

УДК 551-515.9

## ГІДРОДИНАМІЧНА НЕСТІЙКІСТЬ В ОБЛАСТІ ВИСОТНИХ ЦИКЛОНІВ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПОГОДУ

**Г. П. Івус**, канд. геогр. наук, професор, завідувач кафедурою

**Г. В. Хоменко**, канд. геогр. наук, доцент

**І. А. Ковальков**, аспірант

**Є. В. Сосмій**, магістр

*Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, meteo@odeku.edu.ua*

Висотні циклони є маловивченими баричними утвореннями, але вони суттєво впливають на формування погодних умов в Україні. В даній роботі досліджується еволюція висотного циклону, з яким пов'язані поширені зони опадів з грозами над районами Західної Європи та України. Метод дослідження базується на використанні лінійної теорії гідродинамічної нестійкості зонального потоку з хвилями Россбі.

Показано, що гідродинамічна нестійкість як баротропна, так і бароклінна, в зональному потоці з хвилями Россбі приводить до загострення атмосферних процесів, що проявляється в посиленні інтенсивності опадів і в поширенні зон їх формування.

**Ключові слова:** висотний циклон, хвилі Россбі, зона опадів, гідродинамічна нестійкість, абсолютний вихор, критерій Філіпса.

### 1. ВСТУП

В останні роки небезпечні явища погоди на території України нерідко бувають пов'язані з висотними циклонами, які формуються над Західною Європою. В монографії авторів [1] відзначається, що в північній півкулі найчастіше ці баричні утворення формуються біля західного узбережжя Центральної Америки і над південно-західними районами Західної Європи. Обидві ці області характеризуються переважанням північно-західної струминної течії і тенденцією до розмивання фронтів в нижніх шарах атмосфери. Дослідження атмосферних процесів над першим природним синоптичним районом показують, що в теперішній час циклони на висотах утворюються і над центральними районами Західної Європи і при зміщенні у східному напрямку суттєво впливають на погодні умови в Україні. Зокрема, з висотними циклонами бувають пов'язані сильні опади, грози та шквали [2].

Треба відзначити, що висотні циклони, незважаючи на те, що про їх існування добре знали ще на початку ХХ сторіччя, є мало вивченими синоптичними об'єктами. Добре відомі дослідження авторів [1, 3] показали, що з висотними циклонами завжди пов'язане значне погіршення погоди під східною та південно-східною їх частинами; саме тут формуються зони опадів на відміну від західної частини, де опади, як правило, відсутні.

За даними роботи [4] загострення атмосферних процесів відбувається також під східною (особливо під північно-східною) частиною висо-

тних циклонів улоговин, в яких утворюються висотні циклони. Активізація атмосферних процесів в цих баричних полях стимулює загострення процесів на фронтах і сприяє виникненню нових баричних утворень в нижній тропосфері. Цей результат отримано на основі висновків з лінійної теорії гідродинамічної нестійкості та аналізу реальних процесів [4, 5-7].

Відзначимо, що висотні циклони виникають в результаті заповнення циклону в нижній тропосфері, або завдяки відсіканню південної частини глибокої улоговини, спрямованої звичайно з півночі на південь або з північного заходу на південний схід. Такі циклони називаються циклонами відсікання (в зарубіжній літературі COLD CORELOW). Висотним улоговинам, в яких утворюється циклони, відповідають улоговини холоду з замкненими осередками, тобто висотні циклони відсікання завжди холодні [1, 3]. Із сказаного випливає, що висотні циклони виникають при загостреній меридіональності процесів, коли хвилі Россбі на фоні зонального потоку досягають великих амплітуд.

Мета даного дослідження полягає у вивченні умов виникнення та еволюції висотного циклону, з яким пов'язані інтенсивні опади над районами Західної Європи та України, а також в аналізі умов формування зон опадів над вказаними районами.

## 2. МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИХІДНА ІНФОРМАЦІЯ

Метод дослідження базується на основних результатах лінійної теорії хвиль Россбі [8, 9] та висновках лінійної теорії гідродинамічної нестійкості зонального потоку [4].

Відповідно до лінійної теорії гідродинамічної нестійкості атмосферних течій баротропна нестійкість в зональному потоці виникає тоді, коли існують меридіональні зсуви вітру, тобто коли  $\partial u / \partial y$  не дорівнює нулю. Критерій баротропної нестійкості зонального потоку має вигляд

$$\frac{\partial \Omega_a}{\partial y} = 0, \text{ або } \frac{\partial(\Omega_p + l)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

де  $\Omega_a$  - абсолютний вихор,  $\Omega_p = -\partial u / \partial y$  - відносний вихор,  $l$  - параметр Коріоліса,  $u$  - зональна складова швидкості вітру.

Останню формулу можна записати у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( -\frac{\partial u}{\partial y} + l \right) = 0. \quad (2)$$

Формула (1) означає, що в меридіональному профілі абсолютного вихору є хоча б одна точка перегину. При виконанні умови (1) зональний потік є нестійким і його кінетична енергія передається збуренням, що сприяє їх зростанню і загостренню процесів, зокрема, на фронтах.

В нашому випадку ми маємо справу з зональним потоком, в якому розповсюджуються хвилі Россбі, тому в формулі (1) відносний вихор  $\Omega_p = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ . З урахуванням цього критерій (2) набуває вигляду

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + l \right) = 0. \quad (3)$$

Бароклінна нестійкість виникає в атмосферних течіях з вертикальними зсувами вітру. При здійсненні бароклінної нестійкості доступна потенціальна енергія потоку перетворюється в кінетичну, яка призводить до зростання існуючих в потоці збурень.

Згідно з результатами теоретичних досліджень [4, 8-9] існує багато критеріїв бароклінної нестійкості, але найбільш зручним для розрахунків та аналізу є критерій Філіпса. Незважаючи на жорсткі обмеження моделі, з якої отримано цей критерій, він задовільно описує процеси, які відбуваються в реальній атмосфері. Так, за його допомогою добре виділяються найбільш енергоактивні зони; цей критерій дозволяє визначити

області, де велика ймовірність виникнення нових баричних утворень [4, 8].

Формула для критерію Філіпса має вигляд

$$\delta P = (u_1 - u_2) - \sigma \cdot \cos \varphi (\sin^2 \varphi)^{-1}, \quad (4)$$

де  $u_1, u_2$  - швидкості зонального вітру на ізобаричних поверхнях 300 і 700 гПа;  $\sigma = 0,124 C_p \delta \theta (2 \omega R_3)^{-1}$ , де  $C_p$  - питома теплоємність при  $p = const$ ,  $\delta \theta$  - різниця потенціальних температур на ізобаричних поверхнях 300 і 700 гПа,  $R_3$  - радіус Землі,  $\omega$  - її кутова швидкість обертання навколо осі.

Бароклінна нестійкість здійснюється, якщо  $\delta P$  дорівнює або перевищує  $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  влітку і  $20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  в зимовий період.

Вихідна інформація являє собою дані об'єктивного аналізу полів вітру та температури на ізобаричних поверхнях 700 і 300 гПа у вузлах географічної сітки точок з кроком  $2,5^\circ$  по широті і довготі за 21-24 липня 2014 року. При аналізі результатів використані приземні карти, карти баричної топографії, а також карти добових сум опадів за всі дні вказаного періоду.

## 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В період 21-24 липня 2014 року атмосферні процеси над Західною Європою і Україною визначилися поширеною малоградієнтною областю зниженого тиску і ділянками полярного фронту, який повільно зміщувався в південному напрямку на райони Середземноморського і Чорноморського басейнів.

На відміну від приземного баричного поля поле тиску на висотах відрізнялося значною активністю. Про це свідчить формування висотного циклону в глибокій улоговині хвилі Россбі над атлантичним узбережжям Західної Європи.

Цей циклон добре простежується на висотних картах. Так, 21.07.2014 року він окреслюється на карті АТ<sub>300</sub> двома замкненими ізогісами, а центральна частина його розташована на південь від Британських островів (рис. 1). В полі температури висотному циклону відповідає улоговина холоду з замкненим осередком (рис. 2). Тобто наш випадок являє собою класичний приклад виникнення висотного циклону в глибокій холодній баричній улоговині на південній її стороні [1].

Характерною особливістю висотних циклонів є те, що зі східними їх частинами пов'язані зони опадів, більш інтенсивні під південно-східною частиною [3]. В нашому випадку циклон пересувався з заходу на схід і зона опадів весь час залишалася саме під східною периферією (рис. 1, 3-5).

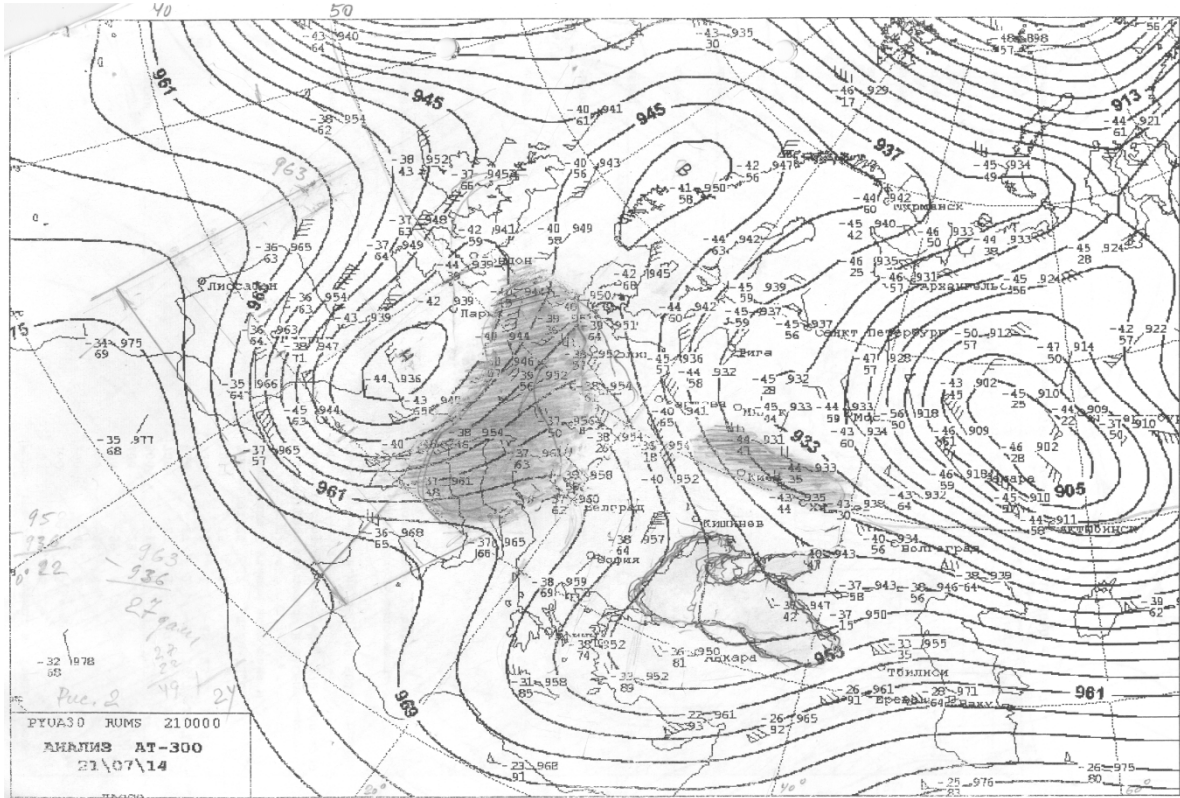


Рис. 1 – Карта АТ-300 за 00 UTC 21.07.14 р. Заштриховані області, як і на рис. 3-5, - зони опадів.

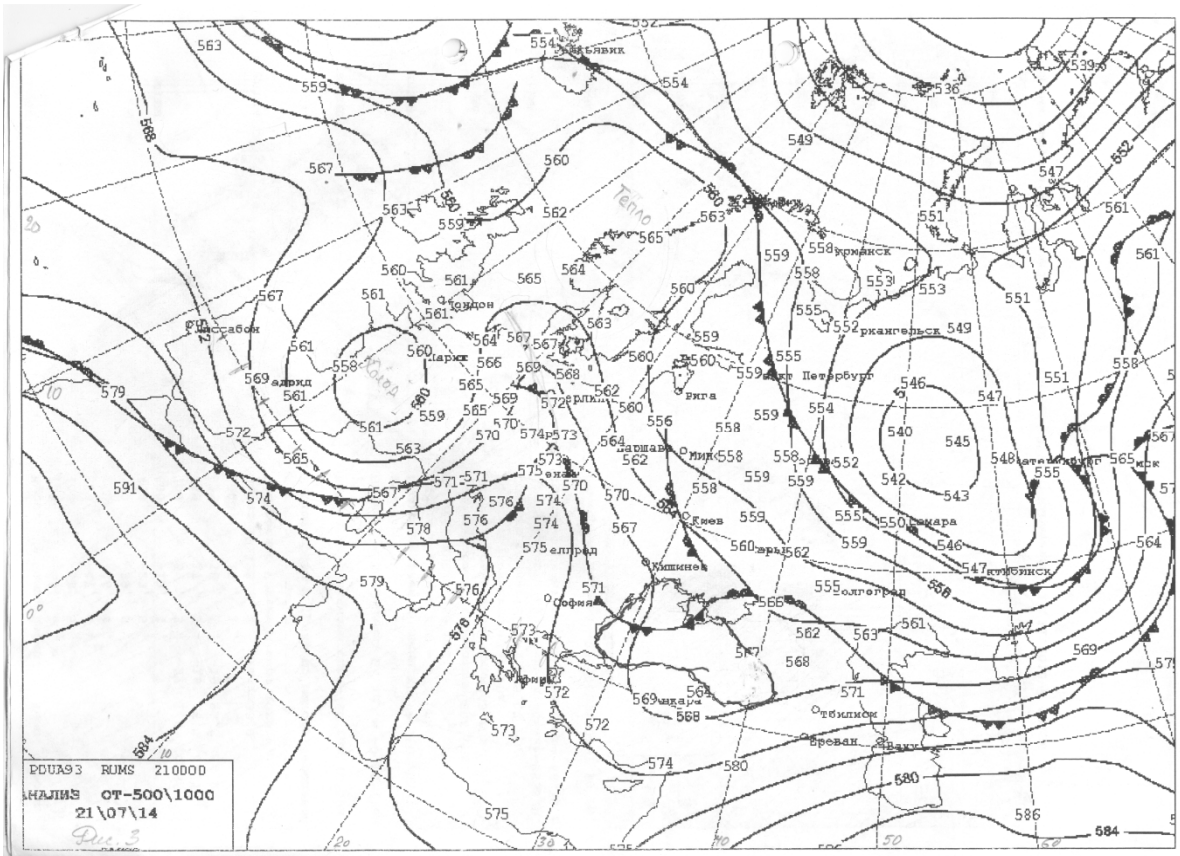


Рис. 2 – Карта ОТ-500\1000 за 00 UTC 21.07.14 р.

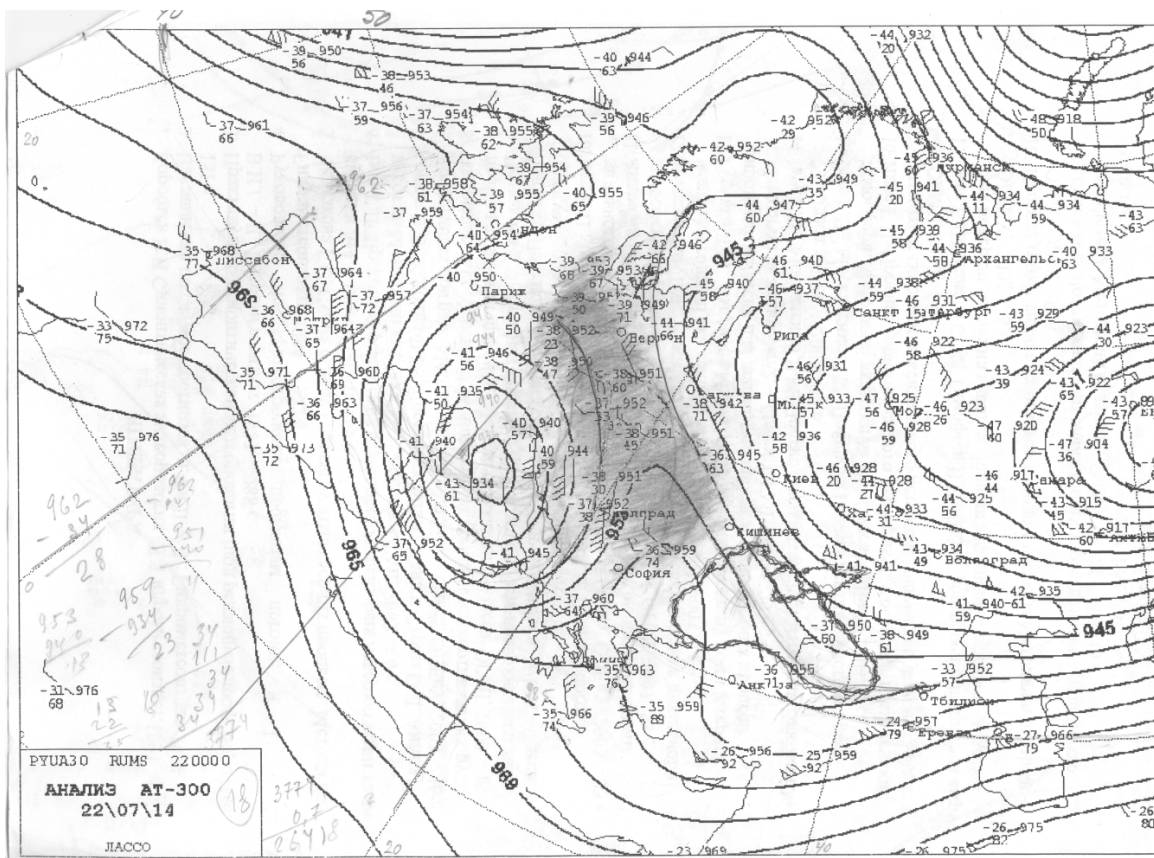


Рис. 3 – Карта АТ-300 за 00 UTC 22.07.14 р.

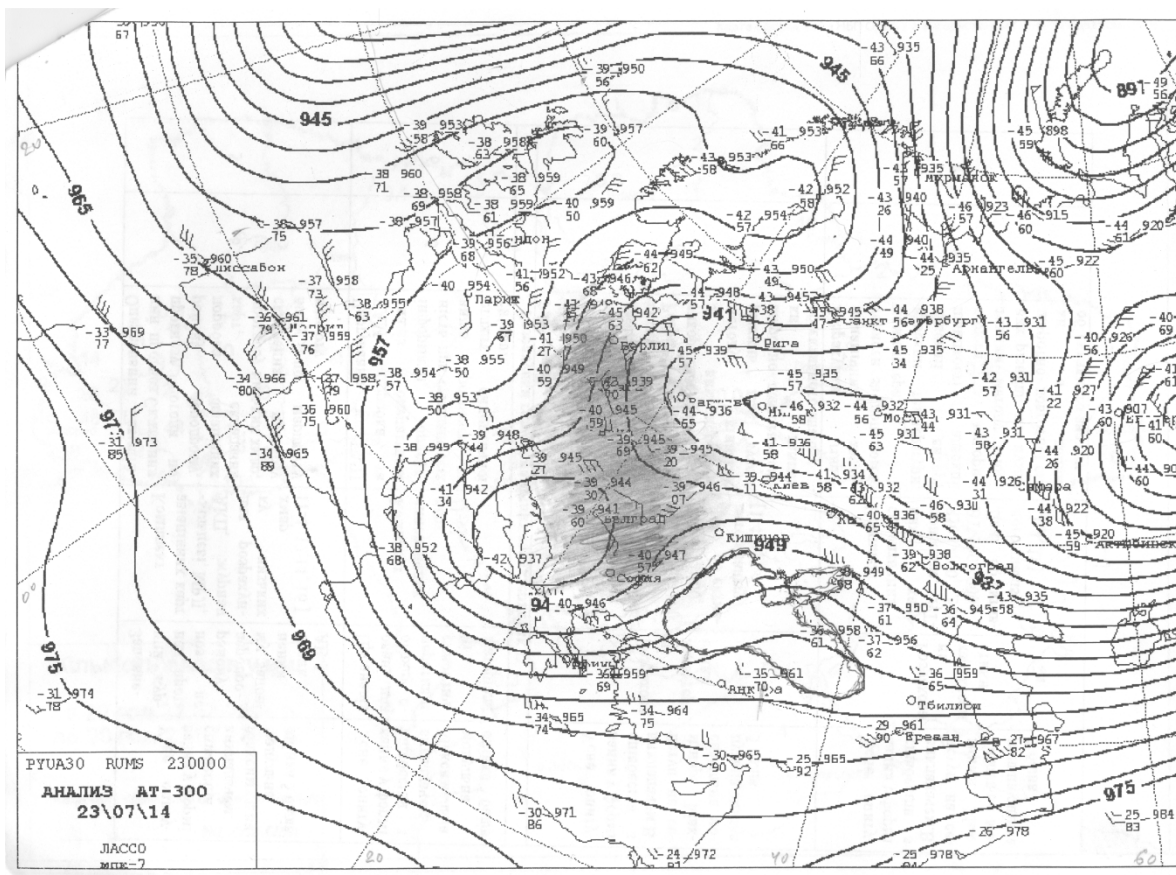


Рис. 4 – Карта АТ-300 за 00 UTC 23.07.14 р.

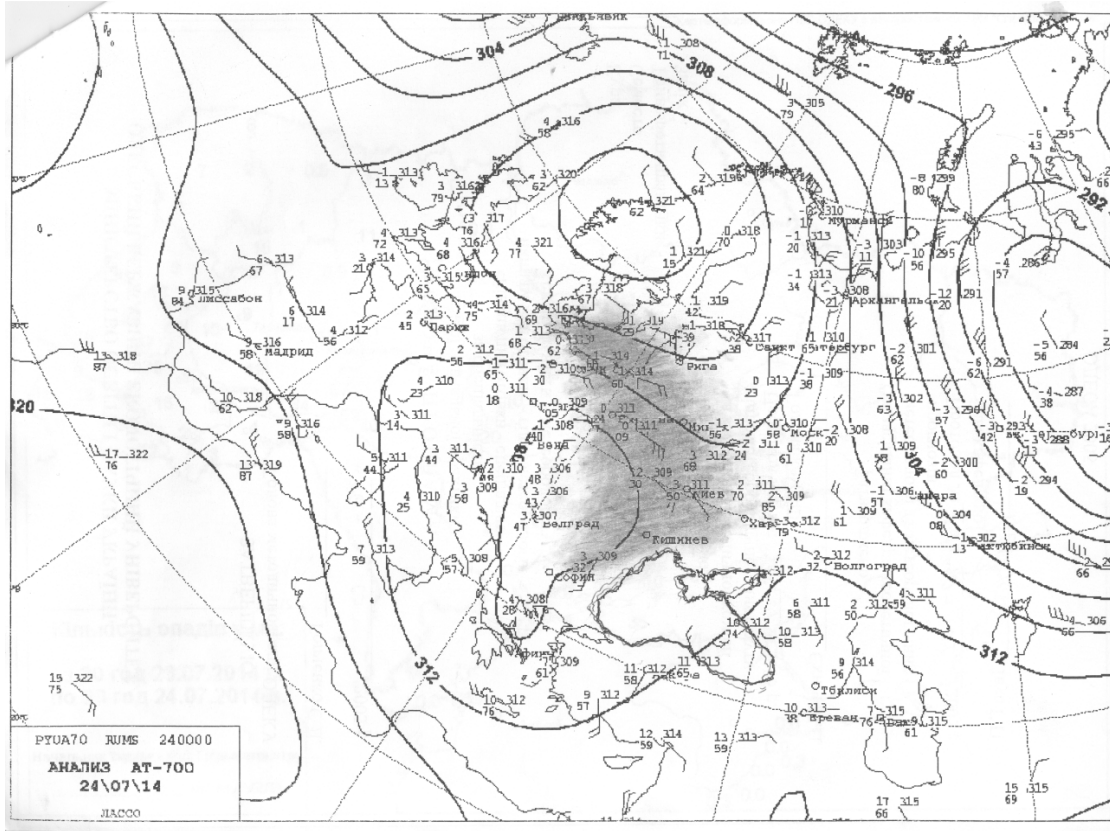


Рис. 5 – Карта АТ-700 за 00 UTC 24.07.14 р.

Відзначимо, що хвиля Россбі, в улоговині якої сформувався висотний циклони, є нестійкою, оскільки її середня довжина в широтній смузі 40-50° пн. ш. протягом перших трьох діб змінювалася від 2300 до 3100 км. Згідно з висновками роботи [4] хвилі з такими довжинами є нестійкими при вертикальних зсувах вітру в шарі між ізобаричними поверхнями 700-300 гПа більше  $8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Можливо саме нестійкість хвилі Россбі призвела до перебудови баричного поля над європейським континентом; улоговина, яка 21.07 була спрямована практично меридіонально, 23.07 набула майже зонального напрямку (рис. 1, 3-5).

Рисунки показують, що зони опадів займають велику територію, але їх розміри не можна пояснити лише впливом атмосферних фронтів. Тому в даній роботі зроблена спроба якісно оцінити роль гідродинамічної нестійкості в процесах, які відбуваються в області висотного циклону.

На основі розрахунків критерію баротропної нестійкості за формулами (2), (3) для наочності побудовані меридіональні профілі абсолютного вихору для зонального потоку і потоку з хвилями Россбі, тобто загального. В якості прикладу на рис. 6 представлені профілі  $\Omega_a$  за 24.07.14, коли зона опадів охоплювала західні, центральні і південні райони України.

Профілі, які побудовані для різних довгот, показують, що для зони опадів виконується критерій баротропної нестійкості: на довготах 17,5 і 32,5° сх. д. мають місце точки перегину на широтах близько 45 і 50° пн. ш. Це свідчить про те, що в зоні опадів баротропна нестійкість може приводити до загострення процесів, наприклад, до посилення конвективних рухів, виникнення шквалів або зростання амплітуд гравітаційних хвиль, які завжди існують в атмосфері [2, 9]. На довготі 40° сх. д., яка знаходиться поза зоною опадів, профілі мають інший вигляд, тобто в східних районах України баротропна нестійкість не може реалізуватися.

Порівняння профілів  $\Omega_a$  для зонального потоку і загального (рис. 6а, б) показує, що характер змін  $\Omega_a$  вздовж меридіану ідентичні, але в загальному потоці вони є більшими. Це означає, що в потоці з хвилями Россбі в результаті здійснення баротропної нестійкості збуренням може передаватися більше кінетичної енергії, ніж в чисто зональному.

Розглянемо результати аналізу барокліної нестійкості. Відомо, що барокліні зони пов'язані перш за все з атмосферними фронтами, тому барокліна нестійкість може реалізуватися саме в цих зонах.

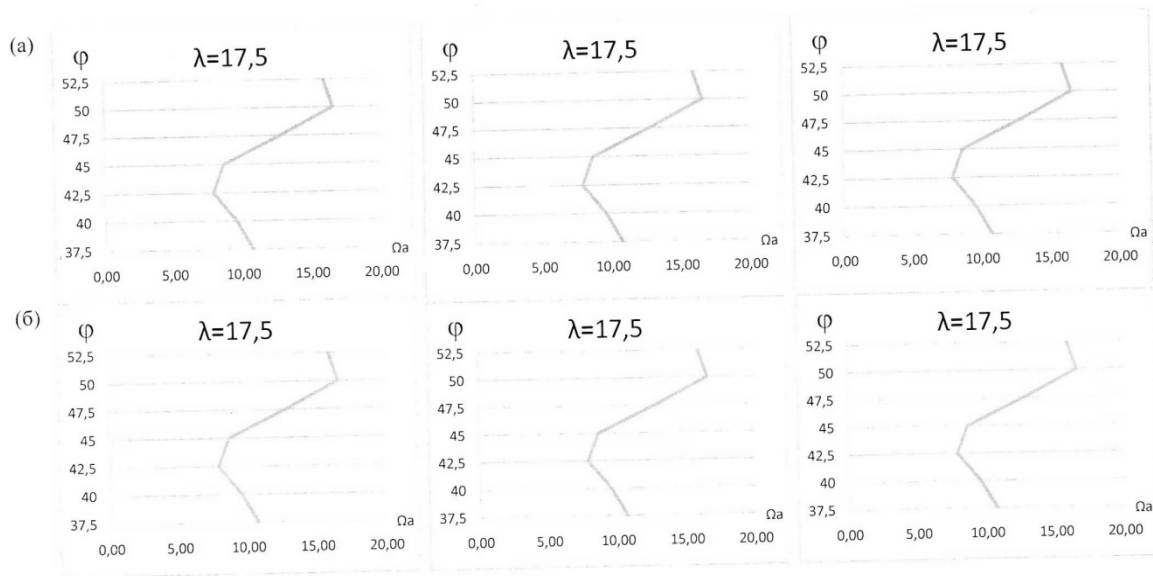


Рис. 6 – Меридіональні профілі абсолютного вихору за 00 UTC 24.07.14 р.: для загального (а) та зонального потоку (б).

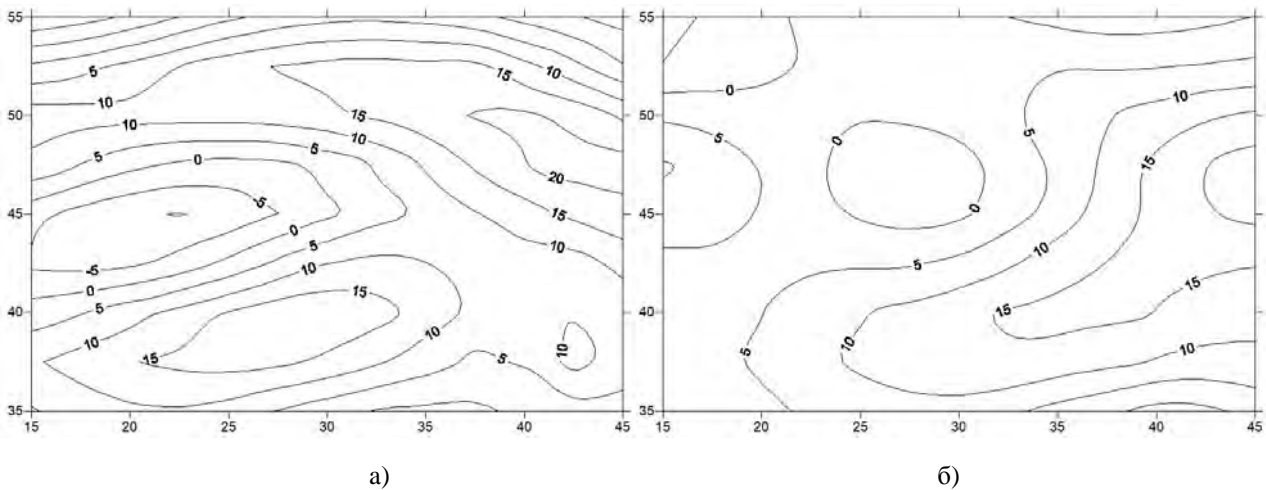


Рис. 7 – Поля критерію Філіпса за 00 UTC: 23.07.14 р. (а); 24.07.14 р. (б).

Як відзначалося вище, система полярного фронту, яка проходила в широтній смузі 40-50<sup>0</sup> пн.ш., протягом періоду повільно пересувалась в південному напрямку і 23 липня окремі її гілки розташовувались над Середземним морем, Балканами та північним узбережжям Чорного моря, а через добу фронти знаходились вже поза межами області аналізу, за виключенням ділянки теплового фронту над східною частиною Чорного моря.

На рис. 7 а, б представлені поля критерію Філіпса за 23 і 24 липня відповідно. Як видно із рис. 7, в області аналізу існує дві зони барокліної нестійкості, одна з яких проходить в північній частині улоговини з висотним циклоном, а

друга пов'язана з системою атмосферних фронтів; найбільших значень критерій Філіпса досягає над східною частиною Чорного моря, де проходить тепла ділянка полярного фронту. Така зона зберігається і 24 липня (рис. 7а, б).

Відзначимо, що протягом всього періоду опади під східною частиною висотного циклону носили зливовий характер і супроводжувалися грозами. Безумовно, у формуванні зон опадів значну роль відігравали атмосферні фронти і термічна конвекція, але розміри зон опадів та їх інтенсивність не можна пояснити тільки вказаними факторами. Можна вважати, що великий вплив на процеси опадоутворення здійснила гідродинамічна нестійкість, перш за все баро-

тропна, оскільки потік, в якому сформувався і пересувався висотний циклон на протязі всього періоду залишався баротропно нестійким.

Бароклінна нестійкість в основному сприяла загостренню процесів на фронтах і поширенню зон опадів на північно-східну частину висотної улоговини.

Дослідження [4] гідродинамічної нестійкості атмосферних течій показали, що імовірність реалізації як баротропної, так і барокліної нестійкості збільшується, якщо в зональному потоці існують хвилі Россбі. В нашому випадку цей результат підтверджується на прикладі баротропної нестійкості.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Висотний циклон сформувався в результаті відсікання глибокої холодної улоговини над атлантичним узбережжям Західної Європи.

2. Зона опадів протягом всього періоду знаходилась під східною, південно-східною та північно-східною частинами висотного циклону.

3. Збільшення інтенсивності опадів могло відбуватися за рахунок баротропної нестійкості потоку, в якому рухався висотний циклон.

4. Бароклінна нестійкість сприяла поширенню зон опадів (особливо в північно-східній частині висотної улоговини) і посиленню процесів на фронтах.

5. Можна припустити, що нестійкість хвилі Россбі, в улоговині якої сформувався висотний циклон, привела до кардинальної перебудови баричного поля над Європейським континентом.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Palmen E., Newton C. W. *Atmospheric Circulation Systems: their structure and physical interpretation*. 1969. 602 p.
2. Юсупов Ю. Н. К вопросу об объективном прогнозе шквалов // Труды ГМЦ России. 2008. Вып. 342. С. 55-78.
3. Pettersen Sverre. *Weather analysis and forecasting*. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, Toronto, London, 1956.
4. Шакина Н. П. Гидродинамическая неустойчивость в

- атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 309 с.
5. Івус Г. П., Зубкович С. О., Хоменко Г. В., Ковальков І. А. Умови формування зон небезпечного вітру на території України // Вісник ОДЕКУ. 2014. Вип. 18. С. 48-55.
6. Івус Г. П., Хоменко Г. В., Ковальков І. А. Параметри барокліності та їх використання у фронтологічному аналізі // Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей. 2013. Вип. 1(15). С. 18-25.
7. Ivus G. P., Zubkovych S. O., Khomenko G. V., Kovalkov I. A. Conditions of formation of dangerous wind zones on the territory of Ukraine. *European Applied Science, Europäische Fachhochschule*, 2014, ed. 10, pp. 59-64.
8. Шакина Н. П. Лекции по динамической метеорологии. М.: Триада ЛТД, 2013. 160 с.
9. Шакина Н. П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 263 с.

#### REFERENCES

1. Palmen E., Newton C. W. *Atmospheric Circulation Systems: their structure and physical interpretation*. 1969. 602 p.
2. Yusupov Yu N. About objective forecast of squalls. *Trudy GMTS Rossii - Proceedings of the HMC Russia*, 2008, vol. 342, pp. 55-78. (In Russian)
3. Pettersen Sverre. *Weather analysis and forecasting*. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, Toronto, London, 1956.
4. Shakina N. P. *Gidrodinamicheskaya neustoychivost' v atmosfere* [Hydrodynamical instability in the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 309 p.
5. Ivus G. P., Zubkovych S. O., Khomenko G. V., Kovalkov I. A. *Visn. Odes. derž. ekol. Univ. – Bull. of OSENU*, 2014, vol. 18, pp. 48-55. (In Ukrainian). <http://bulletin.odeku.edu.ua/uk/usloviya-formirovaniya-zon-opasnogo-vetra-na-territorii-ukrainy/>
6. Ivus G. P., Khomenko G. V., Kovalkov I. A. *Vestnyk Gidromettsentra Chernogo y Azovskogo morey – Bulletin of the Hydrometeorological Center of the Black and Azov Seas*, 2013, vol. 1 (15), pp. 18-25. (In Ukrainian)
7. Ivus G.P., Zubkovych S.O., Khomenko G.V., Kovalkov I.A. Conditions of formation of dangerous wind zones on the territory of Ukraine. *European Applied Science, Europäische Fachhochschule*, 2014, ed. 10, pp. 59-64.
8. Shakina N. P. *Lektsii po dinamicheskoy meteorologii* [Lectures on Dynamiv Meteorology]. Moscow: Triada LTD, 2013. 160 p.
9. Shakina N. P. *Dinamika atmosferykh frontov i tsiklonov* [Dynamics of Atmospheric Fronts and Cyclones]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 263 p.

### HYDRODYNAMIC INSTABILITY IN THE COLD-CORE LOW AREA AND ITS EFFECT ON THE WEATHER

G. P. Ivus, Cand. Sci. (Geogr.), Prof.  
G. V. Khomenko, Cand. Sci. (Geogr.), As. Prof.  
I. A. Kovalkov, Postgraduate  
E. V. Sosmiy, Master's degree

Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, [meteo@odeku.edu.ua](mailto:meteo@odeku.edu.ua)

Cold-core lows are poorly understood cyclones, but they significantly impact on the formation of weather conditions in Ukraine, especially in its central and western regions.

In the paper, the evolution of a cold-core low, which is associated with the enlargement of rainfall areas with thunderstorms over the Western Europe and Ukraine. The low formed on July 21st, 2014, in a deep cold trough of a Rossby wave over Atlantic Europe. During period 21-24 July the low was moving to the East and there were precipitation zones under its eastern part. Therefore, sizes of precipitation zones cannot always be explained by impact of front and thermic instability, in this paper it is tried to assess hydrodynamic instability in forming of precipitation in a cold-core low. The research method is based on the use of the linear theory of the hydrodynamic instability of the zonal flow with Rossby waves.

To investigate barotropic instability fields of meridional profiles of absolute vorticity. It is shown that flow in which the low moved was barotropic unstable. Using baroclinic instability characteristics (Phillips's criterion) Baroclinic zones were revealed in atmospheric fronts and in northern part of area in question.

It has been shown that hydrodynamic instability, both barotropic and baroclinic, in the eastern part of the cold-core low leads to intensification of atmospheric processes on the fronts, which was revealed to strengthening of precipitation and in the enlargement of zones of their formation.

**Keywords:** high-altitude cyclone, Rossby waves, rainfall zone, hydrodynamic instability, absolute vortex, Phillips criterion.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ОБЛАСТИ ВЫСОТНЫХ ЦИКЛОНОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПОГОДУ

**Г. П. Ивус**, канд. геогр. наук, профессор, зав. кафедрой

**Г. В. Хоменко**, канд. геогр. наук, доцент

**И. А. Ковальков**, аспирант

**Е. В. Сосмий**, магистр

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [meteo@odeku.edu.ua](mailto:meteo@odeku.edu.ua)*

Высотные циклоны являются малоизученными барическими образованиями, но они существенно влияют на формирование погодных условий в Украине. В данной работе исследуется эволюция высотного циклона, с которым связаны обширные зоны осадков с грозами над районами Западной Европы и Украины. Метод исследования базируется на использовании линейной теории гидродинамической неустойчивости зонального потока с волнами Россби.

Показано, что гидродинамическая неустойчивость как баротропная, так и бароклинная, в зональном потоке с волнами Россби приводит к обострению атмосферных процессов, проявляется в усилении интенсивности осадков и в распространении зон их формирования.

**Ключевые слова:** высотный циклон, волны Россби, зона осадков, гидродинамическая неустойчивость, абсолютный вихрь, критерий Филиппса.

*Дата першого подання: 03. 01. 2017*

*Дата надходження остаточної версії: 11. 10. 2017*

*Дата публікації статті: 26. 10. 2017*