

ІНТЕГРАЛЬНІ ПЕРЕНОСИ РІЗНИХ ВИДІВ ЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС БЛОКУВАННЯ АТМОСФЕРНИХ ПРОЦЕСІВ

Розраховано і проаналізовано інтегральні переноси різних видів енергії повз межу блокуючого антициклону над територією Європи.

Ключові слова: енергетика атмосфери, інтегральні переноси енергії, блокуючий антициклон.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Велику увагу, яка надається дослідженню енергетики атмосферних процесів, можна пояснити тим, що енергетика дозволяє розглядати динамічні процеси, що відбуваються в атмосферних системах різного масштабу, в усьому їх різноманітті. Майже єдиним концептуальним припущенням, цілком реальним та неодноразово доказаним експериментально та теоретично, є існування перетворення одних видів енергії в інші і, за рахунок цього, енергетичного "підживлення" атмосферних процесів одного масштабу іншими. Таким чином, проблема, яка розглядалася та розглядається у теперішній час багатьма дослідниками, полягає у найбільш точному з фізичної точки зору описі зазначених перетворень енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Енергетика глобальної атмосфери досліджується вже протягом 50 років. Взявши за основу зонально симетричну структуру глобальної атмосфери, Лоренц у 1955 р. [1] розділив кінетичну (K) та доступну потенціальну (P) енергії на середньозональні (підрядковий індекс Z) та вихрові (підрядковий індекс E) компоненти, а також сформулював перетворення одного виду енергії в іншій, ґрунтуючись на ейлеровій середній меридіональній циркуляції. За останні декілька десятиріч роль об'єктів синоптичного масштабу як важливих факторів атмосферної енергетики глобального масштабу, висвітлена у багатьох наукових працях. Але, як правило, у цих працях розглядається переважно бюджет кінетичної енергії циклонів помірних широт. Система рівнянь для бюджетів кінетичної (КЕ) та доступної потенціальної енергії (ДПЕ), запропонована Лоренцем, може застосовуватися й для відкритих атмосферних систем, якими є циклони і антициклони [2, 3].

Використовуючи енергетичні характеристики для аналізу еволюції вихорів синоптичного масштабу, можна отримати результати, які дозволять суттєво розширити уявлення про динаміку вихорів. Розрахунок та аналіз характеристик енергетики окремих синоптичних утворень є показовим засобом комплексного дослідження їх еволюції. В даній статті енергетичний підхід використовується для дослідження еволюції антициклону. Треба зауважити, що енергетика антициклонів, на відміну від циклонів, раніше досліджувалася дуже рідко [4, 5]. Таким чином, метою даної роботи є дослідження енергетичних характеристик атмосфери у випадку антициклону. Цей антициклон був цікавий тим, що у ньому над територією України спостерігалися чисельні конвективні явища: грози, град, зливи, шквали.

Основний матеріал і методи дослідження. Як вихідні у цьому дослідженні використовувалися дані про метеорологічні величини у вузлах регулярної широтно-довготної сітки на ізобаричних поверхнях від AT_{1000} до AT_{100} для області, яка в горизонтальній площині обмежена 50° і 80° півн.ш. та 20° і 65° сх.д. Ці дані отримані з сервера NCEP-NCAR, горизонтальне розділення сітки становить $2,5^\circ$ по широті та довготі. Через те, що вони використовуються для вивчення процесів синоптичного

масштабу, то їх репрезентативність може вважатися цілком задовільною. Метеорологічні величини, які 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 .

Розглянемо тут систему рівнянь для бюджетів кінетичної та доступної потенціальної енергії, яка не дуже відрізняється від оригінального формулювання Лоренца, але може застосовуватися для антициклону [2, 3].

Для подальшого чисельного інтегрування вмісту енергії, її перетворень та потоків використаємо 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 $p_1 < p_2$. Тоді, середнє зональне значення змінної X визначається, як

$$[X]_{\lambda} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X d\lambda. \quad (1)$$

Вихрова складова $(X)_{\lambda}$ є відхиленням цього параметра від його середнє зонального значення

$$(X)_{\lambda} = X - [X]_{\lambda}. \quad (2)$$

Середнє меридіональне значення визначається, як

$$[X]_{\varphi} = \frac{1}{\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} X \cos \varphi d\varphi. \quad (3)$$

Тоді, з використанням формул (1) і (3), середнє значення на ізобаричній поверхні змінної X буде визначатися, як

$$[X]_{\lambda\varphi} = \frac{\int_y \int_x X dx dy}{\int_y \int_x dx dy} = \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X a^2 \cos \varphi d\lambda d\varphi}{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} a^2 \cos \varphi d\lambda d\varphi} = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X \cos \varphi d\lambda d\varphi. \quad (4)$$

Очевидно, що це середнє значення на ізобаричній поверхні є еквівалентом послідовного осереднення за широтним колом та меридіаном. З використанням цієї середньої величини та припускаючи гідростатичну рівновагу, інтеграл по вертикалі на одиницю площі можна визначити, як

$$\frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} [X]_{\lambda\varphi} dp. \quad (5)$$

Вираз (5) використовується для розрахунку енергії та її перетворень. Величина, визначена членами вищезгаданих співвідношень,

$$([X]_{\lambda})_{\varphi} = [X]_{\lambda} - [X]_{\lambda\varphi} \quad (6)$$

не змінюється по широтному колу.

Середня на ізобаричній поверхні повна (горизонтальна та вертикальна) дивергенція потоку змінної X задається через

$$BX = \frac{c_1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (Xu)_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\varphi dp + \frac{c_2}{g} \int_{p_1}^{p_2} ([Xv \cos \varphi]_{\lambda})_{\varphi_1}^{\varphi_2} dp - \frac{1}{g} ([X\tau]_{\lambda})_{p_1}^{p_2}, \quad (7)$$

де $c_1 = -\frac{1}{a(\lambda_2 - \lambda_1)(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)}$;

$$c_2 = -\frac{1}{a(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)}.$$

Для того, щоб розділити ДПЕ на зональну та вихрову складові, застосуємо

виведену Лоренцем наближену формулу [6]. Використовуючи вирази (2) і (6), відхилення температури можна записати у вигляді

$$(T - [T]_{\lambda\phi})^2 = ([T]_{\lambda})_{\phi}^2 + 2([T]_{\lambda})_{\phi}(T)_{\lambda} + (T)_{\lambda}^2. \quad (8)$$

Інтегруючи по масі об'єму атмосфери, що розглядається, та маючи на увазі, що член, який містить тільки відхилення від середнього зонального значення $(T)_{\lambda}^2$ прямує до нуля при осередненні за плоскістю, зональна і вихрова ДПЕ задаються виразами:

$$P_Z = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[([T]_{\lambda})_{\phi}^2]_{\lambda\phi}}{2[\sigma]_{\lambda\phi}} dp, \quad (9)$$

$$P_E = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[(T)_{\lambda}^2]_{\lambda\phi}}{2[\sigma]_{\lambda\phi}} dp, \quad (10)$$

де інтеграл стосується об'єму, який визначається горизонтальними розмірами розрахункової сітки (обмеженої меридіанами λ_1 і λ_2 та широтними колами ϕ_1 і ϕ_2) і певними ізобаричними поверхнями (p_1 і p_2 , $p_1 < p_2$) по вертикалі. Зональна ДПЕ відповідає зонально осередненому полю, а вихрова – кількості ДПЕ, що залишилася.

У виразах (9) і (10) для розрахунку ДПЕ та у подальших формулах для перетворень та переносу ДПЕ застосовується параметр статичної стійкості

$$[\sigma]_{\lambda\phi} = \left[\frac{gT}{c_p} - \frac{pg}{R} \frac{\partial T}{\partial p} \right]_{\lambda\phi}. \quad (11)$$

Цей вираз для статичної стійкості відповідає оригінальному формулюванню Лоренца і надає можливість прямого застосування полів метеорологічних величин для розрахунків.

Згідно з розділенням ДПЕ, кінетична енергія також розділяється на зональну та вихрову складові використанням (2), тобто

$$u^2 + v^2 = [u]_{\lambda\phi}^2 + [v]_{\lambda\phi}^2 + 2\{[u]_{\lambda}(u)_{\lambda} + [v]_{\lambda}(v)_{\lambda}\} + (u)_{\lambda}^2 + (v)_{\lambda}^2. \quad (12)$$

Інтегруючи по масі об'єму, зональну та вихрову кінетичну енергію можна виразити формулами:

$$K_Z = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[[u]_{\lambda}^2 + [v]_{\lambda}^2]_{\lambda\phi}}{2g} dp, \quad (13)$$

$$K_E = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[(u)_{\lambda}^2 + (v)_{\lambda}^2]_{\lambda\phi}}{2g} dp. \quad (14)$$

Зональна KE відповідає зонально осередненому рухові, а вихрова KE – кількості кінетичної енергії, що залишилася. При цьому, як було пояснено Лоренцем, зональна KE, що виражена формулою (13), не належить ні до зонального руху, ні до зонально осередненої KE.

Перенос повз межу різних видів енергії визначається інтегралом повної дивергенції потоку відповідної енергії (див. рівняння (7)). Отже, ці переноси через межу можна записати у вигляді:

$$BPZ = c_1 \int_{p_1}^{p_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{1}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} \left(u \{ ([T]_{\lambda})_{\varphi}^2 + 2([T]_{\lambda})_{\varphi} (T)_{\lambda} \} \right)_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\varphi dp +$$

$$+ c_2 \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} \left([v \cos \varphi \{ ([T]_{\lambda})_{\varphi}^2 + 2([T]_{\lambda})_{\varphi} (T)_{\lambda} \}]_{\lambda_1} \right)_{\varphi_1}^{\varphi_2} dp -$$

$$- \frac{1}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} \left([\tau \{ ([T]_{\lambda})_{\varphi}^2 + 2([T]_{\lambda})_{\varphi} (T)_{\lambda} \}]_{\lambda\varphi} \right)_{p_1}^{p_2}, \quad (15)$$

$$BPE = c_1 \int_{p_1}^{p_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{1}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} \left(u (T)_{\lambda}^2 \right)_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\varphi dp + c_2 \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} \left([v \cos \varphi (T)_{\lambda}^2]_{\lambda_1} \right)_{\varphi_1}^{\varphi_2} dp - \frac{1}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} \left([\tau (T)_{\lambda}^2]_{\lambda\varphi} \right)_{p_1}^{p_2}. \quad (16)$$

$$BKZ = c_1 \int_{p_1}^{p_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{1}{2g} \left(u \{ [u]_{\lambda\varphi}^2 + [v]_{\lambda\varphi}^2 + 2\{ [u]_{\lambda} (u)_{\lambda} + [v]_{\lambda} (v)_{\lambda} \} \} \right)_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\varphi dp +$$

$$+ c_2 \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{2g} \left([v \cos \varphi \{ [u]_{\lambda\varphi}^2 + [v]_{\lambda\varphi}^2 + 2\{ [u]_{\lambda} (u)_{\lambda} + [v]_{\lambda} (v)_{\lambda} \} \}]_{\lambda_1} \right)_{\varphi_1}^{\varphi_2} dp -$$

$$- \frac{1}{2g} \left([\tau \{ [u]_{\lambda\varphi}^2 + [v]_{\lambda\varphi}^2 + 2\{ [u]_{\lambda} (u)_{\lambda} + [v]_{\lambda} (v)_{\lambda} \} \}]_{\lambda\varphi} \right)_{p_1}^{p_2}, \quad (17)$$

$$BKE = c_1 \int_{p_1}^{p_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{1}{2g} \left(u \{ (u)_{\lambda}^2 + (v)_{\lambda}^2 \} \right)_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\varphi dp +$$

$$+ c_2 \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{2g} \left([v \cos \varphi \{ (u)_{\lambda}^2 + (v)_{\lambda}^2 \}]_{\lambda_1} \right)_{\varphi_1}^{\varphi_2} dp - \frac{1}{2g} \left([\tau \{ (u)_{\lambda}^2 + (v)_{\lambda}^2 \}]_{\lambda\varphi} \right)_{p_1}^{p_2}. \quad (18)$$

Отже ми маємо рівняння для потоків повз бічні межі (15)-(18), за якими й здійснюватиметься подальший розрахунок. Докладний фізичний аналіз різних складових цих рівнянь наведено у [2, 3].

Як приклад розрахунків та аналізу енергетичних характеристик розглянемо антициклон, що спостерігався з 9 липня до 5 серпня 2003 року над Східною Європою (рис. 1).

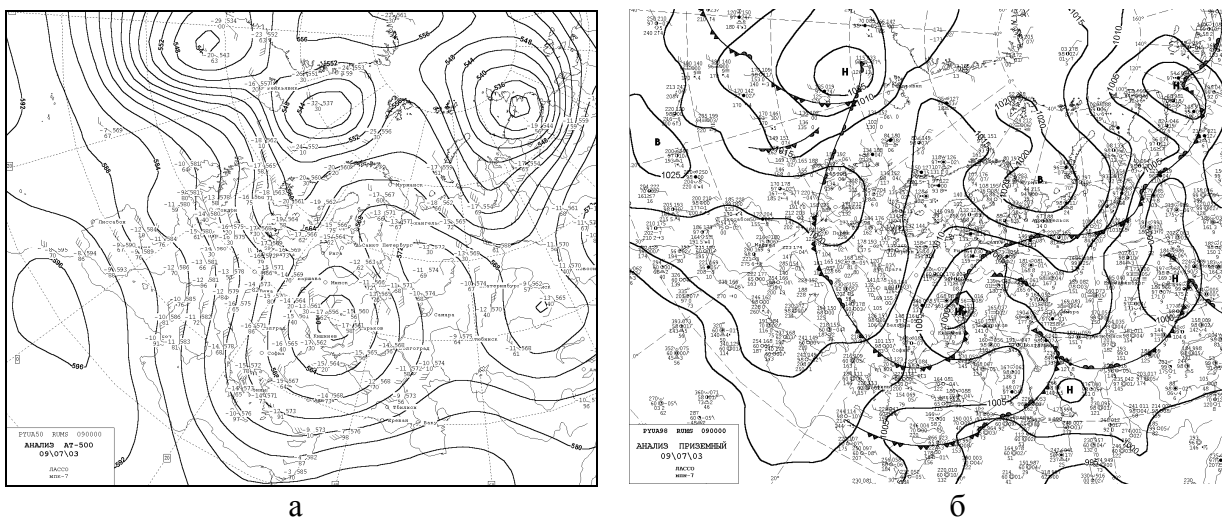


Рис. 1 – Карти АТ-500 гПа (а) і приземна (б) за 09.07.2003 р. 00 г. СГЧ.

Дана синоптична ситуація була поділена на два процеси. Перший – це взаємодія блокуючого антициклону з циклоном і серією фронтів, пов'язаних з ним, що

спостерігався з 9.07 по 13.07.2003 р. Другий процес – це блокуючий антициклон, який спостерігався над досліджуваною територією з 14.07 по 5.08.2003 р. По північній і південній периферії антициклону переміщуються циклони і, пов'язані з ними, фронти. Розглянемо перший процес і стисло опишемо синоптичну ситуацію.

Над досліджуваною областю 9 липня 2003 р. спостерігався антициклон з центром над Мурманськом. Антициклон мав одну замкнуту ізобару 1020 гПа, максимальний тиск в центрі 1022 гПа. По південній периферії антициклону проходив теплий фронт, який пов'язаний з циклоном, що знаходився за межею досліджуваної області. На АТ - 500 гПа спостерігався баричний гребінь, який орієнтований з півдня на північ досліджуваної області, а з півночі на південь розповсюджувалася барична улоговина. Дані баричні утворення характеризувалися добре сформованою меридіональністю. 10 липня на карті абсолютної топографії в гребені утворився висотний антициклон, який відповідав антициклону біля землі. В області улоговини спостерігався висотний циклон, якому біля землі відповідала улоговина. 11 липня циклон біля землі змістився в область дослідження. Його центр розташовувався на північ від Харкова, мав одну замкнуту ізобару 1005 гПа. Мінімальний тиск в центрі циклону складав 1004 гПа. В досліджувану область змістилася і серія фронтів, пов'язана з даним циклоном. До кінця розглянутого періоду в північній частині розглянутого регіону спостерігався антициклон з однією замкнутою ізобарою і максимальним значенням тиску 1022 гПа, над центром і півднем – область зниженого тиску з мінімальним тиском на південь від Москви 1007 гПа. Через досліджуваний район проходили теплі і холодні фронти. На картах абсолютної баричної топографії спостерігалися гребінь, який відповідав антициклону біля землі і циклон з квазівертикальною віссю.

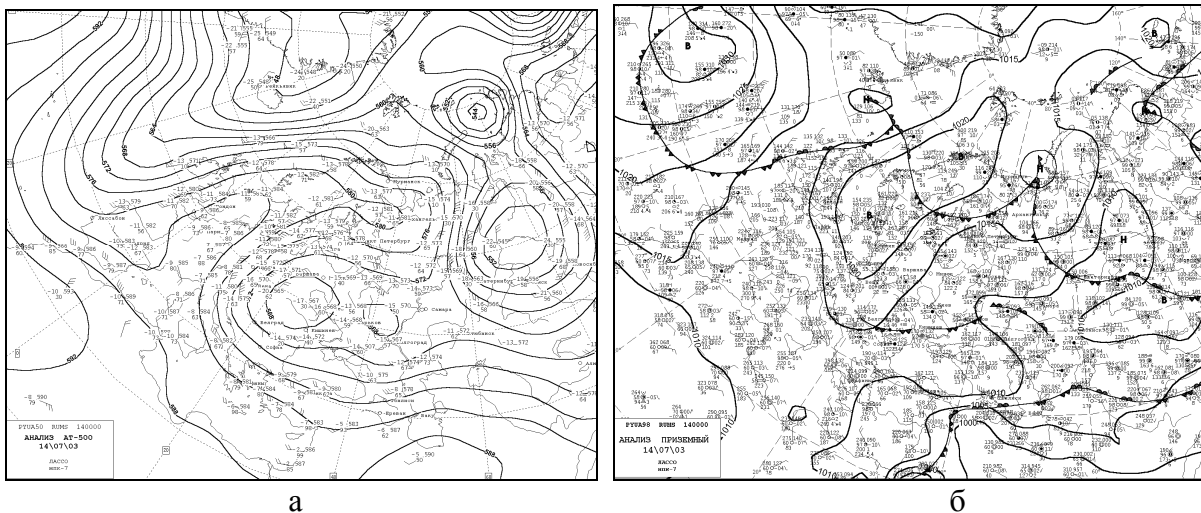


Рис. 2 – Карты АТ-500 гПа (а) і приземна (б) за 14.07.2003 р. 00 г. СГЧ.

Розглянемо другий процес, який відбувався з 14 липня по 5 серпня 2003 р. (рис. 2). 14 липня спостерігалася перебудова висотного баричного поля. З північно-східної частини Атлантичного океану на Західну Європу зміщувався гребінь, вісь якого в області Скандинавії змінила свою спрямованість з меридіональної на зональну. Ця зонально-орієнтована частина гребеня знаходиться в досліджуваній області. В районі Західного Сибіру утворився потужний висотний циклон, який мав три центри: над Карським морем, над Західним Сибіром і над Україною і Східною Європою. Третій центр висотного циклону потрапив в район дослідження. В результаті, над досліджуваною територією в її північній частині мав місце висотний гребінь, що розповсюджується зі Східної Атлантики. В південній частині спостерігався висотний

циклон. І гребінь, і циклон над досліджуваною територією орієнтовані зонально. На приземній карті над Баренцовим морем знаходився циклон з однією замкнутою ізобарою 1015 гПа, з мінімальним тиском в центрі 1015 гПа. З циклоном пов'язані теплий і холодний фронти. В південно-західній частині досліджуваної області спостерігається циклон з однією замкнутою ізобарою 1010 гПа і з мінімальним тиском в центрі 1010 гПа. З циклоном також зв'язана система фронтів. 15 липня з'явився приземний антициклон з трьома замкнутими ізобарами 1015, 1020 і 1025 гПа. В центрі баричного утворення спостерігався максимальний тиск 1026 гПа. До кінця досліджуваного періоду в цій області стаціонував антициклон.

Результати дослідження. Для характеристики енергетики досліджуваної області використовувалися інтегральні переноси даних видів енергії *BPZ*, *BPE*, *BKZ*, *BKE*.

Інтегральний потік *BPZ* в середньому мав від'ємні значення на початку періоду дослідження (рис. 3). Це свідчить про те, що досліджувана область віддавала зональну потенціальну енергію, що накопичилася в ній. 10 липня потік *BPZ* має найбільше від'ємне значення $-6,41 \text{ Вт/м}^2$ за перший період дослідження. На карті АТ-500 гПа у цей час спостерігалася адвекція холоду з північного заходу й адвекція тепла з південного сходу у досліджувану область. Такий просторовий розподіл термічної улоговини та термічного гребеня сприяв збільшенню меридіонального термічного градієнту: різниця між температурами становила 8°C . На приземній карті висотний циклон на АТ-500 гПа співпадав з приземним циклоном з теплим сектором і серією фронтів. Такий просторовий розподіл баричного поля збільшував меридіональний термічний градієнт. Перепад температур у теплому секторі та перед фронтом біля поверхні землі становить $8,1^\circ\text{C}$. Лише 11 липня *BPZ* мав додатне значення $0,68 \text{ Вт/м}^2$, коли висотний антициклон знаходився на початковій стадії свого існування, а в області висотного циклону тиск починав зростати, що відповідало стадії його заповнення. Крім того, область блокуючого процесу отримувала енергію від процесів, які відбувалися на його південній периферії. Там спостерігалася адвекція тепла з півдня, яка збільшувала контрасти температур між цим термічним гребенем та південною частиною блокуючого антициклону. Тут різниця температур досягала 10°C . Інтегральний потік *BPZ* в другий період в основному мав від'ємні значення, що свідчить про відтік енергії з області дослідження. 18 липня у часовому розподілі *BPZ* мав місце перший мінімум енергії у другому періоді дослідження, який дорівнював $-13,88 \text{ Вт/м}^2$. На карті висотного баричного поля цьому мінімуму *BPZ* відповідала адвекція холоду з північного сходу й адвекція тепла з південного заходу, що утворювали більший контраст температур в області блокуючого процесу. Різниця температур уздовж меридіана становила 5°C . Біля поверхні землі 18 липня на північно-східній периферії антициклону спостерігалася система фронтів, що формувала великий меридіональний термічний градієнт. Різниця температур становила $8,4^\circ\text{C}$. Другий мінімум значень інтегрального потоку *BPZ* дорівнював $-15,88 \text{ Вт/м}^2$ і спостерігався 22 липня. На карті абсолютної топографії АТ-500 гПа для другого мінімуму *BPZ* були характерні адвекція холоду з північного сходу й адвекція тепла з південного заходу, що утворювали меридіональний контраст температур в області блокуючого процесу. Різниця температур дорівнювала 5°C . На приземній карті у цей період на південній периферії антициклону проходив фронт, який збільшував меридіональний термічний градієнт. Різниця температур між зоною блокування і за фронтом становила $11,5^\circ\text{C}$.

25 липня область блокуючого процесу мала додатне значення інтегрального потоку *BPZ* $0,49 \text{ Вт/м}^2$, що свідчить про отримання енергії антициклоном від оточуючого середовища. Можливо, такий перерозподіл енергії в зону блокуючої ситуації пов'язано з адвекцією тепла з півдня, яка спричиняла збільшення контрасту температур у південному оточенні блокуючого антициклону. Різниця температур сягає

13,8°C. У висотному термічному полі також спостерігалася адвекція тепла з півдня, яка збільшувала меридіональні термічні градієнти у південному оточенні блокінга, з якого антициклон і отримував енергію 25 липня. Контраст температур становить 6°C. Після 25 липня гребінь тепла розповсюджувався в область блокування і збільшував меридіональні контрасти температури. При цьому інтегральний потік *BPZ* мав від'ємні значення, що свідчить про відтік енергії з антициклону до оточення. З 1 серпня інтегральний потік *BPZ* став додатним і 4 серпня сягав максимального значення 0,85 Вт/м². Ймовірно це пов'язано з висотною термічною улоговиною, що простягалася з північного сходу по передній частині, південній периферії та досягає тилової частини блокуючого антициклону. Такий просторовий розподіл термічної улоговини створив значні меридіональні термічні контрасти в оточенні блокінга. І тому інтегральний потік *BPZ* отримував енергію з навколишнього середовища. Крім того, біля поверхні землі по тилій частині антициклону проходили фронти, які також збільшували меридіональні градієнти температури.

5 серпня інтегральний потік *BPZ* мав знову від'ємні значення, тобто енергія від блокінга передавалася до оточення. При цьому у висотному термічному полі мала місце адвекція тепла з півдня, яка розповсюджувалася у зону блокуючого процесу, тим самим, збільшувала там меридіональні термічні градієнти.

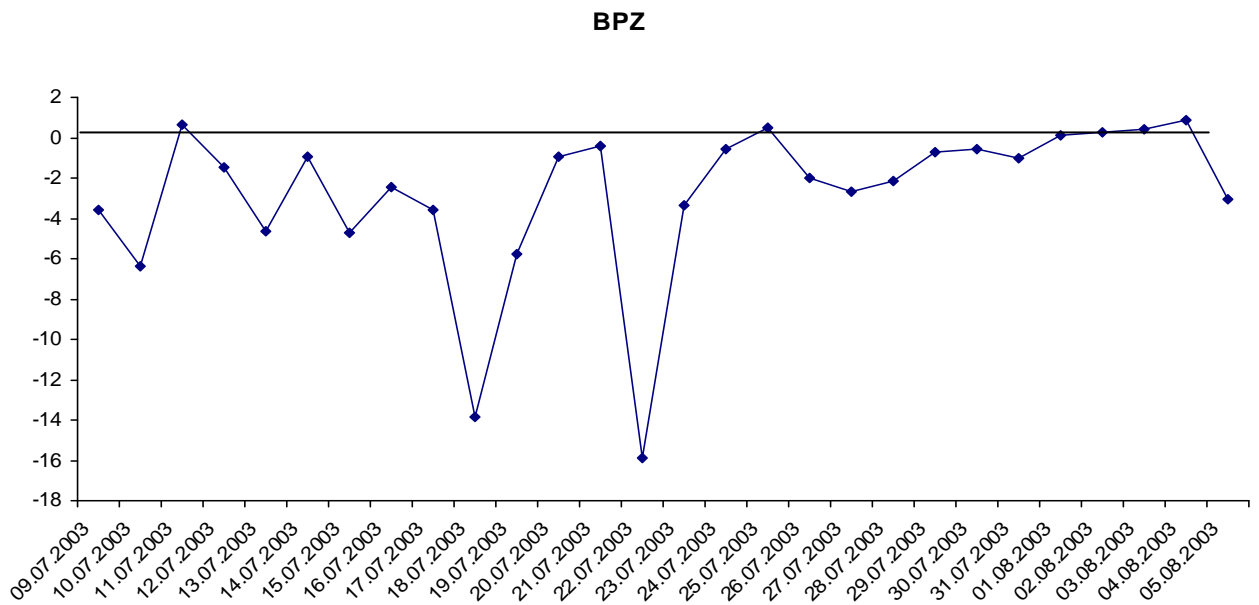


Рис. 3 – Інтегральний потік *BPZ*, Вт/м².

Інтегральний потік *BPE* мав в середньому від'ємні значення на початку періоду дослідження (рис. 4). Отже, відбувався відтік вихрової потенціальної енергії з району дослідження. Найменше значення *BPE* за весь період існування блокуючого процесу спостерігається 9 липня і дорівнює -1,99 Вт/м². Ймовірно, це пов'язано з великими горизонтальними градієнтами температури біля поверхні землі, які утворилися внаслідок приближення циклону і фронтів до зони блокуючого антициклону. Контраст температур між блокінгом та його південною периферією при цьому дорівнює 6,9-7,4°C. На карті висотного термобаричного поля також спостерігався великий горизонтальний термічний градієнт, що утворився за рахунок адвекції холоду з північного заходу й адвекції тепла з південного сходу у досліджувану область. Різниця температур між центрами термічних улоговини та гребеня становила 8°C. Далі

значення інтегрального потоку *BPE* різко змінилися і 11 липня дорівнювали $-0,33$ Вт/м². Така зміна інтегрального потоку вихрової потенціальної енергії відбувалася при зменшенні горизонтальних термічних градієнтів як біля поверхні землі, так і у висотному термічному полі. 13 липня по південній периферії блокуючого процесу зміщувалася система фронтів, які збільшували горизонтальні термічні градієнти біля землі, і як наслідок, збільшувалися від'ємні значення потоку *BPE*. У висотному полі 13 липня мав місце термічний гребінь, який розповсюджувався з півдня далеко на північ, тим самим, збільшував горизонтальний контраст термічного поля.

Інтегральний потік *BPE* в другий період дослідження в основному мав від'ємні значення, що свідчить про відтік енергії з області дослідження. 16 липня значення потоку вихрової потенціальної енергії зменшувалося до $-2,44$ Вт/м², що є другим мінімальним значенням за весь період дослідження. Другий мінімум *BPE* пов'язано з адвекцією холоду з північного сходу у передню частину блокуючого антициклону, яка збільшувала горизонтальний термічний контраст у зоні дослідження як на висотах, так і біля землі. Крім того, на приземній карті мав місце холодний фронт. Різниця температур на карті АТ-500 гПа дорівнює 6°C , а на приземній – $8,6^{\circ}\text{C}$.

Найбільше додатне значення інтегрального потоку *BPE* за весь період дослідження спостерігалось 21 липня і дорівнювало $0,15$ Вт/м². Додатні значення потоку вихрової потенціальної енергії свідчать про отримання енергії з оточення антициклону. Дійсно, на південній периферії антициклону біля землі мала місце система фронтів, де спостерігалася зміна температури в горизонтальній площині з $16,2$ до $23,0^{\circ}\text{C}$. 24-25 липня потік *BPE* також мав додатні значення, що є наслідком збільшення горизонтальних термічних градієнтів у оточенні антициклону за рахунок адвекції тепла з південного заходу та південного сходу. Контраст температур становить $10-14^{\circ}\text{C}$. Додатні значення інтегрального потоку *BPE* 1-3 серпня можна пояснити адвекцією холоду з північного сходу, яка збільшувала горизонтальні термічні градієнти в оточенні антициклону, з якого він і отримував вихрову потенціальну енергію.

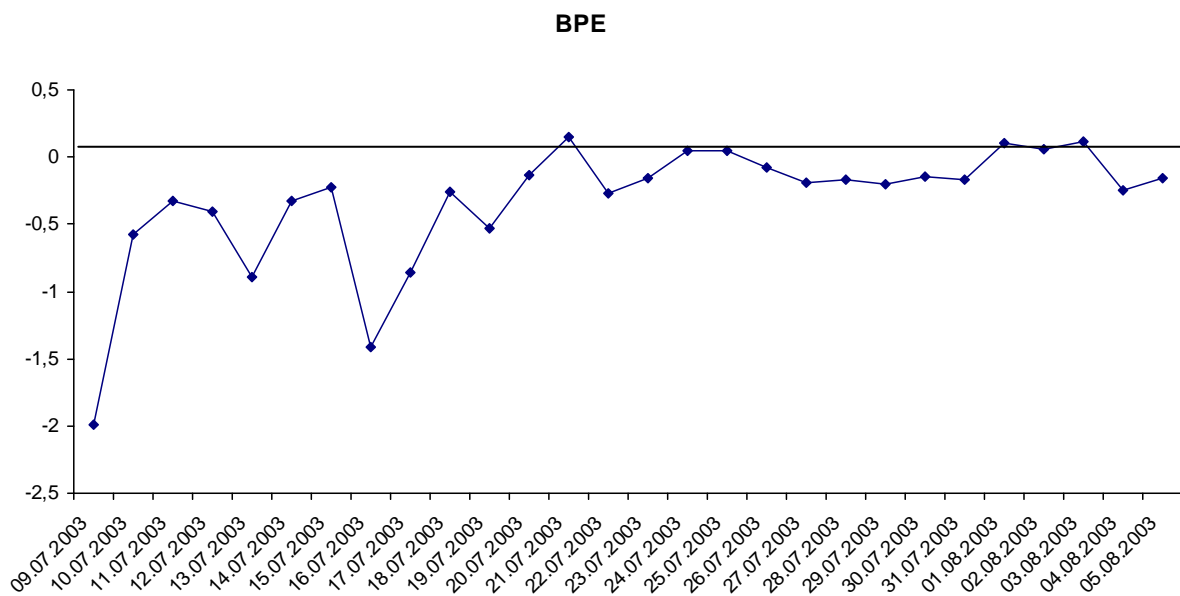


Рис. 4 – Інтегральний потік *BPE*, Вт/м².

Інтегральний потік *BKZ* на початку періоду дослідження мав від'ємні значення (рис. 5), що свідчить про відтік зональної кінетичної енергії з області блокування до оточення блокуючого антициклону. Ймовірно це пов'язано з посиленням 10 липня струминної течії в районі блокінга. Додатний потік *BKZ* спостерігався 11-12 липня і

сягав максимального значення $2,68 \text{ Вт/м}^2$ за весь період дослідження, що відповідає отриманню даного виду енергії антициклоном із свого оточення. Причиною такого розподілу *BKZ*, можливо, є посилення струминної течії та зонального потоку на південній периферії блокуючого антициклону, в наслідок чого збільшувався градієнт швидкості вітру між оточенням та блокінгом. В середній тропосфері у цей час посилювався висотний антициклон, для чого необхідна додаткова енергія, яку досліджувана область забирала з оточення.

Інтегральний потік *BKZ* в другий період в основному мав від'ємні значення, що дозволяє стверджувати про відтік зональної кінетичної енергії з району дослідження. Після 12 липня *BKZ* різко зменшувався і 19 липня мав найменше значення $-4,59 \text{ Вт/м}^2$ за весь період існування блокуючої ситуації. У цей час в області блокування посилювалася струминна течія, що спричинило зростання градієнта швидкості вітру у районі дослідження. З 20 липня значення інтегрального потоку *BKZ* збільшувалися. Додатні значення *BKZ* мали місце 21-23 липня. Цей період характеризувався посиленням приземного і висотного антициклону, для чого необхідна додаткова енергія, яку досліджувана область забирала з оточення. Після 22 липня інтегральний потік *BKZ* зменшувався, став від'ємним і 31 липня дорівнював $-2,11 \text{ Вт/м}^2$. У цей час блокуючий антициклон знаходився на стадії максимального розвитку і відбувався відтік зональної кінетичної енергії із області блокування. 1 серпня інтегральний потік *BKZ* мав додатне значення, що свідчить про отримання блокінгом середньої кінетичної енергії від оточення. Такій зміні *BKZ* відповідало руйнування блокуючого процесу і формування в області дослідження висотного циклону. З 5 серпня відбувалася перебудова висотного баричного поля.

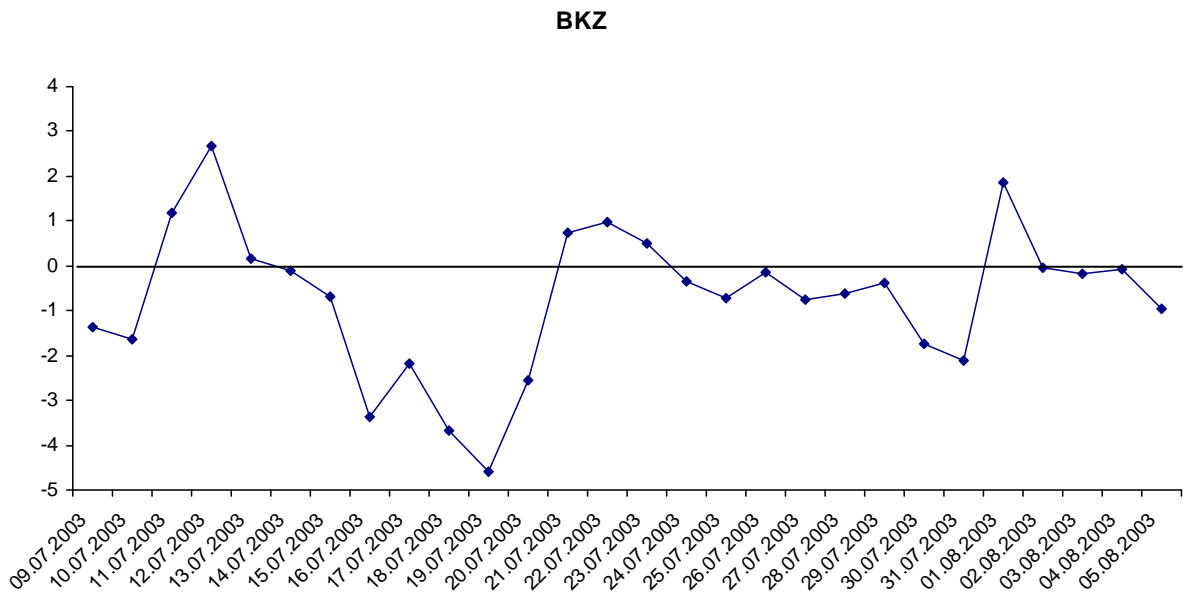


Рис. 5 – Інтегральний потік *BKZ*, Вт/м².

Інтегральний потік *BKE* мав додатні значення і тільки 12 липня потік вихрової кінетичної енергії від'ємний у перший період дослідження (рис. 6). Додатний *BKE* свідчить про отримання антициклоном даного виду енергії від оточення. У цей час навколо блокуючого процесу спостерігалися циклони з системою фронтів біля землі. Ймовірно, ця система і підживлювала енергією область блокування. 12 липня відбулося заповнення циклону біля землі та послаблення фронтальної діяльності у оточенні блокінга. 13-14 липня фронтогенез знову набрав силу в оточенні блокуючого процесу.

В середньому *BKE* додатний в перший період дослідження, отже, область забирала вихрову кінетичну енергію з оточення.

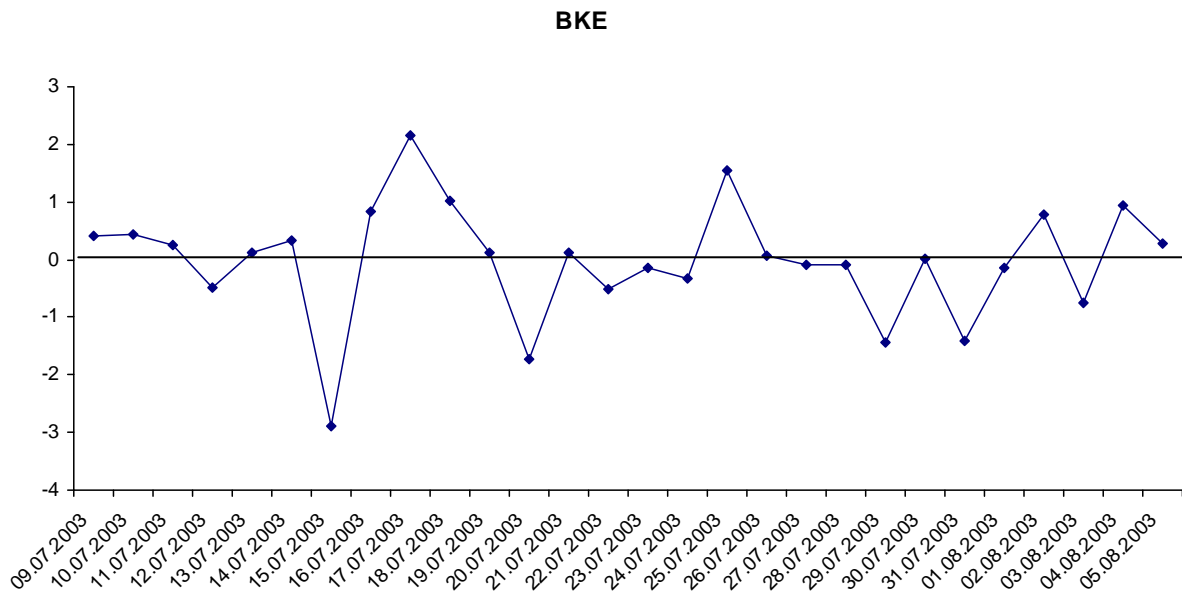


Рис. 6 – Інтегральний потік *BKE*, Вт/м².

Інтегральний потік *BKE* в другий період дослідження мав як додатні, так і від'ємні значення. 15 липня інтегральний потік вихрової кінетичної енергії мав мінімальне від'ємне значення $-2,88$ Вт/м². У цей час циклогенез та фронтогенез в оточенні антициклону практично відсутній, а сам блокінг посилювався і віддавав енергію. 16-17 липня в оточенні блокуючого процесу знову посилювалася циклонічна і фронтальна діяльність, яка підживлювала антициклон і інтегральний потік *BKE* мав додатні значення, які досягають $2,16$ Вт/м² і є максимальними за весь період дослідження. З 18 до 20 липня відбулося посилення блокуючого процесу, тим самим збільшувалася потужність блокінга і формувалися від'ємні значення *BKE*.

21 та 25 липня інтегральний потік *BKE* мав додатні значення, що, напевно, пов'язано з посиленням у ці дати циклонічної та фронтальної діяльності у оточенні блокуючого процесу. В період з 29 до 31 липня блокуючий антициклон знаходився на стадії максимального розвитку і віддавав вихрову кінетичну енергію у своє оточення. 1, 2 та 4 серпня на півночі та півдні блокуючий антициклон оточували циклони з фронтами, і таким чином підтримували блокінг своєю енергетикою. 3 серпня значення інтегрального потоку *BKE* від'ємні, чому відповідало антициклонічне поле навколо блокуючої ситуації. У цей час блокуючий процес віддавав вихрову кінетичну енергію.

Висновки. Інтегральний потік *BPZ* має додатні значення на початковій стадії розвитку блокуючої ситуації, стадії заповнення циклону, при збільшенні меридіональних термічних градієнтів при адвекції тепла або холоду в оточенні блокуючого процесу. *BPZ* має від'ємні значення при адвекції холоду з півночі та адвекції тепла з півдня, що збільшує меридіональні термічні градієнти в області блокуючого процесу, а також при приближенні циклонів та пов'язаних з ними фронтів до зони блокування.

Інтегральний потік *BPE* має додатні значення і отримує енергію при наявності в оточенні блокуючого процесу інтенсивної фронтальної діяльності і при адвекції холоду або тепла в оточення блокінга. Ці процеси збільшують горизонтальні термічні градієнти у оточенні блокуючого антициклону. *BPE* зменшується і має від'ємні значення при приближенні до зони блокування приземного циклону із серією фронтів,

а також при адвекції холоду або тепла в область блокуючої ситуації. При таких процесах блокуючий антициклон віддає вихрову потенціальну енергію.

Інтегральний потік *BKZ* збільшується і має додатні значення при посиленні струминної течії та зонального потоку на південній периферії антициклону, що, в свою чергу, збільшує градієнт швидкості вітру між оточенням блокінга і самим антициклоном. Блокуючий процес також може отримувати зональну кінетичну енергію при посиленні антициклонального баричного поля. *BKZ* має від'ємні значення при посиленні струминної течії в області блокуючої ситуації, тим самим збільшуючи градієнт швидкості вітру в зоні блокування. При цьому відбувається відтік середньої зональної кінетичної енергії від області блокуючого процесу.

Інтегральний потік *BKE* має додатні значення за наявності та посиленні в оточенні антициклону циклонічної та фронтальної діяльності. При таких процесах блокінг отримує вихрову кінетичну енергію із свого оточення. *BKE* зменшується і має від'ємні значення на стадії заповнення циклону біля землі та при послабленні фронтогенезу в оточенні блокуючого процесу, а також при посиленні та на стадії максимального розвитку антициклону. При таких процесах блокінг віддає вихрову кінетичну енергію і підживлює процеси, які відбуваються в його оточенні.

Список літератури

1. Lorenz E.N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation // *Tellus*. – 1955. – Vol. 7. – P. 157-167.
2. Michaelides S.C., Prezerakos N.G., Flocas Y.A. Quasi-Lagrangian energetics of an intense Mediterranean cyclone // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* – 1999. – Vol. 125. – P. 139-168.
3. Хохлов В.М. Энергетика атмосферы: Конспект лекций. – Одеса: Екологія. – 2008. – 62 с.
4. Хохлов В.Н. Энергетический бюджет антициклонов в процессе их эволюции // *Метеорология, климатология и гидрология*. – 1999. – Вып. 38. – С. 47-54.
5. Семенова I.Г. Энергетичні процеси в атмосфері протягом природно-синоптичних періодів // *Метеорология, климатология и гидрология*. – 2002. – Вып. 46. – С. 54-59.
6. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат. – 1970. – 259 с.

Интегральные переносы различных видов энергии в период блокирования атмосферных процессов.

Антоненко В.С., Недострелова Л.В.

Рассчитаны и проанализированы интегральные переносы различных видов энергии через боковые границы блокирующего антициклона над территорией Европы.

Ключевые слова: энергетика атмосферы, интегральные переносы энергии, блокирующий антициклон.

Integral transfers of different types of energy in the period of atmospheric processes blocking

Antonenko V.S., Nedostrelova L.V.

The integral transfers of different types of energy through the lateral boundaries for blocking anticyclone above territory of Europe are calculated and analysed.

Keywords: energy of atmosphere, integral transfers of energy, blocking anticyclone.