

СТАТИСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКУЮЧИХ АНТИЦИКЛОНІВ

В роботі проведено дослідження статистичної структури енергетичних характеристик атмосфери під час блокування над територією Європи за період з 1998 по 2008 роки. На сьогодні існує велика кількість робіт, що присвячені дослідженню енергетичних ресурсів циклонічних вихорів. В даній науковій статті розглянуто енергетичні запаси атмосфери під час формування та існування в ній блокуючих антициклонів. Енергетичний підхід, що використовується в роботі, дозволяє більш ретельно дослідити еволюцію таких синоптичних вихорів, як блокуючі антициклони. Метод розрахунку було запропоновано Лоренцем для глобального енергетичного циклу. Схему розрахунку для відкритих систем, якими є циклони та антициклони, вивів Міхалідес. Цей підхід було використано в даному дослідженні. В роботі розраховано енергетичні запаси середньої кінетичної, середньої доступної потенціальної, вихрової кінетичної та вихрової доступної потенціальної енергій. Для типізації блокуючих антициклонів було запропоновано метод, що враховує динамічну природу блокуючого процесу.

Ключові слова: блокуючі антициклони, енергетика атмосфери, доступна потенціальна енергія, кінетична енергія.

Л.В. Недострелова. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКИРУЮЩИХ АНТИЦИКЛОНОВ. В работе исследуется статистическая структура энергетических характеристик атмосферы в период блокирования над территорией Европы за период с 1998 по 2008 годы. На сегодня существует большое количество работ, в которых исследованы энергетические ресурсы циклонических вихрей. В данной статье рассматриваются энергетические запасы атмосферы в период формирования и существования в ней блокирующих антициклонів. Энергетический подход, который используется в работе, позволяет детальнее исследовать эволюцию таких синоптических вихрей, как блокирующие антициклоны. Метод расчета был предложен Лоренцем для глобального энергетического цикла. Схему расчета для открытых систем, которыми являются циклоны и антициклоны, вывел Михалидес. Этот подход был использован в данном исследовании. В работе рассчитаны энергетические запасы средней кинетической, средней доступной потенциальной, вихревой кинетической и вихревой доступной потенциальной энергий. Для типизации блокирующих антициклонів был предложен метод, который основан на динамической природе блокирующего процесса.

Ключевые слова: блокирующие антициклоны, энергетика атмосферы, доступная потенциальная энергия, кинетическая энергия.

Постановка проблеми. Останнім часом блокуючі процеси активно досліджуються вченими [1–8]. Але чіткого визначення блокуючої ситуації в сучасному науковому світі не існує. Можливо, це пов'язано з різними поглядами авторів на дану наукову проблему. Багато важливих аспектів самого процесу блокування ще остаточно не вивчено. Тому на сучасному етапі розвитку науки немає чіткого визначення блокування та не сформульовані необхідні і достатні умови його існування. Блокування, як великомасштабний сталий процес в атмосфері, є однією з основних причин крупних аномалій погоди, які можуть існувати в часовому масштабі від тижня до сезону. Дослідження таких процесів являє собою великий практичний інтерес для середньострокових і довгострокових прогнозів погоди, моделювання атмосферних процесів і моніторингу клімату. Отже, перед дослідниками постає задача попередження та прогнозування блокуючих процесів. Тим більше, що останнім часом кількість таких ситуацій значно збільшилася. Велика кількість робіт [9–14], в яких досліджується енергетика синоптичних вихорів, присвячена циклонічним утворенням. Застосування енергетичного підходу дозволяє докладніше дослідити еволюцію синоптичних вихорів, які, на перший погляд, здаються майже ідентичними. Енергетичні характеристики антициклонів мало досліджувались і вивчені ще недостатньо. Тому

основна увага автором роботи звернута на блокуючі антициклони та антициклональну циркуляцію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Енергетичні характеристики вихорів синоптичного масштабу аналізуються тривалий період часу. Достатньо згадати монографію Калініна [9], в якій на основі аеросиноптичного матеріалу досліджується енергетика циклонів помірних широт за період з 1984 по 1994 роки. Але тільки в останні два десятиріччя, після того як були сформовані загальнодоступні бази даних реаналізу, виникла можливість розрахунку та аналізу атмосферної енергетики синоптичного об'єкту над різними районами земної кулі за будь-який період часу. Проте треба відзначити, що переважна більшість досліджень енергетики вихорів синоптичного масштабу зосереджувалася на циклонах помірних широт. Можливо першими, хто досліджував вплив блокуючого антициклону на енергетичні характеристики загальної циркуляції атмосфери, були Кунг і Бейкер [10], які використали розкладання атмосферної енергетики у просторі зональних хвильових чисел [11]. Ватараї та Танака [12] виконали аналіз енергетики для великої кількості випадків блокуючих процесів за методикою, що ґрунтується на поняттях середнього та зсувного потоків. Система рівнянь у цьому випадку містить члени, які описують зв'язок між баротропною та барок-

лінною кінетичною енергією, а також конвергенцію потоку механічної енергії середнього руху. Такий підхід дозволив виявити дві головні відмінності, що мають місце за інтенсивного процесу блокування. По-перше, для випадків блокуючого антициклону є характерним приплив механічної енергії середнього руху до зони поблизу гребеня, що не спостерігається за відсутності блокування. По-друге, кінетична енергія середнього потоку у верхній частині атмосфери зменшується для випадків блокуючого антициклону внаслідок її перенесення у східному напрямку. Таким чином, конвергенція потоку механічної енергії середнього руху поблизу гребеня може вважатися ознакою виникнення процесу блокування.

Набагато більше уваги приділялося енергетиці циклонічних вихорів [13]. Цікавим є й те, що, починаючи з роботи Міхалідеса [14], використовувалася схема розрахунку, яка ґрунтується на рівняннях, запропонованих Лоренцем [11] для глобальної атмосфери. Як відомо, Лоренц запропонував розглядати енергетичний цикл в атмосфері між середньою 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.

Є загальноприйнятим, що першоджерелом атмосферної енергії є приплив тепла за рахунок сонячної радіації. Прямим результатом цього є нагрівання підстильної поверхні океану та суші і атмосфери, тобто генерування внутрішньої енергії. За рахунок того, що зазначений приплив тепла від Сонця надходить на поверхню Землі нерівномірно, в атмосфері спостерігаються великі меридіональні температурні контрасти, які й обумовлюють переважно зональну циркуляцію, що має великі запаси кінетичної енергії, частина якої постійно дисипує за рахунок процесів тертя. Одна з головних проблем теорії загальної циркуляції – відповісти на запитання, яким чином деяка частина внутрішньої енергії, що створюється за рахунок припливу тепла від Сонця, у підсумку перетворюється у кінетичну енергію [15]. Енергетика глобальної атмосфери досліджується вже протягом 50 років. Взнявши за основу зонально симетричну структуру глобальної атмосфери, Лоренц у 1955 р. [16] розділив кінетичну та доступну потенціальну енергії на середньозональні та вихрові компоненти, а також сформулював перетворення одного виду енергії в іншій, ґрунтуючись на ейлеровій середній меридіональній циркуляції. Поняття ейлерової середньої (ЕС) припускає визначення середньозональних величин на ізобаричних поверхнях та відхиленя від

них, що мають назву "вихрових". Як впливає з назв, запаси одних видів енергії в атмосфері визначаються зональними (середніми по широтному колу) величинами, а інші – відхиленнями від них. Хоч у подальшому були запропоновані інші формулювання [11, 17–19] членів переходу одного виду енергії в іншій, які відрізняються від запропонованих Лоренцем, до теперішнього часу при визначенні атмосферного енергетичного циклу незмінно використовуються саме ці види енергії. У наукових працях, присвячених енергетиці атмосфери, повна потенціальна енергія розділяється на доступну та недоступну частини [15, 16, 20]. Згідно з Лоренцем [11], недоступною енергією (НПЕ) вважається повна потенціальна енергія (ППЕ) відповідного еталонного стану, а доступна енергія (ДПЕ) визначається як перевищення повної потенціальної енергії над недоступною. Оскільки оборотні адіабатичні процеси не змінюють еталонного стану, то вони, відповідно, не впливають на величину НПЕ. Тому перетворення повної потенціальної енергії у кінетичну енергію (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". Отже, атмосфера не може набути еталонного стану і ДПЕ є верхньою межею кількості енергії, що є доступною для перетворення у КЕ. 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. ДПЕ виробляється за рахунок припливу тепла, якщо, по-перше, існує нагрів тепліших та охолодження холодніших районів, що лежать на одній висоті, у результаті чого збільшуються горизонтальні градієнти температури, і, по-друге, існує нагрів повітряних мас, що лежать на більш низьких рівнях, і вихолодження на більш високих рівнях, що спричиняє зменшення статичної стійкості.

Формулювання мети статті. Пояснити велику увагу, яка надається дослідженню енергетики атмосферних процесів, можна тим, що енергетика дозволяє розглядати динамічні процеси, що відбуваються в атмосферних системах різного масштабу, в усьому їх різноманітті. Таким чином, проблема, що розглядається, полягає у найбільш точному з фізичної точки зору описі енергетичних характеристик блокуючих процесів. Отже, метою статті є встановлення особливостей еволюції процесу блокування з використанням статистичних параметрів енергетичних

запасів атмосфери.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Розглянемо систему рівнянь для бюджетів кінетичної та доступної потенціальної енергії, яка не дуже відрізняється від оригінального формулювання Лоренца, але може застосовуватися й для відкритих атмосферних систем, якими є циклиони і антициклиони [16]. Зональна і вихрова ДПЕ задаються виразами:

$$P_Z = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[(T)_{\lambda}^2]_{\lambda\varphi}}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} dp, \quad (1)$$

$$P_E = \int_{p_1}^{p_2} \frac{(T)_{\lambda}^2]_{\lambda\varphi}}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} dp, \quad (2)$$

де інтеграл стосується об'єму, який визначається горизонтальними розмірами розрахункової сітки, обмеженої меридіанами λ_1 і λ_2 , широтними колами φ_1 і φ_2 та ізобаричними поверхнями p_1 і p_2 , де $p_1 < p_2$. Зональна ДПЕ відповідає зонально осередненому полю, а вихрова – кількості ДПЕ, що залишилася. У виразах (1) і (2) для розрахунку ДПЕ та у подальших формулах для перетворень та переносу ДПЕ застосовується параметр статичної стійкості

$$[\sigma]_{\lambda\varphi} = \left[\frac{gT}{c_p} - \frac{pg}{R} \frac{\partial T}{\partial p} \right]_{\lambda\varphi}. \quad (3)$$

Цей вираз для статичної стійкості відповідає оригінальному формулюванню Лоренца і надає можливість прямого застосування полів метеорологічних величин для розрахунків. Зональна та вихрова кінетична енергія може бути виражена формулами:

$$K_Z = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[[u]_{\lambda}^2 + [v]_{\lambda}^2]_{\lambda\varphi}}{2g} dp, \quad (4)$$

$$K_E = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[(u)_{\lambda}^2 + (v)_{\lambda}^2]_{\lambda\varphi}}{2g} dp. \quad (5)$$

Зональна KE відповідає зонально осередненому рухові, а вихрова KE – кількості кінетичної енергії, що залишилася.

За наведеними вище формулами (а саме – 1,2,4,5), було проведено розрахунки енергетичних ресурсів атмосфери при формуванні в ній блокуючих ситуацій. Як вихідні у цьому дослідженні використовувалися 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. Для опису енергетики досліджуваної області використовувалися 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 . 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. В таблиці наведено статистичні параметри запасів енергії: середньозональної доступної потенціальної енергії P_Z , вихрової доступної потенціальної енергії P_E , середньозональної кінетичної енергії K_Z , вихрової кінетичної енергії K_E . Неважко бачити, що найбільші значення середньозональної доступної потенціальної енергії P_Z та вихрової доступної потенціальної енергії P_E (14,28·10⁵ Дж/м² і 2,01·10⁵ Дж/м² відповідно) спостерігаються у гребені, який має циклонічний зсув вітру (II). Це пов'язано з інтенсивними потоками тепла у меридіональному напрямку, що збільшує контрасти температур північ–південь. Також ця категорія блокуючих процесів має найбільшу дисперсію S_x^2 , тобто розкид випадкової величини. Середньозональна кінетична енергія K_Z і вихрова кінетична енергія K_E найбільші значення мають у категорії I (19,34·10⁵ Дж/м² і 5,23·10⁵ Дж/м² відповідно) – категорія блокуючий антициклон, де має місце найбільша деформація середнього потоку.

Аналіз отриманих результатів розрахунків енергетичних запасів блокуючих антициклонів та огляд синоптичного матеріалу за період дос-

Статистичні параметри запасів енергії (10^5 Дж/м²) у блокуючих ситуаціях

Енергетичні характеристики	Статистичні параметри	Категорія I (Az)	Категорія II (ПдС)	Категорія III (ПдЗ)
P_Z	X_{max}	6,84	14,28	9,13
	X_{min}	1,37	1,08	0,78
	\bar{X}	3,56	5,12	4,84
	S_x^2	0,83	3,72	2,92
P_E	X_{max}	1,52	2,01	1,76
	X_{min}	0,38	0,21	0,45
	\bar{X}	0,91	1,07	1,01
	S_x^2	0,04	0,15	0,04
K_Z	X_{max}	19,34	14,42	16,76
	X_{min}	8,27	3,74	3,01
	\bar{X}	13,09	8,67	11,46
	S_x^2	4,12	5,52	6,00
K_E	X_{max}	5,23	4,26	4,78
	X_{min}	0,89	0,64	0,75
	\bar{X}	3,07	2,11	2,34
	S_x^2	0,56	0,38	0,48

лідження дають можливість описати енергетичний стан атмосфери під час блокування. Середньозональна потенціальна енергія P_Z збільшується при адвекції холоду і тепла в область дослідження (дисперсія температури складає $8,0^\circ\text{C}$), при цьому біля землі температурний контраст дорівнює $10,2^\circ\text{C}$ і відбувається подальше просторове збільшення температурних градієнтів. P_Z зменшується при появі в даній області приземного циклону, утворенні теплого сектору біля землі, перебудові висотного баричного поля.

Вихрова потенціальна енергія P_E збільшується при утворенні теплого сектора, зменшенні температури біля землі і на висотах, наявності квазівертикальної вісі в антициклоні, наявності фронтів. P_E зменшується при посиленні фронтальної діяльності (збільшуються контрасти температур), перебудові висотного баричного поля, збільшенні температури біля землі, регенерації блокуючого антициклону.

Середньозональна кінетична енергія K_Z збільшується при посиленні блокуючого антициклонна біля землі, посиленні висотного гребеня на стадії максимального розвитку приземного й висотного антициклону, появі в області дослідження струменевої течії. Зменшується K_Z за умови появи в даній області циклону біля землі,

утворення висотних антициклону і циклону, перебудові висотного баричного поля, наявності квазівертикальної вісі в антициклоні, відсутності струменевої течії.

Вихрова кінетична енергія K_E збільшується при посиленні фронтальної діяльності, наявності квазівертикальної вісі в циклоні; посилення приземного та висотного антициклону, на стадії максимального розвитку приземного й висотного антициклону. Зменшення K_E відбувається при заповненні циклону біля землі, перебудові висотного баричного поля, регенерації блокуючого антициклону.

Висновки. Діагностичне дослідження, проведене у цій роботі, фокусується на комплексному характері блокуючих антициклонів. Для останніх, на відміну від циклонів помірних широт, майже зовсім не проводився аналіз атмосферної енергетики, хоча вплив цього типу антициклонів на формування екстремальних погодних умов, таких як посухи, хвилі тепла, суховії тощо є суттєвим. Внаслідок того, що енергетика атмосфери дозволяє розглядати динамічні процеси, які відбуваються в блокуючих антициклонах, в усьому їх різноманітті, представлено статистичне дослідження дозволяє виявити певні особливості еволюції блокуючих антициклонів.

Література

1. Pelly, J. A new perspective on blocking [Text] / J. Pelly, B. Hoskins // *J. Atmos. Sci.* – 2003. – Vol. 60, Issue 3. – P. 743–755.
2. Doblas-Reyes, F. Sensitivity of the Northern Hemisphere blocking frequency to the detection index [Text] / F. Doblas-Reyes, M. Casado, M. Pastor // *Journal of Geophysical Research.* – 2002. – Vol. 107, Issue D2. – 0290.
3. Diao, Y. A new blocking index and its application: Blocking action in the Northern Hemisphere [Text] / Y. Diao, J. Li, D. Luo // *Journal of Climate.* – 2006. – Vol. 19, Issue 19. – P. 4819–4839.
4. Tyrlis, E. Aspects of a Northern Hemisphere atmospheric blocking climatology [Text] / E. Tyrlis, B. Hoskins // *Journal of the Atmospheric Sciences.* – 2008. – Vol. 65, Issue 5. – P. 1638–1652.
5. Tyrlis, E. The morphology of Northern Hemisphere blocking [Text] / E. Tyrlis, B. Hoskins // *Journal of the Atmospheric Sciences.* – 2008. – Vol. 65, Issue 5. – P. 1653–1662.
6. Barriopedro, D. Application of blocking diagnosis methods to General Circulation Models. Part I: a novel detection scheme [Text] / D. Barriopedro, R. García-Herrera, R. Trigo // *Climate Dynamics.* – 2010. – Vol. 35, Issue 7–8. – P. 1373–1391.
7. Barnes, E. A methodology for the comparison of blocking climatologies across indices, models and climate scenarios [Text] / E. Barnes, J. Slingo, T. Woollings // *Climate Dynamics.* – 2012. – Vol. 38, Issue 11–12. – P. 2467–2481.
8. Weijenborg, C. On the direction of Rossby wave breaking in blocking [Text] / C. Weijenborg, H. de Vries, R. Naarsma // *Climate Dynamics.* – 2012. – Vol. 39, Issue 12. – P. 2823–2831.
9. Калинин, Н.А. Энергетика циклонов умеренных широт [Energy cyclones of temperate latitudes] [Текст] / Н.А. Калинин. – П.: ПерГУ, 1999. – 190 с.
10. Kung, E. Spectral energetics of the observed and simulated Northern Hemisphere general circulation during blocking episodes [Text] / E. Kung, W. Baker // *Journal of the Atmospheric Sciences.* – 1986. – Vol. 43, Issue 13. – P. 2792–2812.
11. Хохлов, В.Н. Энергетика общей циркуляции атмосферы [Energy atmospheric general circulation] [Текст] / В.Н. Хохлов. – О.: ТЭС, 2004. – 132 с.
12. Watarai, Y. Local energetics analysis of blocking formation in the North Pacific decomposed in vertical mean and sheared flows [Text] / Y. Watarai, H. Tanaka // *Journal of the Meteorological Society of Japan.* – 2004. – Vol. 82, Issue 5. – P. 1447–1458.
13. Black, M. A universal, broad–environment energy conversion signature of explosive cyclones [Text] / M. Black, A. Pezza // *Geophysical Research Letters.* – 2013. – Vol. 40, Issue 2. – P. 452–457.
14. Michaelides, S. Limited area energetics of Genoa cyclogenesis [Text] / S. Michaelides // *Monthly Weather Review.* – 1987. – Vol. 115, Issue 1. – P. 13–26.
15. Лоренц, Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы [Nature and the theory of the general circulation of the atmosphere]: пер. с англ. [Текст] / Э.Н. Лоренц. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 259 с.
16. Lorenz, E. Available potential energy and the maintenance of the general circulation [Text] / E. Lorenz // *Tellus.* – 1955. – Vol. 7. – P. 157–167.
17. Plumb, R. A new look at the energy cycle [Text] / R. Plumb // *J. Atmos. Sci.* – 1983. – Vol. 40 – P. 1669–1688.
18. Hayashi, Y. A modification of the atmospheric energy cycle [Text] / Y. Hayashi // *J. Atmos. Sci.* – 1987. – Vol. 44. – P. 2006–2017.
19. Iwasaki, T. Atmospheric energy cycle viewed from wave–mean–flow interaction and Lagrangian mean circulation [Text] / T. Iwasaki // *J. Atmos. Sci.* – 2001. – Vol. 58. – P. 3036–3052.
20. Недострелова, Л.В. Энергетика блокирующего процесса [Energy blocking process] [Текст] / Л.В. Недострелова // *Український гідрометеорологічний журнал.* – 2011. – № 8. – С. 74–83.