуючого гребеня, тобто вгору по спектру рухів, але й зворотній процес – підживлення окремих енергією вихорів синоптичного масштабу за рахунок малорухомого, великого за розмірами антициклону. Ватараї та Танака [7] виконали аналіз енергетики для великої кількості випадків блокуючих процесів за формулюванням, що ґрунтується на поняттях середнього та зсувного потоків. Хохлов [8] виявив, що на початкових стадіях розвитку в рухливих антициклонах відзначаються істотні перетворення доступної потенціальної енергії у кінетичну разом з припливом останньої через бокові межі вихору. Для стаціонарних антициклонів ці процеси мають місце тільки у верхній атмосфері, тобто над атмосферним вихором. Саме це й є причиною того, що одні області підвищеного тиску у подальшому розвиваються у блокуючі процеси, а інші залишаються звичайними синоптичними утвореннями. Кей та ін. [9] аналізували різницю в енергетичних характеристиках між низькочастотними та високочастотними вихорами. З першими, певною мірою, можна асоціювати блокуючі антициклони, а з другими – звичайні вихори синоптичного масштабу. Автори цієї роботи показали, що з енергетичної точки зору низькочастотні вихори, які розташовуються поблизу вісі струменевої течії, є майже ідентичними високочастотним – вони також еволюціонують за рахунок бароклінності через перенесення тепла в напрямку полюсу та перетворення вихрової доступної потенціальної енергії у вихрову кінетичну. Якщо ж розглядати перетворення середньої кінетичної енергії у вихрову кінетичну, то існує невелика, але істотна відмінність. Зокрема, низькочастотні вихори підживлюються енергією на боці струменевої течії з циклонічним зсувом, а високочастотні – набагато північніше від цієї зони. Також, на боці струменевої течії з антициклонічним зсувом низькочастотні вихори дістають енергію, а високочастотні – втрачають [9]. Пецца та ін. [10] досліджували енергетику атмосфери для пари «інтенсивний циклон – блокуючий антициклон» над Аляскою і виявили, що саме зона підвищеного тиску відіграє

ключову роль безпосередньо перед виникненням циклону, коли має місце істотне бароклінне перенесення енергії від антициклону до його оточення. Треба відзначити, що ця робота є, найвірогідніше, першою, в якій визначається вплив антициклону на сусідній циклонічний вихор.

Для чисельного інтегрування перетворень енергії використовуємо об'єм атмосфери, обмежений меридіанами λ_1 і λ_2 , широтними колами φ_1 і φ_2 та ізобаричними поверхнями p_1 і p_2 , де $p_1 < p_2$ [11]. Для опису енергетики використовуються наступні енергетичні характеристики: середньозональна доступна потенціальна енергія P_Z , вихрова доступна потенціальна енергія P_E , середньозональна кінетична енергія K_Z , вихрова кінетична енергія K_E , а також перетворення цих енергій $(K_Z - K_E)$, $(P_Z - P_E)$, $(P_Z - K_Z)$, $(P_E - K_E)$. Перетворення між P_Z і K_Z відбуваються через середню меридіональну циркуляцію, спричинену неоднорідністю поля температури. Цей процес ідентифікується як взаємодія теплого повітря, що підіймається у низьких широтах, та холодного повітря, що опускається у високих. Перетворення між P_Z і K_Z здійснюється внаслідок тих циркуляцій, які взаємодіють у меридіональному напрямку. В атмосферних збуреннях це досягається, коли тепле повітря підіймається, а холодне – опускається, на тій же самій широті. Ця частина вихрового перетворення ДПЕ у КЕ розглядається як міра циклогенезу. Одне з суперечливих питань, яке виникає при розрахунку перетворень енергії для обмеженої території, полягає у можливості застосування деяких неявних припущень, зроблених в оригінальних визначеннях для глобального масштабу. Наприклад, у великій розрахунковій області можна припустити, що осереднений на ізобаричній поверхні аналог вертикальної швидкості τ дорівнює нулю. Внаслідок цього припущення можна одержати вирази для перетворення ДПЕ у КЕ, а саме $(P_Z - K_Z)$ і $(P_E - K_E)$, в яких відсутня ізобарична вертикальна швидкість. Маючи на увазі викладене вище, математичні вирази для перетворень $(P_Z - K_Z)$ і $(P_E - K_E)$ записуються у вигляді:

$$\langle P_Z - K_Z \rangle = - \int_{p_1}^{p_2} [([T]_\lambda)_\varphi ([\tau]_\lambda)_\varphi]_{\lambda\varphi} \frac{R}{gp} dp, \quad (1)$$

$$\langle P_E - K_E \rangle = - \int_{p_1}^{p_2} [(T)_\lambda (\tau)_\lambda]_{\lambda\varphi} \frac{R}{gp} dp. \quad (2)$$

Вихровий перенос відчутного тепла є процесом, що відповідає за перетворення між формами ДПЕ: $(P_Z - P_E)$. Він спричиняється через кореляцію між меридіональною компонентою швидкості та збуреннями зональної температури, що мають місце у меридіональному градієнті

$$\langle P_Z - P_E \rangle = - \int_{p_1}^{p_2} \left[\left[\frac{(T)_\lambda (v)_\lambda}{a[\sigma]_{\lambda\varphi}} \frac{\partial ([T]_\lambda)_\varphi}{\partial \varphi} \right]_{\lambda\varphi} + \left[\frac{(T)_\lambda (\tau)_\lambda}{p^{R/c_p}} \frac{\partial \left\{ \frac{([T]_\lambda)_\varphi p^{R/c_p}}{[\sigma]_{\lambda\varphi}} \right\}}{\partial p} \right]_{\lambda\varphi} \right] dp. \quad (3)$$

Нарешті, перетворення між формами КЕ спричиняється вихровим переносом кількості руху. Перетворення $(K_Z - K_E)$ спричиняється збуреннями, головним чином, у верхній тропосфері біля рівня струменевої течії. K_Z передається до або з вихорів, коли вихрові компоненти вітру зкорельовані та розташовані у градієнті швидкості зонального вітру. Перехід з K_Z у K_E передбачає баротропну підтримку зональних західних вітрів та струменевої течії, незважаючи на внутрішні втрати внаслідок турбулентної дисипації. Зворотне

температури. Зокрема це відбувається, коли збурення розташовані у меридіональному градієнті з теплим повітрям, що переноситься до полюсу, і холодним – до екватора. Перетворення між формами ДПЕ задається, як:

перетворення, а саме з K_E у K_Z в середніх широтах є, імовірно, рідкісним явищем, пов'язаним з так званою баротропною нестійкістю, коли відносно зональний потік з меридіональним зсувом раптом розділяється на серію хвиль з великою амплітудою. Баротропна нестійкість уявляється важливою у середніх широтах для початкового зростання хвиль, коли зональний потік є інтенсивним та існує значний широтний зсув вітру. Вираз для члена баротропного перетворення $(K_Z - K_E)$ має вигляд:

$$\begin{aligned} \langle K_Z - K_E \rangle = & - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[(u)_\lambda (v)_\lambda \frac{\cos \varphi}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{[u]_\lambda}{\cos \varphi} \right) \right]_{\lambda\varphi} dp - \\ & - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[\frac{(v)_\lambda^2}{a} \frac{\partial [v]_\lambda}{\partial \varphi} \right]_{\lambda\varphi} dp - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[\frac{\tan \varphi}{a} (u)_\lambda^2 [v]_\lambda \right]_{\lambda\varphi} dp - \\ & - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[(u)_\lambda (\tau)_\lambda \frac{\partial [u]_\lambda}{\partial p} \right]_{\lambda\varphi} dp - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[(v)_\lambda (\tau)_\lambda \frac{\partial [v]_\lambda}{\partial p} \right]_{\lambda\varphi} dp. \end{aligned} \quad (4)$$

Результати дослідження та їх аналіз. За наведеними формулами (1-4) було проведено розрахунки енергетичних перетворень в атмосфері при формуванні в ній блокуючих ситуацій. Як вихідні у цьому дослідженні використовувалися дані про метеорологічні величини у вузлах регулярної широтно-довготної сітки на ізобаричних поверхнях від АТ₁₀₀₀ до АТ₁₀₀

для області, яка в горизонтальній площині обмежена 40° і 70° півн.ш. та 0° і 70° сх.д. Ці дані отримані з сервера NCEP-NCAR, їх горизонтальне розділення становить 2,5° по широті та довготі. Через те, що вони використовуються для вивчення процесів синоптичного масштабу, їх репрезентативність може вважатися цілком задовільною. Метеорологічні величини, що

використовуються у дослідженнях, це зональна та меридіональна складові вектора швидкості вітру u і v , аналог вертикальної швидкості в ізобаричній системі координат τ та температури повітря T . Період дослідження складає 11 років – з 1 січня 1998 по 31 грудня 2008 року. Розрахунки проводилися по 119 випадках блокування, які були виявлені за період дослідження над територією Європи. Усі блокуючі ситуації було класифіковано на три категорії: безпосередньо блокуючий антициклон (I), гребінь з циклонічним

зсувом вітру, вісь якого має напрямок з південного сходу на північний захід (II) та гребінь з антициклонічним зсувом вітру, який має орієнтацію з південного заходу на північний схід (III). Наступним кроком було формування отриманих результатів у часові ряди та отримання по ним деяких статистичних параметрів: максимальне (X_{max}), мінімальне (X_{min}), середнє арифметичне ($\bar{X}$) значення та дисперсія (S_x^2). Отримані результати представлено в таблиці.

Таблиця – Статистичні параметри перетворень різних видів енергії (Вт/м²) у блокуючих процесах

Енергетичні характеристики	Статистичні параметри	Категорія I (Az)	Категорія II (ПдС)	Категорія III (ПдЗ)
$(K_Z - K_E)$	X_{max}	2,56	15,64	11,79
	X_{min}	-8,23	-19,27	-7,06
	$\bar{X}$	-2,23	2,84	3,49
	S_x^2	3,8	8,82	4,04
$(P_Z - P_E)$	X_{max}	0,62	1,48	1,61
	X_{min}	-0,60	-0,92	-0,48
	$\bar{X}$	-0,02	0,27	0,21
	S_x^2	0,12	0,17	0,18
$(P_Z - K_Z)$	X_{max}	3,45	11,17	6,72
	X_{min}	-3,87	-2,78	-2,37
	$\bar{X}$	-0,82	3,14	2,43
	S_x^2	3,46	4,37	1,85
$(P_E - K_E)$	X_{max}	0,71	3,64	2,41
	X_{min}	-1,65	-1,83	-1,42
	$\bar{X}$	-0,14	0,64	0,41
	S_x^2	0,20	0,50	0,31

З таблиці видно, що найбільші екстремальні значення всіх перетворень енергії мають місце у процесах II і III категорії. Це свідчить про істотне баротропне перетворення різних видів енергії. Велике значення дисперсії мають перетворення $(K_Z - K_E)$. Барокліні перетворення $(P_E - K_E)$ мають найбільші значення (3,64 Вт/м² і 2,41 Вт/м²) також у гребенях II і III категорій відповідно. Перетворення $(K_Z - K_E)$ збільшується і має додатні значення при появі в області дослідження циклону біля землі, поглибленні висотного циклону, пониженні тиску в висотному антициклоні. Перехід $(K_Z - K_E)$ зменшується при заповненні приземного циклону (додатні значення перетворення), перебудові висотного баричного поля, на максимальній стадії розвитку блокуючого процесу і посиленні висотного антициклону (від'ємні значення

перетворення). Перетворення $(P_Z - P_E)$ збільшується і має додатні значення при висотній адвекції холоду або тепла, наявності холодного фронту, посиленні і збільшенні горизонтальної протяжності приземного антициклону, утворенні висотного антициклону, збільшенні меридіональних градієнтів температури. Перетворення $(P_Z - P_E)$ зменшується при посиленні фронтальної діяльності, збільшенні контрасту температури, наявності теплового сектору (додатні значення перетворення), перебудові висотного баричного поля, послабленні антициклону біля землі (від'ємні значення). Перехід $(P_Z - K_Z)$ збільшується і має додатні значення при появі в області дослідження приземного циклону, посиленні антициклону біля землі, збільшенні контрасту температур біля землі і на мапах абсолютної топографії, наявності фронтів.

Перетворення ($P_z - K_z$) зменшується і має від'ємні значення при посиленні висотного антициклону, перебудові висотного баричного поля, на максимальній стадії розвитку антициклону біля землі. Перетворення ($P_E - K_E$) збільшується і має додатні значення при на початковій стадії розвитку і на стадії руйнування антициклону біля землі, утворенні висотних гребеня та улоговини, утворенні висотних антициклону і циклону, перебудові висотного баричного поля, посиленні антициклону біля землі, на початковій стадії утворення висотного циклону. Перехід ($P_E - K_E$) зменшується і має від'ємні значення при на стадії заповнення циклону біля

землі, зменшенні тиску в приземному антициклоні.

Висновки. Під дослідженням енергетичних характеристик атмосфери взагалі та вихорів синоптичного масштабу зокрема, розуміють дослідження переносів та перетворень енергії різних форм між полями, які визначають стан атмосфери. Діагностичне дослідження, проведене у цій роботі, фокусується на комплексному характері блокуючих антициклонів. Представлене дослідження статистичних характеристик дозволяє виявити певні особливості еволюції процесу блокування та блокуючої взаємодії антициклону з його оточенням, зокрема циклонами помірних широт.

Список літератури

1. Шаповалова Н. С. Блокирующие образования в атмосфере / Н. С. Шаповалова // Труды ГМЦ СССР. – 1991. – Вып. 316. – С. 68-73.
2. Лоренц Э. Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы : Пер. с англ. / Э. Н. Лоренц. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 259 с.
3. Lorenz E.N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation / Edward N. Lorenz // Tellus. – 1955. – Vol. 7. – P. 157-167.
4. Michaelides S.C. Quasi-Lagrangian energetics of an intense Mediterranean cyclone / S. Chr. Michaelides, N. G. Prezerakos, H. A. Flocas // Quarterly J. of the Royal Meteorological Society. – 1999. – Vol. 125. – P. 139-168.
5. Kung E. C. Spectral energetics of the observed and simulated Northern Hemisphere general circulation during blocking episodes / Ernest C. Kung, Wayman E. Baker // J. of the Atmospheric Sciences. – 1986. – Vol. 43, No. 13. – P. 2792-2812.
6. Fournier A. Instantaneous wavelet energetic transfers between atmospheric blocking and local eddies / Aimé Fournier // Journal of Climate. – 2005. – Vol. 18, No. 13. – P. 2151-2171.
7. Watarai Y. Local energetics analysis of blocking formation in the North Pacific decomposed in vertical mean and sheared flows / Yasushi Watarai, H.L. Tanaka // Journal of the Meteorological Society of Japan. – 2004. – Vol. 82, No. 5. – P. 1447-1458.
8. Хохлов В. Н. Энергетический бюджет антициклонов в процессе их эволюции / В. Н. Хохлов // Метеорология, климатология и гидрология. – 1999. – Вып. 38. – С. 47-53.
9. Cai M. Dynamical implications of the orientation of atmospheric eddies: a local energetics perspective / M. Cai, S. Yang, H.M. van den Dool, V.E. Kousky // Tellus. – 2007. – Vol. 59A, No. 1. – P. 127-140.
10. Environmental energetics of an exceptional high-latitude storm / A. Bernardes Pezza, J. A. Paixão Veiga, I. Simmonds and all // Atmospheric Science Letters. – 2010. – Vol. 11, No. 1. – P. 39-45.
11. Хохлов В. М. Энергетика атмосферы: Конспект лекций / В. М. Хохлов. – Одеса : Екологія, 2008. – 62 с.

Недострелова Л. В. Статистична структура енергетичних перетворень в атмосфері під час її блокування. У статті наведено аналіз результатів дослідження перетворення енергії в атмосфері під час формування в ній блокуючих антициклонів над територією Європи. Надано статистичні характеристики переходів різних видів енергії. Для класифікації блокуючих антициклонів використано динамічний метод.

Ключові слова: блокуючі антициклони, енергетичні перетворення, статистичні характеристики.

Nedostrelova L. V. Statistical structure of the energy transformations in the atmosphere during its blocking. The article summarizes the results of the study of energy transformation in the atmosphere during the formation of it blocking anticyclones over Europe. It presents statistical characteristics of different types of energy conversions. For classification of the blocking anticyclones use a dynamic method.

Keywords: blocking anticyclones, energy conversion, statistical characteristics.

Недострелова Л. В. Статистическая структура энергетических преобразований в атмосфере во время ее блокирования. В статье приведен анализ результатов исследования преобразований энергии в атмосфере во время формирования в ней блокирующих антициклонов над территорией Европы. Представлены статистические характеристики переходов разных видов энергии. Для классификации блокирующих антициклонов использовался динамический метод.

Ключевые слова: блокирующие антициклоны, энергетические преобразования, статистические характеристики.

Надійшла до редколегії 10.11.2015