

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МЕТЕОРОЛОГІЯ,
КЛІМАТОЛОГІЯ
ТА ГІДРОЛОГІЯ**

Міжвідомчий науковий збірник України

Заснований у 1965 році

ВИПУСК 47

Одеса-2003

УДК 551.513.1

Хохлов В.М., к.г.н.

Одеський державний екологічний університет

Порівняльний аналіз розрахунку складових глобального циклу енергії у атмосфері

У роботі проведений аналіз основних глобальних схем перетворення енергії в атмосфері, а також наведено фізичне значення деяких членів переходу одного виду енергії в інший. Наведено розрахунки глобального циклу енергії в атмосфері для зими у Північній півкулі.

Постановка проблеми. Пояснити велику увагу, яка протягом розвитку фізики атмосфери приділялась дослідженню енергетиці атмосферних процесів, можна тим, що енергетика дозволяю розглядати динамічні процеси, що відбуваються у атмосферних системах різного масштабу, у всьому їх різноманітті. Ледве не єдиним концептуальним припущенням, цілком реальним та неодноразово доведеним експериментально і теоретично, є існування перетворення одних видів енергії в інші та, за рахунок цього, енергетичне „підживлення” процесів одного масштабу іншими. Таким чином, проблема, яка розв’язувалась та розв’язується у теперішній час багатьма дослідниками, полягає у найточнішому з фізичної точки зору описуванні зазначених перетворень енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з даної проблеми.

Е.Н. Лоренц ще у 1955 році [1], ввів поняття доступної потенціальної енергії, а також розділив кінетичну та доступну потенціальну енергії на зональну та вихрову частини і обґрунтував перехід одного виду енергії в іншій. Він же зауважив, що „задача тлумачення напрямку перетворень енергії в енергетичному циклі більш складна, ніж це може здаватися на перший погляд” [2].

Треба відзначити, що правильні з математичної точки зору рівняння не завжди у достатній мірі обґрунтовані з фізичної точки зору. Перші труднощі в інтерпретації енергетичного циклу виникли внаслідок використання Ейлеревих середніх величин [1]. Приклад неправомірності їх використання наведений у роботі Плама [3], який запропонував використовувати „трансформовані Ейлереві середні” на основі складових потоку Еліассена-Пальма та так звану остаточну циркуляцію. В іншій роботі, Хаяші [4] використав поняття „адіабатичної середньої циркуляції” та одержав цикл

енергії, що спрямований від середньої доступної потенціальної енергії через вихрові в середню кінетичну енергію.

Використання в зазначених вище циклах енергії Плама та Хаяші складових потоку Еліассена-Пальма покращило уявлення про обмін енергією між „середньою циркуляцією” та вихорами, з одного боку, але наклало обмеження на їх використання, тому що сам потік Еліассена-Пальма є квазігеострофічним, в зв'язку з чим виникло дві проблеми – нижньої межі, на якій присутня сила тертя, та діабатичного нагріву.

Обидві ці проблеми розв'язуються через використання потенціальної температури як вертикальної координати. Доведення теореми Еліассена-Пальма у припущенні агеострофіки (тобто рівняння є примітивними) та скінченої амплітуди хвиль наведено у роботах Ендрюса [5] і Танга [6]. Як було відзначено Ендрюсом, розв'язання цих проблем можливе лише у ізентропічних координатах.

Івасакі [7], ґрунтуючись на результатах Ендрюса і Танга, запропонував використовувати для формулювання глобального циклу енергії гібридну ізобаро-ізентропічну систему координат. Одержаний при цьому цикл енергії має деякі переваги перед зазначеними вище, а саме:

а) використання середньозональних величин на ізентропічних поверхнях дозволяє точно визначити доступну потенціальну енергію;

б) рівняння термодинаміки не містить вихрових членів і, внаслідок цього, не існує переходу між середньозональною та вихровою доступною потенціальною енергією;

в) вихрова енергія перетворюється тільки з середньозональної кінетичної енергії, причому це перетворення існує лише за ненульової дивергенції потоку Еліассена-Пальма;

г) горизонтальна дивергенція потоку Еліассена-Пальма на ізентропічних поверхнях є переходом у вихрову кінетичну енергію, а адіабатична дивергенція по вертикалі – у вихрову доступну потенціальну енергію.

Згідно з [7], доступна потенціальна енергія середньозонального потоку є головним джерелом енергії підсилення загальної циркуляції у середніх широтах. Також, через те, що рівняння термодинаміки не містить вихрових членів, не існує переходу між середньозональною та вихровою доступною потенціальною енергією.

Детальні формулювання для зазначених вище циклів енергії наведені в [3, 4, 7], а в даній роботі наведемо лише фізичний аналіз деяких членів переходу одного виду енергії в інший для циклу енергії у гібридній системі координат.

У загальному вигляді рівняння балансу енергії можна записати таким чином [7]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}\langle P_Z \rangle &= -C(P_Z, K_Z) + S(P_Z), \\ \frac{\partial}{\partial t}\langle P_E \rangle &= -C(P_E, K_Z) - C(P_E, K_E) + S(P_E), \\ \frac{\partial}{\partial t}\langle K_Z \rangle &= C(P_Z, K_Z) + C(P_E, K_Z) - C(K_Z, K_E) + S(K_Z), \\ \frac{\partial}{\partial t}\langle K_E \rangle &= C(P_E, K_E) + C(K_Z, K_E) + S(K_E).\end{aligned}$$

У наведених рівняннях P_Z , P_E , K_Z , K_E – середньозональна доступна потенціальна, вихрова доступна потенціальна, середньозональна кінетична та вихрова кінетична енергія, відповідно; кутові дужки означають глобальний інтеграл; члени C – перетворення одного виду енергії в інший, а S – джерела чи стоки відповідного виду енергії.

Головною відзнакою циклу енергії Івасакі є наявність члена перетворення середньозональної кінетичної у вихрову доступну потенціальну енергію (для позначень дивись [7]):

$$C(P_E, K_Z) = - \left\langle \overline{u^*} \frac{\partial}{\partial p_{\dagger}} \overline{p \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_{p_{\dagger}}} \right\rangle - \left\langle \overline{v^*} \left[\left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)_{\theta}^* - \left(\frac{\partial M_{\dagger}}{\partial y} \right)_{\theta} \right] \right\rangle,$$

де u , v – зональна та меридіональна складові вектору швидкості вітру; Φ , M – геопотенціал та функція току Монтгомері.

Перетворення в цьому рівнянні є роботами внаслідок сил баричного градієнта. Перший член є добутком середньозонального потоку та вертикальної дивергенції потоку Еліассена-Пальма. Обидва члени присутні в рівняннях балансу вихрової доступної потенціальної та середньозональної кінетичної енергії через те, що в [7] було введено масову вагу в середньозональну величину вітру. Якщо брати середньозональну величину без масової ваги, сила баричного градієнта зникне внаслідок циклічних граничних умов у зональному напрямку.

Член діабатичного нагріву $S(P_E)$ звичайно створює вихрову доступну потенціальну енергію внаслідок неоднорідностей земної поверхні, але іноді втрачає її за рахунок інфрачервоного радіаційного хвильового затухання. Також за рахунок тертя відбувається безупинна дисипація кінетичної енергії у тепло (розрахунки цього стоку надані в [8]).

На закінчення наведемо розрахунки середнього багаторічного глобального циклу енергії (рис. 1). Як вихідні дані для цих розрахунків використовувався архів GDAAC за 1980-93 рр.

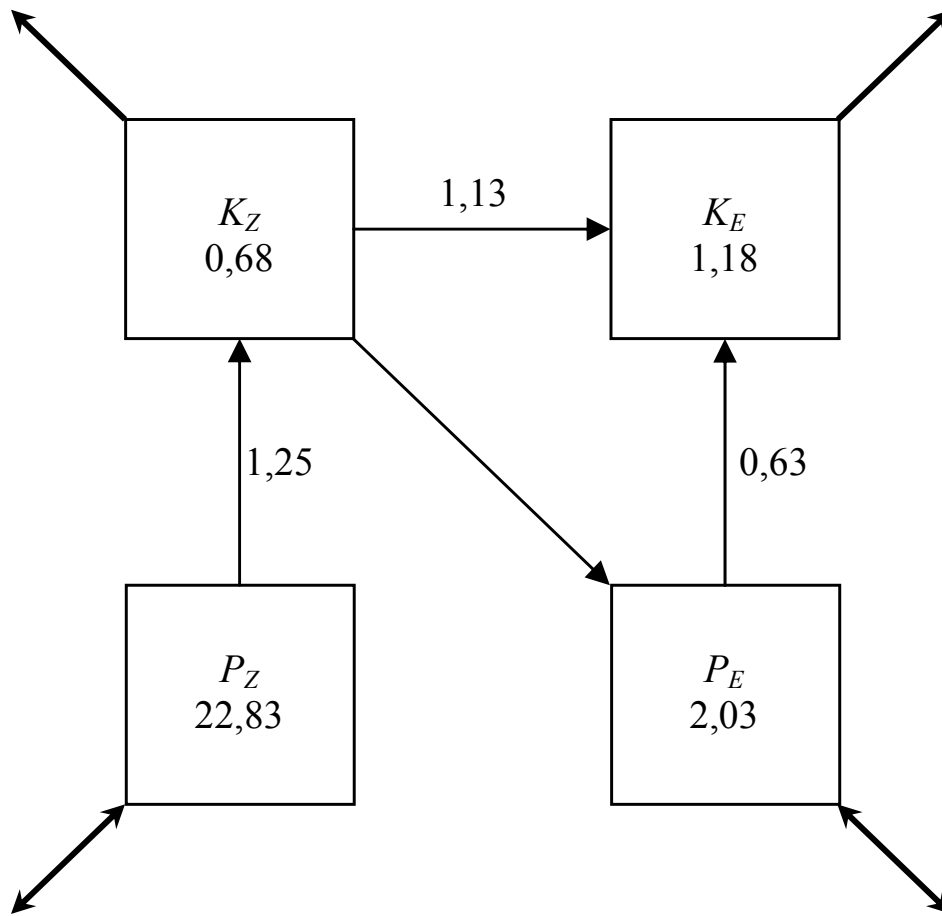


Рис. 1 – Середній багаторічний глобальний цикл енергії ($P_E, K_E, K_Z - 10^6$ Дж м⁻²; $P_Z - 10^9$ Дж м⁻²; інші члени – Вт м⁻²)

Насамперед, треба відзначити, що спостерігається прямий перехід від середньозональної доступної потенціальної через середньозональну кінетичну до вихрових форм енергії. Також, якщо порівнювати одержані результати з даними [9], можна бачити, що перехід $C(P_Z, K_Z)$ значно менший, хоч розрахунки здійснювалися за одними вихідними даними. В [9] вже відзначалося, що зазначений архів даних має деякі недоліки. Значне покращення результатів розрахунків в цій роботі можна пов'язати саме з використанням гібридної системи координат та застосуванням масової ваги у процедурі осереднення [7].

Треба відзначити, що розрахунки за схемою Івасакі зроблені вперше і тому оцінка члена переходу $C(P_E, K_Z)$ привертає особливу увагу. Його невелика величина (всього 0,28 Вт м⁻²), проте, має велике фізичне значення в схемі Івасакі, як зазначалося вище.

На перший погляд здається дивним, що застосування різних методів осереднення величин веде до різних енергетичних циклів. З точки зору

Плама [3] це обмежує можливість використання циклу енергії як діагностичного засобу середньо зонального стану. Але в схемі Івасакі [7] вихрові потенціальна та кінетична енергії створюються тільки із зональної кінетичної енергії через взаємодію середнього потоку та вихорів, що відповідає принципам баротропної та бароклинної нестійкості.

Література

1. Lorenz E.N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation // *Tellus*. – 1955. – Vol. 7. – P. 157-167.
2. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 259 с.
3. Plumb R.A. A new look at the energy cycle // *J. Atmos. Sci.* – 1983. – Vol. 40. – P. 1669-1688
4. Hayashi Y. A modification of the atmospheric energy cycle // *J. Atmos. Sci.* – 1987. – Vol. 44. – P. 2006-2017.
5. Andrews D.G. A finite-amplitude Eliassen-Palm theorem in isentropic coordinates // *J. Atmos. Sci.* – 1983. – Vol. 40. – P. 1877-1883.
6. Tung K.K. Nongeostrophic theory of zonally averaged circulation. Part I: Formulation // *J. Atmos. Sci.* – 1986. – Vol. 43. – P. 2600-2618.
7. Iwasaki T. Atmospheric energy cycle viewed from wave-mean-flow interaction and lagrangian mean circulation // *J. Atmos. Sci.* – 2001. – Vol. 58. – P. 3036-3052.
8. Хохлов В.М. Параметризація вертикальної і горизонтальної дифузії в рівнянні бюджету кінетичної енергії // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. – 2001. – Вип. 44. – С. 24-29.
9. Хохлов В.Н. Сезонные колебания в атмосферном цикле энергии // *Міжнар. конф. „Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища – 2002”*. – Одеса (Україна). – 2002. – С. 93-94.

Comparative analysis of calculation for components of the global energy cycle in the atmosphere

Khokhlov V.N.

The analysis of main global schemes for energy conversion in atmosphere is carried out and the physical meaning for some energy conversion terms is given. The calculations of global energy cycle in the atmosphere for winter Northern Hemisphere are given.

Поступила 15.04.2003