

## РОЛЬ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ АТМОСФЕРИ В ПРОЦЕСАХ ВІДСІЧЕНОГО ЦИКЛОГЕНЕЗУ ВЛІТКУ НАД УКРАЇНОЮ

*Представлено аналіз випадків інтенсивного циклогенезу, пов'язаного з циклонами відсікання над територією України у літній період виконаний з використанням критеріїв гідродинамічної нестійкості.*

**Ключові слова:** потенціальний вихор, абсолютний вихор, циклон відсікання, гідродинамічна нестійкість.

**Вступ.** Активна циклонічна діяльність над Україною влітку пов'язана з особливостями висотного поля тиску над Східною Європою, а саме з відсіченням осередку холодного повітря з утворенням відокремленої від основного потоку глибокої улоговини, орієнтованої на південь України [1]. Утворення в подальшому приземного циклону призводить до різкого погіршення погодних умов, часто з небезпечними та стихійними явищами (сильні зливи, град, шквали тощо).

В теоретичних дослідженнях енергетики цикло- та антициклогенезу прийнято вважати, що розміри збурень, здатних зростати у повітряному потоці заданої стратифікації, визначаються довжиною хвилі, яка має найбільший показник зростання в спектрі нестійкості даного потоку [2]. Сам по собі показник зростання найбільш нестійкої хвилі визначає швидкість зростання збурення на початковій стадії, коли нелінійні взаємодії ще не відіграють суттєвої ролі. Інтерес представляє порівняння розрахованих за реальними даними характеристик атмосферних збурень, що розвиваються, з параметрами найбільш нестійких хвиль у спектрах великомасштабних потоків на момент утворення збурень. Зазвичай в дослідженнях атмосферної нестійкості передбачається, що в атмосфері існує зональний потік, який описується одним з видів гідродинамічної нестійкості: бароклінною, баротропною або комбінованою баротропно-бароклінною нестійкістю, які можна оцінити за допомогою модельних критеріїв [2-4].

**Мета роботи** полягає в оцінці інтенсивності циклогенезу у випадках відсічених циклонів у теплий період року над територією України за допомогою кількісних критеріїв, що характеризують різні види гідродинамічної нестійкості атмосфери.

**Об'єкти дослідження та вихідні матеріали.** Розглянуто розвиток 4 випадків циклонів відсікання з 2001 по 2011 рр., що утворилися над територією України в літній період року [1,5]. В усіх випадках в процесі еволюції спочатку спостерігалась локалізація осередку холоду в середній тропосфері над півднем України, потім утворювався висотний циклон, який за сприятливих гідродинамічних умов розповсюджувався до поверхні землі. Оцінка гідродинамічної нестійкості атмосфери в період розвитку таких циклонів проведена за допомогою критеріїв Філіпса, Релея-Куо, Чарні-Стерна, які характеризують відповідно умови реалізації бароклівної, баротропної та бароклінно-баротропної нестійкості.

Вихідними даними для розрахунку критеріїв слугували поля ре-аналізу центру NCEP/NCAR температури, абсолютного вихору, складових швидкості вітру з кроком сітки 2.5x2.5 градуси, на рівнях 700, 600, 500,400,300, 250 гПа, отримані за допомогою бібліотеки IRI/LDEO (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/>)

**Методи дослідження.** Дослідження виконані на основі відомих робіт [2-4], що дає змогу встановити універсальність чисельних оцінок та використання в

прогностичній практиці критеріїв баротропної та бароклінної нестійкості. Розрахунки засновані на попередній оцінці повторюваності та інтенсивності процесів літнього швидкого циклогенезу та аналізі профілей відносного та потенційного вихорів [1, 5-7] у циклонах відсікання.

Для баротропної нестійкості кінетична енергія зонального потоку є головним джерелом енергії збурень. Швидкість потоку змінюється в горизонтальному напрямку, вертикальний зсув вітру відсутній, потік вважається гідростатичним та геострофічним, а збурення, які мають в ньому місце, квазігеострофічними та бездивергентними. Критерій стійкості визначається теоремою Го: баротропний потік є стійким, якщо його абсолютний вихор монотонно змінюється з широтою. Інакше кажучи, критерієм нестійкості основного потоку відповідно є немонотонність профілю абсолютного вихору, і визначається наявністю екстремуму абсолютного вихору в горизонтальному потоці (критерій Релея-Куо) [8]:

$$\frac{\partial \Omega_a}{\partial y} = \beta - \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} = 0, \quad (1)$$

де  $\Omega_a$  – абсолютний вихор швидкості;  $u$  – зональна складова швидкості потоку;

$\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$  – параметр Россбі;  $l$  – параметр Коріоліса;  $\Omega_a = \Omega + l$ ;  $\Omega$  – відносний вихор швидкості.

При цьому ставиться умова непротікання через межі широтної смуги, в якій задається профіль зональної швидкості [8].

Реалізація бароклінної нестійкості при малих числах Россбі характерна для процесів синоптичного масштабу – циклонів та антициклонів. Модель Чарні [9] враховує  $\beta$ -ефект та стислість атмосфери через рівняння нерозривності, тому сформульована умова для розв'язання задачі про бароклінну нестійкість зонального потоку досить повно характеризує процеси реальної атмосфери:

$$\frac{\partial}{\partial y}(q_g + f) = 0, \quad (2)$$

де  $\bar{q}_g$  – відносний квазігеострофічний потенціальний вихор;  $f$  – квазігеострофічний абсолютний потенціальний вихор.

В реальній атмосфері умова (2) майже завжди виконується, тобто похідна  $(\bar{q}_g + f)$  в межах помірних широт декілька разів може змінювати знак по широті, що означає постійну бароклінну нестійкість атмосферної течії [2].

Обидві умови (1) та (2) є необхідними для здійснення певного виду нестійкості, але слід враховувати також умову достатності, а саме перехід через нуль повинен відбуватися від додатних до від'ємних значень меридіонального градієнта абсолютного або потенціального вихору.

В даній роботі для практичних розрахунків критерій Чарні-Стерна використаний у вигляді [2].

$$\frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

де  $q$  – потенційний вихор Ертеля;  $q = (\Omega + l) \frac{\partial \theta}{\partial p}$ .

Для оцінки властивостей фонового потоку, який виступає джерелом енергії для збурень синоптичного масштабу, доволі часто застосовується критерій нестійкості Філіпса [2-4, 10].

Цей критерій дає оцінку енергії барокліної нестійкості потоку в двошаровій моделі та базується на порівнянні двох параметрів:

$$\delta p_1 = U_1 - U_3$$

$$\delta p_2 = 0,124 C_p \frac{\theta_1 - \theta_3}{2R\omega} \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi}, \quad (4)$$

де  $U_1$  та  $U_3$  – зональні складові швидкості вітру відповідно на поверхнях 250 та 750 гПа;  $R$  – радіус Землі;  $\omega$  – кутова швидкість обертання Землі;  $\theta_1$  та  $\theta_3$  – потенціальні температури на поверхнях 250 та 750 гПа;  $\varphi$  – широта.

За міру нестійкості береться різниця

$$\delta p = \delta p_1 - \delta p_2. \quad (5)$$

Чим більше значення  $\delta p$ , тим більш нестійким є потік. Характер розподілу  $\delta p$  відповідає розподілу струминних течій, які є найбільш енергоактивними зонами. Положення областей максимальних значень  $\delta p$  над Північною півкулею в цілому узгоджується із зонами утворення циклонів [2].

**Результати та їх аналіз.** Циклогенез 26-27 червня 2011 р., що супроводжувався сильним вітром та опадами в південних та центральних областях України, був обраний як типовий для подальшого аналізу. На висотних картах погоди за цей період можна побачити відсічену улоговину з висотним циклоном на рівні 500 гПа, в області якої протягом доби біля поверхні землі утворився глибокий та інтенсивний циклон. На карті ВТ-500/1000 в районі утворення циклону присутній осередок холоду. Мінімальний тиск у циклоні становив 996 гПа (рис. 1).

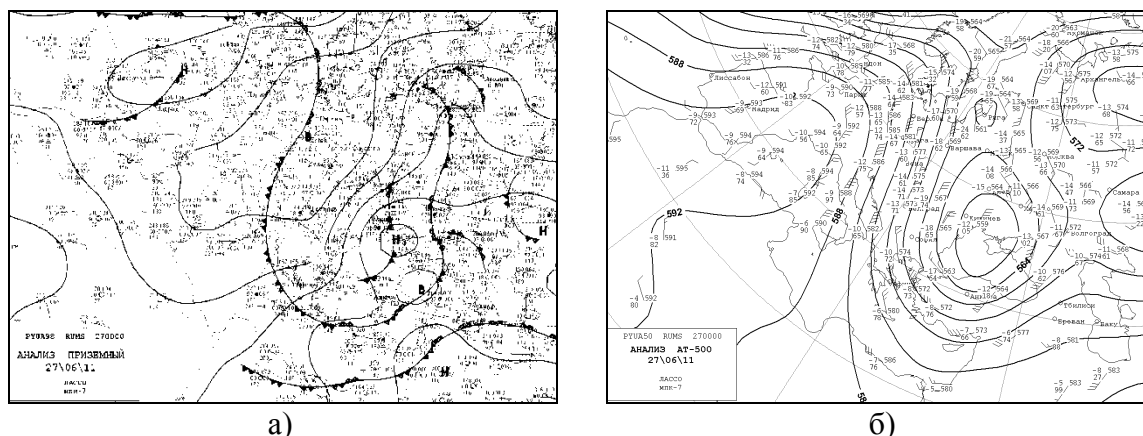


Рис. 1 - Синоптичні карти за 27.06.2011 р.: приземна (а) і АТ-500 (б)

Деформований профіль інтенсивного прориву субстратосферного повітря 26 червня 2011 р. для поверхні 400 гПа показує, що в області струминної течії відбулося опускання сухого та холодного повітря на циклонічному боці струменя з одночасним висхідним рухом на теплому боці (рис. 2а). Цей процес підтверджується

даними супутникового ВП-знімку, де область низхідного прориву відповідає вузькому темному струменю у тилівій частині такої ж вузької баричної улоговини (рис. 2б).

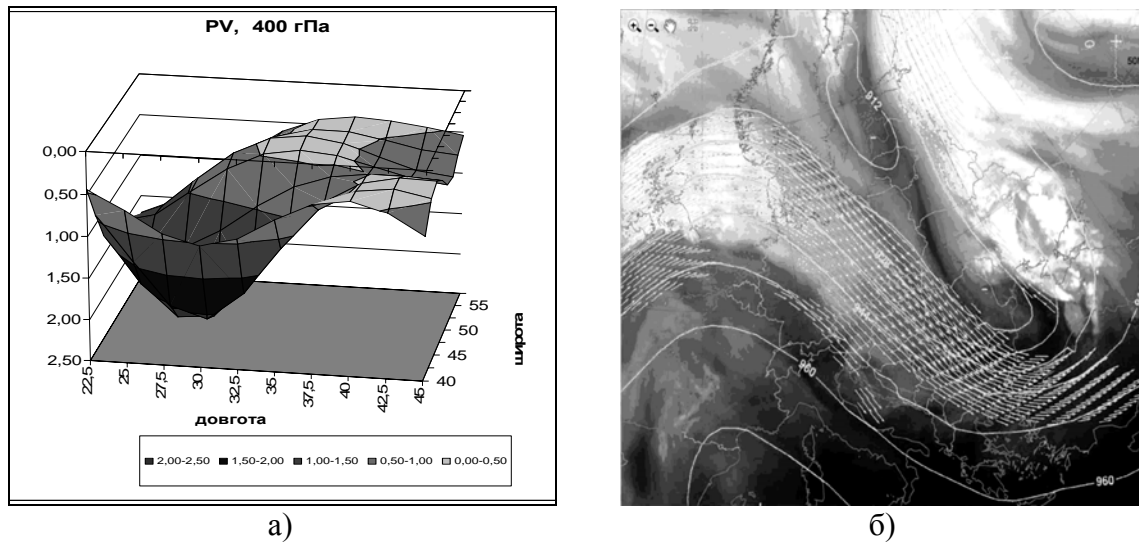


Рис. 2 - Розподіл потенціального вихору поверхні 400 гПа в області циклону (а) та ВП-знімок з полями геопотенціальної висоти і вітру на АТ-300 (б)

У статті наведено критерії барокліної та баротропної нестійкості для обраних випадків циклогенезу. Розглянемо особливості розподілу кожного з критеріїв напередодні та в день появи циклонічної циркуляції біля поверхні землі.

Значення критерію Філіпса мало змінюються поміж випадками, при цьому в найбільш інтенсивному процесі червня 2011 р. максимальні значення критерію є не найбільшими, тобто цей критерій не може виступати показником інтенсивності майбутнього циклогенезу. Цей висновок підтверджується осередненими по площі розрахунку для кожного циклону значеннями критерію Філіпса, представленими у табл. 1, де у випадку 26-27 червня осереднене значення критерію найменше з розглянутих. В усіх випадках відбувається загальне зменшення осереднених значень критерію від першого до другого дня, що відповідає процесу переходу кінетичної енергії основного потоку, яка зменшується, в кінетичну енергію циклонічного вихору, який ще не набрав своєї потужності в першу добу існування.

Таблиця 1 – Критерій Філіпса ( $m \cdot s^{-1}$ ), осереднений по площі циклону

Дата	2004 р.		2010 р.		2011 р.		2011 р.	
	19.09	20.09	23.07	24.07	26.06	27.06	13.08	14.08
$\delta\varphi$	18,5	17,3	21,2	19,4	15,4	12,0	20,7	17,9

На рис. 3 представлені поля критерію Філіпса, розрахованого за формулою (3), зірочкою позначений центр приземного циклону. У всіх розглянутих ситуаціях схожі особливості, спричинені наявністю одноманітної структури висотного баричного поля – висотного циклону. Центру приземного циклону відповідає область малих значень критерію, що зумовлено малими швидкостями вітру в центрі висотного циклону, а найбільші значення критерію спостерігаються на південь від приземного центру, в зоні активної ділянки висотно-фронтальної зони (ВФЗ) на периферії висотного циклону.

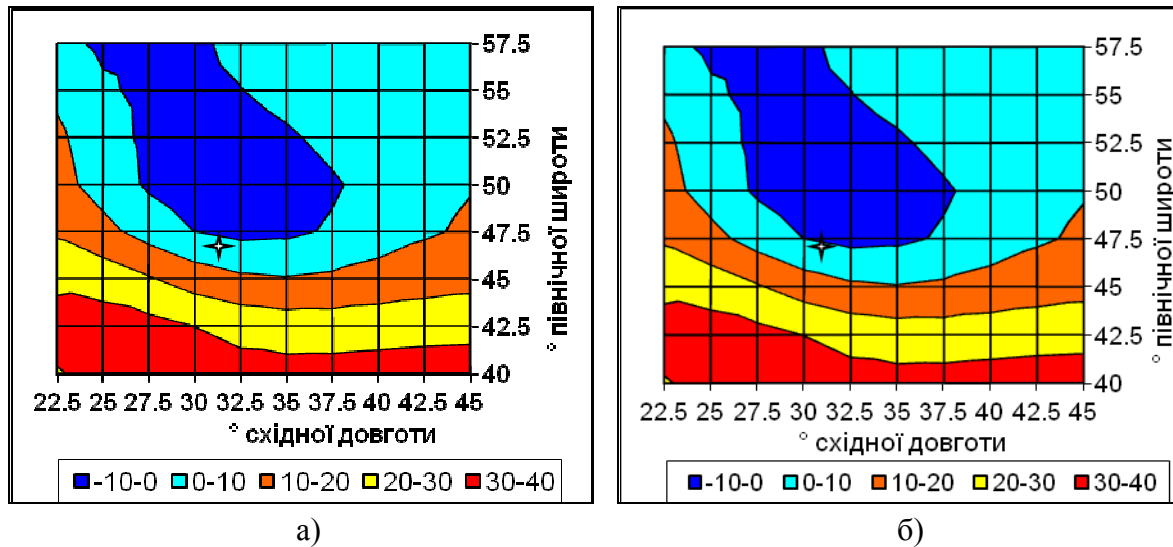


Рис. 3 - Поля критерію Філіпса ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) для випадку циклогенезу 26.06.2011 р. (а), 27.06.2011 р. (б)

В процесі розвитку циклонічної циркуляції від 26 до 27 червня 2011 р. відбулося збільшення градієнтів тиску в усій тропосфері, що призвело до посилення поля критерію Філіпса в день утворення приземного циклону. В інших випадках додатні значення критерію на периферії висотного циклону були більшими напередодні утворення приземного циклонічного вихору.

Розрахунок критерію Релея-Куо за формулою (1) для визначення ступеня баротропної нестійкості зонального потоку в нашому випадку має деякі особливості, адже за наявності висотного циклону потік сильно відхиляється від зонального положення. Найбільш цікавими є передня (східна) і тилова (західна) частини висотного циклону, де відбувається найбільш інтенсивна адвекція температури та спостерігаються струминні течії. Для 4-х випадків циклогенезу були розраховані поля критерію Релея-Куо для випадку циклогенезу та виділені меридіональні профілі критерію по трьох довготах, які відповідають меридіональному положенню ВФЗ в тилівій та передній частинах висотного циклону, а також центру приземного вихору.

В усіх випадках умова нестійкості зонального потоку виконується – абсолютний вихор швидкості змінюється вздовж кожної з виділених довгот, при цьому перехід від додатних до від’ємних значень похідної відбувається в межах  $45\text{--}47^\circ$  півн.ш. Так, 26-27 червня 2011 р. (рис. 4) на довготі  $22,5^\circ$  сх.д. (тобто в тилівій частині циклону) похідна абсолютного вихору майже всюди від’ємна, найбільша нестійкість відповідає центру циклону. Загалом, похідна  $\partial\Omega_a/\partial u$  має додатні значення в низьких широтах, перший екстремум досягається між  $42,5$  та  $47,5^\circ$  півн.ш. (для центральної довготи) та співпадає з положенням приземного центра циклону, далі похідна набирає від’ємних значень, між  $52,5$  та  $57,5^\circ$  півн.ш. спостерігається другий екстремум та зміна знаку похідної. Такий профіль можна вважати умовно типовим для розглянутих процесів циклогенезу, пов’язаних з відсіченою улоговиною, однак, цей висновок потребує підтвердження на більшій кількості випадків.

Аналогічний аналіз був проведений для оцінки баротропно-барокліної нестійкості потоку за допомогою розрахованих полів критерію Чарні-Стерна (2), який передбачає зміну знаку меридіональної похідної потенціального вихору в нестійкому потоці. На (рис. 5) видно, що отримані профілі для трьох виділених довгот загалом аналогічні профілям критерію Релея-Куо (рис. 4).

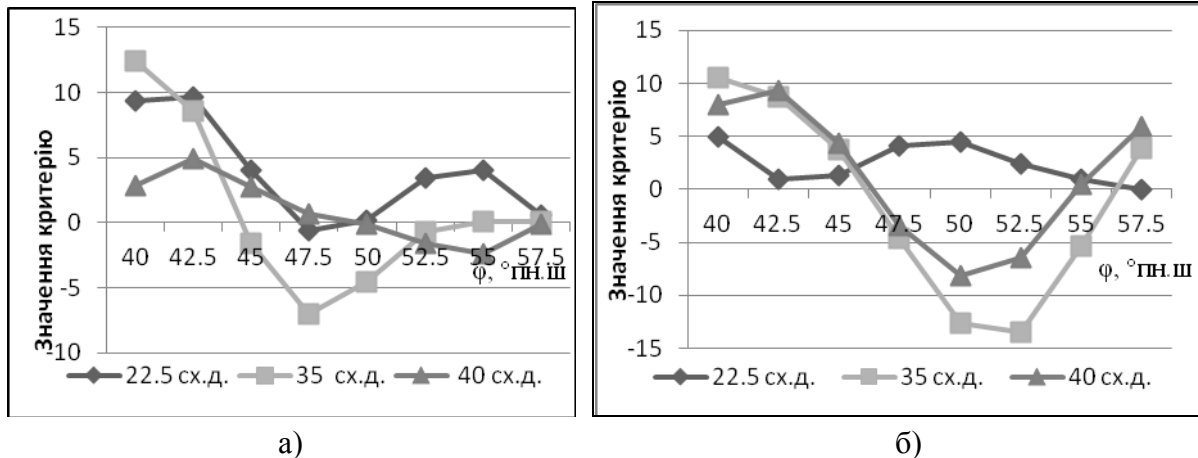


Рис. 4 - Графіки розподілу критерію Релея-Куо ( $10^{-11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ) по довготах за 26.06.2011 р. (а) та 27.06.2011 р. (б)

Нестійкість потоку чітко виражена в тилівій частині циклону, порівняно з баротропним критерієм, за яким потік тут є стійким. Тобто в розглянутих процесах циклогенезу можна вважати основним процес реалізації бароклінно-баротропної нестійкості, хоча на середньому рівні (АТ-500 гПа) задовільним є використання умови баротропної нестійкості завдяки незначній адвекції температури в висотному циклоні.

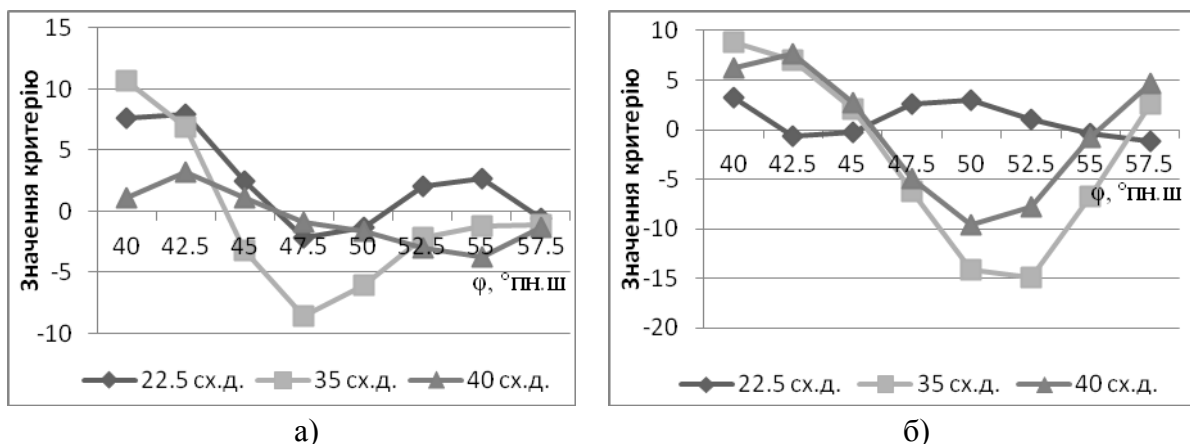


Рис. 5 - Графіки розподілу критерію Чарні-Стерна ( $10^{-11} \text{ К} \cdot \text{м} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ) по довготах за 26.06.2011 р. (а), та 27.06.2011 р. (б)

**Висновки.** Аналіз критеріїв (Філіпса, Релея-Куо та Чарні-Стерна) для різних видів гідродинамічної нестійкості дозволив виявити деякі особливості в застосуванні цих критеріїв для випадків вже існуючих висотних циклонів (улоговин). Розглянуті критерії вказували на наявність умов для реалізації бароклінно-баротропної нестійкості в області розрахунку напередодні та на початку утворення приземного циклону. При цьому критерій Філіпса був найбільшим на південній периферії висотного циклону, а в області зародження приземного центра значення цього критерію були близькими до нуля. Критерії Релея-Куо та Чарні-Стерна виконувалися для всіх розглянутих випадків на всій області висотного циклону, що свідчить про переважання механізму бароклінно-баротропної нестійкості в процесах відсіченого циклогенезу. Отримані результати можуть використовуватись при діагностуванні процесів швидкого циклогенезу над районами України.

## Список літератури

1. Семенова І.Г., Ковальков І.А. Особливості утворення циклонів влітку над Східною Європою. Актуальні проблеми сучасної гідрометеорології. // Міжнар. Наук. конф. Студ. та молод. вчених 17-19 жовтня 2012 р. - Одеса, 2012. - С. 147-148.
2. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат. – 1990. – 310 с.
3. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // Метеорология и гидрология. – 2000. - №7. - С. 5-16.
4. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. и др.. Диагностические исследования и моделирование процессов циклогенеза, фронтогенеза и погодных условий на различных стадиях развития циклонов // Труды ГМЦ РФ. – 2000. – Вып. 335 – С. 3-25.
5. Ковальков І.А. Умови літнього циклогенезу над Східною Європою. // Матеріали конференції молодих вчених. 9-13 квітня 2012 р. – Одеса, 2012. – С 154.
6. Ковальков І.А. Поля относительного вихря скорости в периоды активного циклогенеза над Европой // Збірник статей за матеріалами студ. наук. конф. ОДЕКУ 6-16 квітня 2011р. – Одеса 2011. – С. 8-11.
7. Семенова І.Г., Ковальков І.А. Физические аспекты быстрого циклогенеза над Украиной 26-27 июня 2011 г. Сб. научн. трудов Sworld. Одесса. – 2012. – Т. 49. - С. 80-93.
8. Грушевский О.Н., Ешану А.Е. Параметры зональных потоков, спектры баротропной и бароклинной неустойчивости на  $\beta$  – и  $f$ -плоскостях для циклогенеза различной интенсивности // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2010. - Вип. 9. – С. 124-133.
9. Charney J. G., Stern M. E. On the instability of internal baroclinic jets in a rotating atmosphere. // J. Atmos. Sci. - 1962. — Vol. 19. — No. 2. — P. 159-172.
10. Kuo H.L. Dynamic instability of two dimensional nondivergent flow in a barotropic atmosphere. // J. Meteorol., 1949. – vol. 6. – No. 2. – P. 159-172.

### **Роль гидродинамической неустойчивости атмосферы в процессах циклонов отсечения летом над Украиной. Івус Г.П., Семёнова І.Г., Ковальков І.А.**

*Представлен анализ случаев интенсивного циклогенеза, связанного с циклонами отсечения над территорией Украины в летний период, выполненный с использованием критериев гидродинамической неустойчивости.*

*Ключевые слова: потенциальный вихрь, абсолютный вихрь, циклоны отсечения, гидродинамическая неустойчивость.*

### **The role of hydrodynamic instability of the atmosphere in the cut off low process in summer over Ukraine. Ivus G.P., Semenova I.G., Kovalkov I.A.**

*The analysis with using the criteria of hydrodynamic instability for the cases of intensive cyclogenesis, related with cut-off low over territory of Ukraine in summer is presented.*

*Keywords: potential vorticity, absolute vorticity, cut-off low, hydrodynamic instability.*