

# Вертикальна структура і динаміка висотних циклонів та їх вплив на погоду в Україні

Інна А. Хоменко , Олена М. Нажмудінова , Галина В. Хоменко 

Одеський державний екологічний університет, Одеса, Україна

## Features of thermodynamic structure of cut-off low systems and their impacts on the weather in Ukraine

Inna A. Khomenko, Olena M. Nazhmudinova, Halyna V. Khomenko  
Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., Odessa, 65016, Ukraine

### ABSTRACT

The paper presents a summary of the proceedings of the middle and upper troposphere cyclones that form when a low is filled with air masses at the surface or southern part of a deep upper-air trough is cut off from the polar cyclone. Cut-off low systems are poorly understood synoptic vortexes, but they always cause a sudden and significant weather deteriorations, so their research is relevant. Feature of these cyclones is the asymmetry of weather conditions: cloudy weather with precipitation observed under the eastern parts of these cyclones; cloudy weather without precipitation registered in the western parts. The purpose of the study is to identify the physical processes that lead to the formation of precipitation zones just under the eastern part of the cut-off lows. To achieve this goal, the thermodynamic structure of cut-off cyclone, associated with heavy rain with thunderstorms and squalls over the western and south-western regions of Ukraine during the period from September 11-13, 2013, is studied. On the basis of objective analysis of wind and temperature fields in the main isobaric surfaces, the spatial distribution of characteristics of the structure of the cut-off cyclones such as the relative vorticity, 2D divergence, potential temperature, potential vorticity and thermal frontal parameter are obtained. The joint analysis of the fields of calculated characteristics, synoptic situation and precipitation maps showed that in the field of the relative vorticity, where the vorticity values are several times as high as vorticity's order and reaches the values of the planetary vorticity in the upper troposphere, the central parts of the cut-off cyclone and ridges are well detected, which indicates a high activity of atmospheric processes. The positive values of the thermal frontal parameter well represent the location of the most intense areas of fronts at the ground and in the middle atmosphere. The spatial structure of the field of divergence, which is an indicator of the convergence and divergence of atmospheric flows, shows that favourable conditions for the generation of ascending vertical movements and, hence, for the formation of clouds and precipitation, are formed in the eastern part of the cut-off cyclone; in the western part, the conditions are favourable for downward movements that destroy the clouds, if any. The vertical distribution of the potential vorticity and the potential temperature in general confirms this result.

### KEYWORDS

Relative vorticity, divergence, potential vorticity, vertical motions

## 1. Вступ

Висотні циклони виникають внаслідок заповнення приземного центру або в результаті відсікання глибокої висотної улоговини від холодної полярної депресії. Ці циклони утворюються з екваторіального боку улоговини і завжди холодні; висотні антициклони формуються на полярному боці висотних гребенів і нерідко створюють блокуючі ситуації; в полі температури їм відповідає гребінь або осередок тепла.

Висотні циклони можуть існувати тривалий час і суттєво впливати на атмосферні процеси і погоду над великими територіями, тому вивчення умов їх виникнення і існування є актуальною задачею. Дійсно, з цими баричними утвореннями зазвичай пов'язано раптове погіршення погоди, яке супроводжується сильними опадами, грозами, шквалами.

Проте, дослідженню висотних циклонів присвячено досить мало робіт. Найбільш детальні дослідження було виконано Пальменом і Ньютоном

(Palmen, Newton, 1973) для регіонів Америки і Західної Європи. Показано, що найчастіше висотні циклони формуються біля західного узбережжя Центральної Америки і над південно-західними районами Західної Європи. Отримано також, що опади спостерігаються під східною частиною висотних циклонів, при цьому зони найбільш інтенсивних опадів знаходяться саме під південно-східною периферією; в західній частині висотних циклонів опади несуттєві або зовсім відсутні (Petterssen, 1961).

В останні роки з'явилися роботи, присвячені вивченню термодинамічної структури висотних циклонів над Західною Європою (Milrad, 2018; Porcù et al., 2007; Hoskins, McIntyre, Robertson, 1985; Keyser, Shapiro, 1986). В цих роботах аналізуються основні термодинамічні параметри, які характеризують особливості атмосферних процесів, відповідальних за асиметричний розподіл погодних умов.

За даними роботи Шакіної Н.П. (Shakina, 1985) загострення атмосферних процесів відбувається не тільки під південно-східною, а і

під північно-східною частиною висотних улоговин, в яких утворюються висотні циклони. Активізація атмосферних процесів в цих областях стимулює загострення процесів на фронтах і сприяє виникненню нових баричних утворень в нижній тропосфері (Shakina, 2013).

Дослідження синоптичних умов формування зон сильних опадів та злив на території України показали, що в теперішній час ці явища, які можуть досягати третього рівня небезпеки, нерідко бувають пов'язані з висотними циклонами. Як відзначається в роботі Нажмудінової О.М. (Nazhmudinova, 2015) кількість таких випадків в останні десятиріччя зростає: найбільша їх повторюваність припадає на кінець весни і початок осені. За результатами досліджень авторів (Kudrian, 2002; Nazhmudinova, 2015) висотні циклони, що суттєво впливають на погоду в Україні, формуються в різних районах, але переважно в південних широтах європейського континенту, при загостреній меридіональності процесів.

Мета даного дослідження полягає в тому, щоб з'ясувати умови формування зон опадів в області висотного циклону, з яким пов'язані складні погодні умови над районами Західної Європи і України в період 11-13.09.2013 р.

## 2. Матеріали та методи

Метод дослідження базується на аналізі кількісних характеристик, які визначають термодинамічну структуру висотного циклону. Згідно з досвідом авторів (Hoskins, McIntyre, Robertson, 1985; Keyser, Shapiro, 1986; Porcù et al., 2007; Godoy, 2011) найбільш інформативними характеристиками для такого дослідження є відносний вихор швидкості вітру ( $\Omega_p$ ), двовимірна дивергенція ( $D_s$ ), потенціальний вихор Ертеля ( $PV$ ), потенційна температура ( $\Theta$ ) і термічний фронтальний параметр  $T\Phi\Pi$ .

В якості вихідної інформації використані дані об'єктивного аналізу полів вітру і температури на основних ізобаричних поверхнях (850, 700, 500 і 300 гПа) у вузлах географічної сітки точок з кроком  $2,5^\circ$  по широті і довготі за 11-12 вересня 2013 року. При аналізі синоптичної ситуації і результатів розрахунків використані приземні карти, карти баричної топографії та карти добових сум опадів за вказані дні. Область розрахунку та аналізу розташована між меридіанами  $0-45^\circ$  сх.д. і паралелями  $35-60^\circ$  пн.ш., тобто охоплює більшу частину Західної Європи і європейської Росії, а також територію України.

Обчислення характеристик, які перелічені вище, виконано за наступними формулами:

$$\Omega_p = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}; \quad (1)$$

$$D_s = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}; \quad (2)$$

$$\Theta = T \left( \frac{1000}{p} \right)^{0.286}; \quad (3)$$

$$PV = -g(\Omega_p + l) \frac{\partial \Theta}{\partial p}; \quad (4)$$

$$T\Phi\Pi = -\nabla |\nabla T| \frac{\nabla T}{|\nabla T|}. \quad (5)$$

В формулах (1-5) використано загальноприйняті позначення:  $u$ ,  $v$  – зональна та меридіональна складові швидкості вітру, відповідно;  $T$  – абсолютна температура повітря;  $p$  – атмосферний тиск;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $l=2\omega \sin\varphi$  – параметр Коріоліса;  $\theta$  – потенційна температура;  $\nabla$  – умовний векторний диференціальний оператор ( $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y}$ ). Зазначимо, що температура ( $T$  і  $\theta$ ) виражається в градусах Кельвіна (К), а міжнародною одиницею вимірювання потенціального вихору Ертеля є  $pvv$ , яка дорівнює  $10^{-6} \text{ К} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

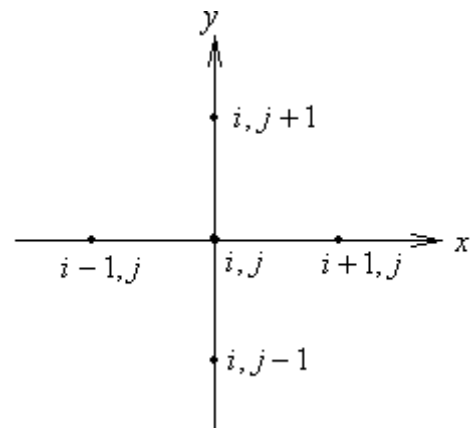


Рис. 1. Схема для обчислення похідних у вузлі  $i, j$ .

Fig. 1. The stencil for calculation of derivatives at the point  $(i, j)$ .

Вузли сітки розташовані на перетині паралелей і меридіанів. З урахуванням кроку сітки ( $2,5^\circ$  по широті і довготі) розрахункові формули для похідних набувають вигляду

$$\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{i,j} \approx \frac{0.18}{\cos \varphi_j} (f_{i+1,j} - f_{i-1,j}) \cdot 10^{-5}, \quad \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{i,j} \right] = [f]_{\text{M}^{-1}}$$

$$\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{i,j} \approx 0.18 (f_{i+1,j} - f_{i-1,j}) \cdot 10^{-5}, \quad \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{i,j} \right] = [f]_{\text{M}^{-1}}$$

де  $f$  – будь-яка метеорологічна величина;  $[f]$  – розмірність величини  $f$ ;  $i, j$  – безрозмірні координати ( $i=x/\delta x, j=y/\delta y$ , де  $\delta y=2.775 \cdot 10^5$  м,  $\delta x=\delta y \cos \varphi$ ).

**3. Результати та обговорення**

**3.1 Стислий огляд синоптичних процесів**

Особливість ситуації, з якою пов'язано формування висотного циклону в період 11-12 вересня 2013 р., полягає в тому, що атмосферні процеси над першим природним синоптичним районом визначаються, перш за все, впливом азорського антициклону, гребінь якого біля поверхні землі проходить в широтному напрямку над Середземноморським басейном від атлантичного узбережжя Західної Європи до західного узбережжя Балканського півострова (рис. 2).

Східні райони Західної Європи та західне Причорномор'я знаходяться під впливом області зниженого тиску, яка окреслюється ізобарою 1020 гПа; над європейською Росією та Україною поле переважно антициклонічне з однією замкненою ізобарою 1020 гПа.

Як показує аналіз карти АТ-850, термобаричне поле як в нижній тропосфері, так і біля поверхні

землі, малоградієнтне, при цьому більша частина Європейського континенту знаходиться під впливом циклонічного поля у вигляді глибокої улоговини, в якій сформувався висотний циклон. На карті АТ-850 він окреслюється однією замкненою ізогіпсою, на АТ-500 – трьома, а на АТ-300 – чотири замкненими ізогіпсами (рис. 3). Улоговину, в якій сформувався висотний циклон, можна розглядати як частину хвилі Россбі, яка чітко простежується в середній і верхній тропосфері: гребінь цієї хвилі поширюється над атлантичним узбережжям Західної Європи до Скандинавського півострова, а улоговина, в якій сформувався висотний циклон, охоплює всю територію Західної Європи і сягає узбережжя африканського континенту.

На початку періоду (11.09.13 р.) висотному циклону на приземній карті відповідає одна замкнута ізобара 1015 гПа, а вже 12.09.13 р. циклон простежується лише на висотних картах (рис. 4). Відсікання циклону здійснилося над північними районами Західної Європи, його центр знаходиться біля точки з координатами приблизно 52° пн.ш. і 10° сх.д. (рис. 3). По периферії висотної улоговини проходить динамічно значуща висотна фронтальна зона; з її північно-західною та південно-східною частинами пов'язані струминні

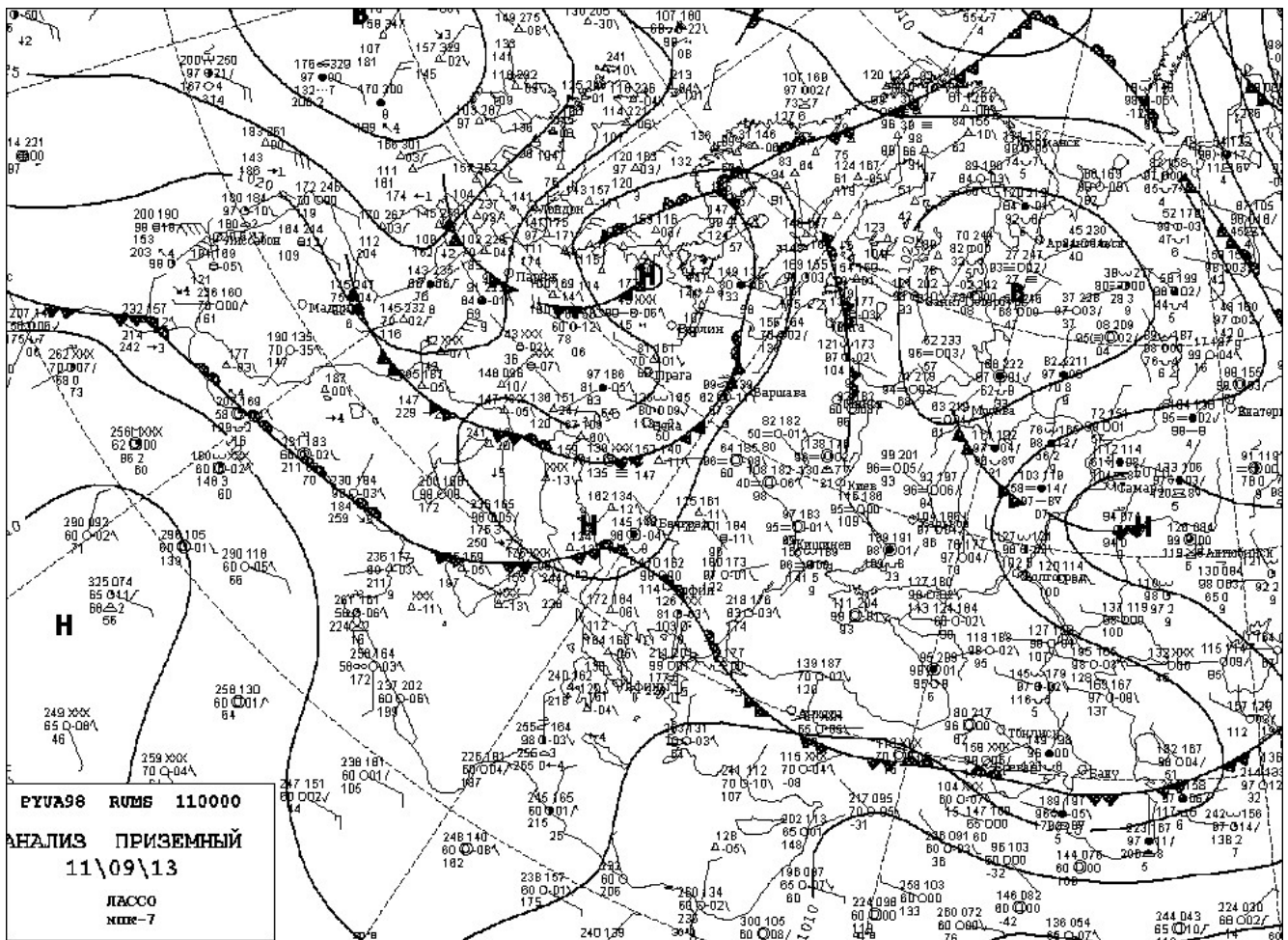


Рис. 2. Аналіз приземної карти за 00 UTC 11.09.13 р.  
 Fig. 2. A synoptic chart for 0Z 11 September 2013.

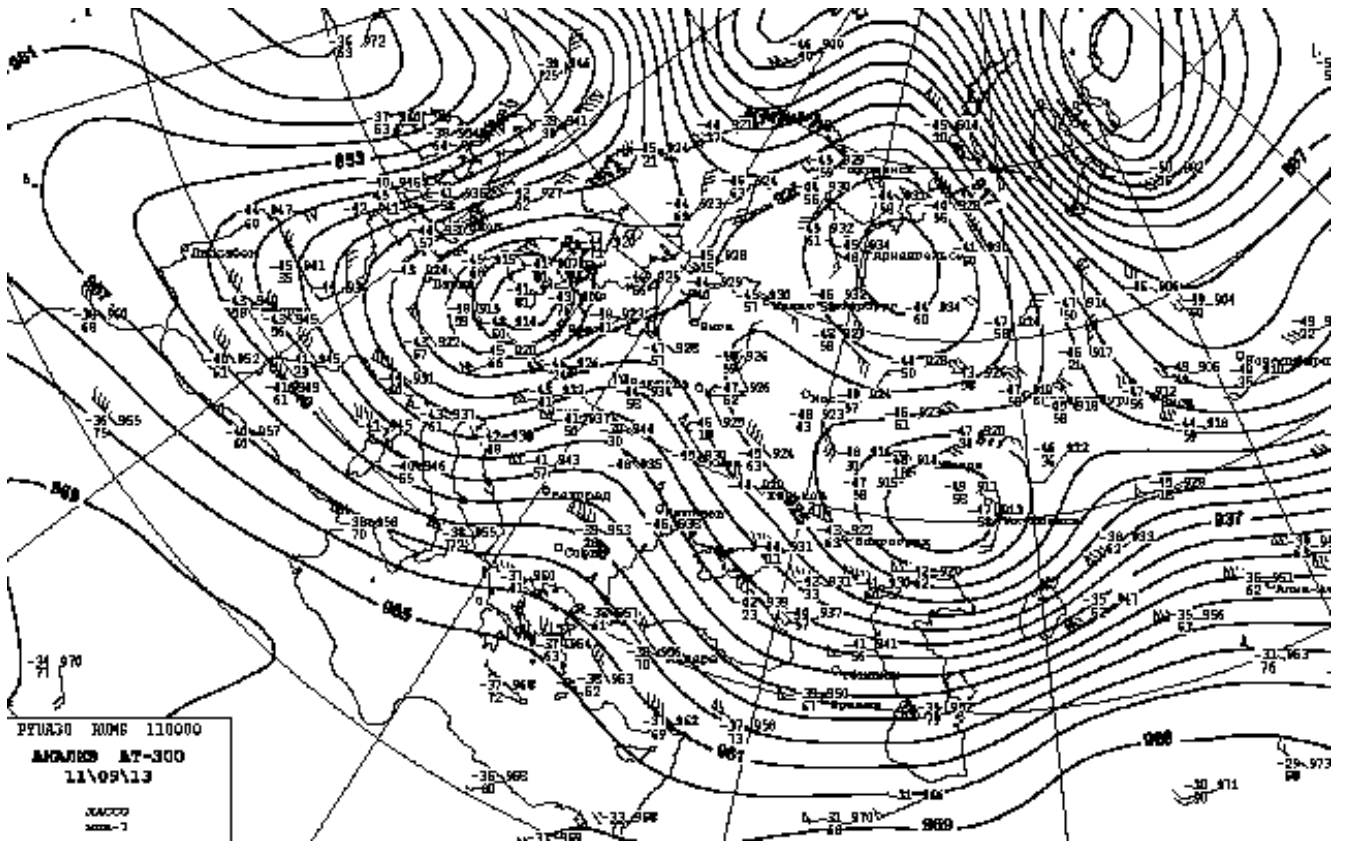


Рис. 3. Аналіз карти АТ-300 за 00 UTC 11.09.13 р.  
 Fig. 3. 300-hPa geopotential height for 00Z 11 September 2013.

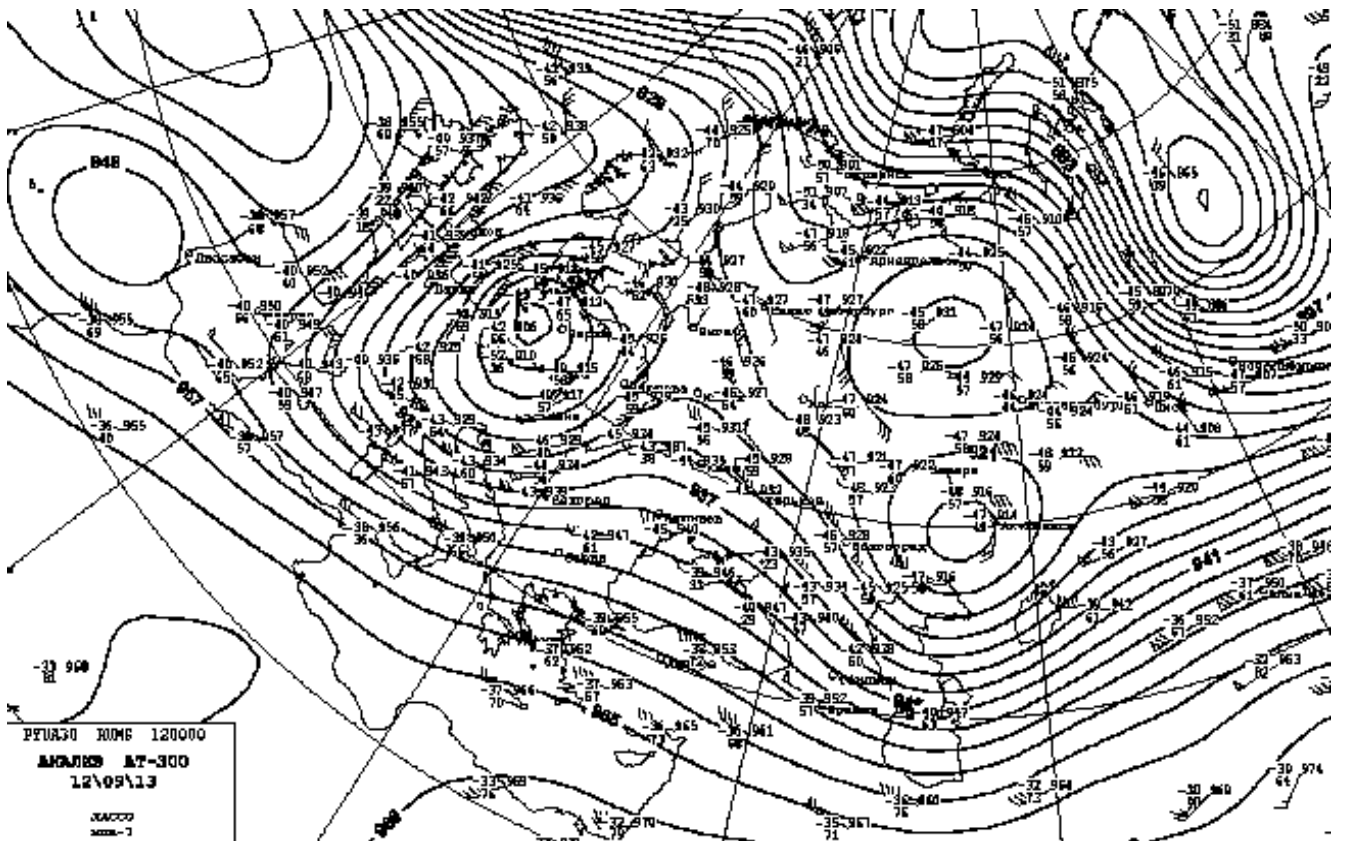


Рис. 4. Аналіз карти АТ-300 за 00 UTC 12.09.13 р.  
 Fig. 4. 300-hPa geopotential height for 00Z 12 September 2013.

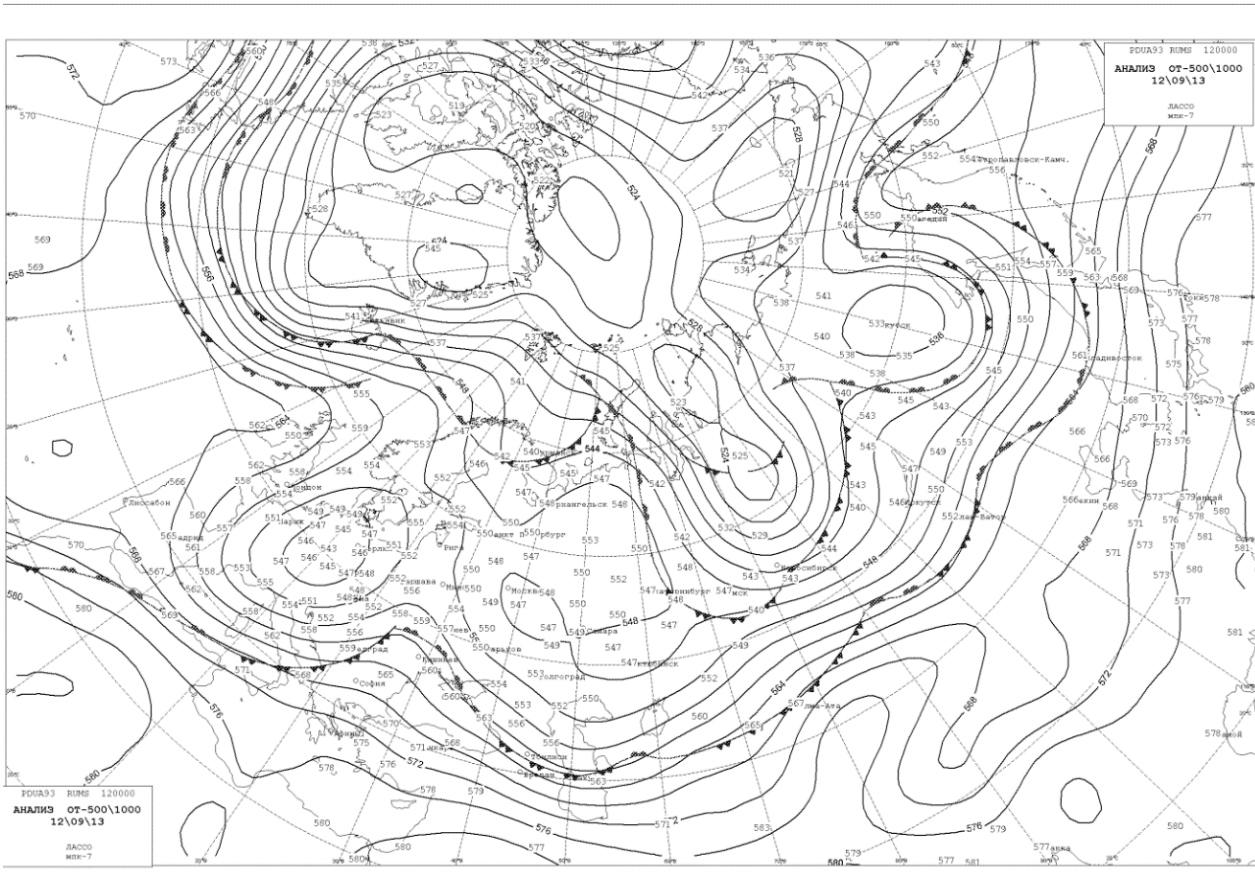


Рис. 5. Аналіз карти BT-500/1000 за 00 UTC 12.09.13 р.  
 Fig. 5. 1000-500 hPa thickness chart for 00Z 12 September 2013.

течії зі швидкістю вітру до 40 м/с.

З часом характер баричного поля біля поверхні землі практично не змінюється, поле залишається малоградієнтним, циклон зберігається тільки на висотах, починаючи з ізобаричної поверхні 850 гПа.

Максимального розвитку циклон досягає 12.09.13 р., коли на карті AT-300 він окреслюється п'ятьма замкнутими ізогісами (рис. 4). Декілька збільшується інтенсивність ВФЗ: на північно-західній та південно-східній периферіях висотної улоговини, як в середній тропосфері, так і в верхній зберігаються струминні течії зі швидкістю вітру до 40-45 м/с (рис. 4).

Відзначимо, що висотний циклон являє собою холодне баричне утворення: на картах відносної топографії висотній улоговині з циклоном відповідає термічна улоговина з осередком холоду, який майже збігається з замкнутою областю зниженого тиску (рис. 4, 5).

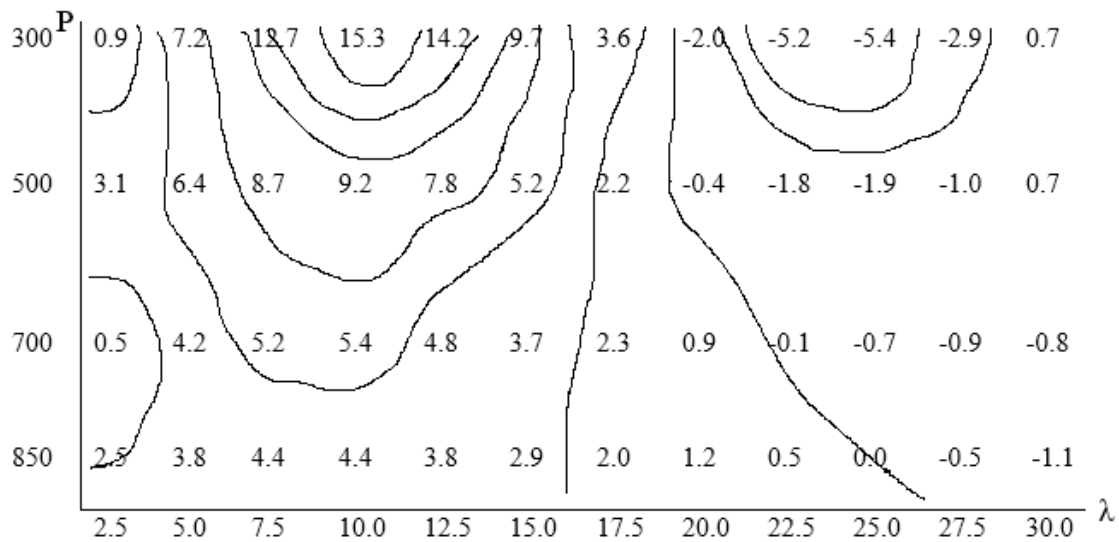
Протягом періоду циклон повільно пересувався в східному напрямку і 13 вересня 2013 р. його південно-східна периферія знаходиться вже над західним Причорномор'ям. З цією частиною циклону пов'язані зони опадів, які пересувались разом з циклоном. Найбільш інтенсивні опади спостерігались на території України (в її західних, центральних та південних областях) 13.09.13 р.

### 3.2 Кількісні характеристики структури циклону та їх аналіз

Як відзначалося вище (див. пункт 2), в роботах з дослідження висотних циклонів над Західною Європою для аналізу термодинамічної структури висотних циклонів використовуються такі параметри як відносний вихор швидкості вітру, потенціальний вихор, термічний фронтальний параметр тощо.

Відомо, що відносний вихор (його вертикальну складову) можна розглядати як міру інтенсивності циклонів і антициклонів, тому для визначення розташування висотного циклону і його інтенсивності на всіх ізобаричних поверхнях було розраховано поля  $\Omega_p$ .

Аналіз поля  $\Omega_p$  в нижній тропосфері показує, що 11.09.2013 р. замкнена область максимальних додатних значень відносного вихору розташована в широтній смузі 50-550 пн.ш. і збігається з центральною частиною висотного циклону на карті AT-850; максимальне значення  $\Omega_p$  складає  $4.5 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  (4.5 од.), що майже в два рази перевищує порядок цієї величини, який дорівнює  $2 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ ; тобто 2 од. В подальшому величину  $\Omega_p$  будемо вказувати в одиницях  $10^{-5} \text{ c}^{-1}$ . З висотою інтенсивність циклонічної циркуляції збільшується і максимальних значень відносний вихор досягає у верхній тропосфері: в центральній частині циклону



**Рис. 6.** Меридіональний розріз уздовж паралелі 52.50 пн. ш. за 11.09.13 р. (— ізолінії відносного вихору через  $2 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ )  
**Fig. 6.** Longitude–pressure cross section of the relative vorticity (solid line, in  $\text{s}^{-1}$ , contour interval is  $2 \cdot 10^{-5}$ ) for 11 Sept. 2013

найбільше значення  $\Omega_p$  сягає майже 15 од., тобто тут відносний вихор має порядок планетарного вихору. Від'ємні значення  $\Omega_p$  відповідають баричним гребеням, які оточують циклон.

Для наочності побудовано вертикальний розріз на  $52.5^\circ$  пн. ш., де на  $10^\circ$  сх. д. знаходиться центр висотного циклону (рис. 6). Можна бачити, що на всіх рівнях максимальні значення відносного вихору відповідають центру висотного циклону і що інтенсивність циклонічного вихору зростає з висотою.

В гребені, розташованому на східній периферії улоговини, область найбільших значень  $\Omega_p$  знаходиться на осі гребеня, але антициклонічне поле відрізняється значно меншою інтенсивністю в порівнянні з циклонічним.

Треба відзначити, що поле фактичного відносного вихору в цілому добре віддзеркалює поле тиску: максимальні абсолютні значення  $\Omega_p$  відповідають центрам або осям баричних утворень, хоча в області баричного гребеня поряд з від'ємними значеннями  $\Omega_p$  мають місце додатні, які відповідають циклонічній циркуляції. Це свідчить про те, що в цій частині баричного поля фактичний вітер значно відрізняється від геострофічного.

Дослідження процесів фронтогенезу (Shakina, 1985; Semenova, Khomenko, 2013) показують, що за допомогою термічного фронтального параметра можна виявляти ділянки фронтів, які завжди пов'язані з бароклінічними зонами, де температурні контрасти досить значні. В якості прикладу в таблицях 1, 2 представлені поля фронтального параметра на ізобаричних поверхнях 850 і 300 гПа.

Дані таблиці 1 показують, що в розглянутій ситуації в нижній тропосфері умови несприятливі для утворення атмосферних фронтів, оскільки в більшості вузлів сітки значення ТФП від'ємні. Фронтальним умовам відповідає додатний

параметр ТФП; в нашому випадку додатні значення, які дорівнюють або перевищують  $0,1 \cdot 10^{-11} \text{ K} \cdot \text{m}^{-2}$  (зафарбовані квадрати), відповідають холодній (більш активній) ділянці арктичного фронту і фронту оклюзії над північно-східними районами Західної Європи (рис. 2). Полярний фронт, який проходить поблизу  $400$  пн. ш., в полі параметра ТФП виявляється слабо, але додатні значення ТФП відповідають ділянці полярного фронту з хвилею біля  $200$  сх. д.

У верхній тропосфері в полі термічного фронтального параметра добре виявляються ділянки ВФЗ, які оточують висотну улоговину (зафарбовані квадрати табл. 2., рис. 3). При цьому область максимальних значень ТФП розташована на північно-західній периферії висотної улоговини, де проходить струминна течія зі швидкістю вітру до  $46 \text{ м/с}$ .

Розглянемо тепер розподіл потенціального вихору Ертеля в області циклону. Відомо, що ця термодинамічна характеристика має різні значення в стратосферному і тропосферному повітрі, тому її можна використовувати для визначення вертикальних циркуляцій в атмосфері (Shakina, 2013).

З концепцією потенціального вихору Ертеля пов'язане поняття динамічної тропопаузи, яке має велике прикладне значення. Фізичний зміст тропопаузи полягає в тому, що вона відділяє стратосферне повітря від тропосферного. Роботи в області ізентропічного аналізу показали, що значення  $PV$  в тропосфері і в стратосфері мають різний порядок. Так, для тропосфери характерними є значення  $0.3\text{--}0.6 \text{ rvi}$ ; для стратосферного повітря  $PV$  (одиночку вимірювання  $PV$  див. в розділі 2) має порядок  $10 \text{ rvi}$  і зростає з висотою до декількох десятків  $\text{rvi}$ . В перехідному шарі від тропосфери до стратосфери, тобто в шарі тропопаузи

**Таблиця 1.** Значення ТФП ( $10^{-11} \text{ K}\cdot\text{m}^{-2}$ ) у вузлах сітки на поверхні 850 гПа 11.09.2013 р.  
**Table 1.** Gridded values of the thermal front parameter ( $10^{-11} \text{ K}\cdot\text{m}^{-2}$ ) at 850 mb for 11 Sep 2013.

Ф, град	λ, град												
	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	30.0	32.5	35.0
60.0	-0.15	-0.02	-0.14	-0.04	0.04	0.11	0.00	0.21	0.20	0.09	-0.01	-0.12	-0.21
57.5	-0.02	0.07	0.00	0.00	0.04	0.10	0.19	0.01	0.18	0.15	0.06	-0.04	-0.12
55.0	-0.03	0.00	-0.03	-0.08	-0.04	0.04	0.13	0.20	-0.02	0.14	0.10	0.01	-0.06
52.5	-0.09	-0.08	-0.02	-0.06	-0.15	-0.09	0.01	0.10	0.02	0.00	0.08	0.02	-0.01
50.0	0.03	-0.01	-0.10	-0.15	-0.17	-0.14	-0.05	0.05	0.04	-0.04	0.02	0.00	-0.04
47.5	-0.17	-0.12	-0.11	-0.14	-0.13	-0.09	-0.01	0.07	0.01	-0.05	-0.02	-0.05	-0.09
45.0	-0.15	-0.10	-0.07	-0.06	-0.06	-0.02	0.03	0.04	-0.04	-0.05	-0.03	-0.07	-0.13
42.5	-0.09	-0.07	-0.06	-0.06	-0.05	-0.01	0.02	-0.01	-0.05	-0.03	-0.02	-0.04	-0.10
40.0	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	0.00	0.05	0.05	0.03	0.02	0.04	0.08	0.08	0.05

**Таблиця 2.** Значення ТФП  $10^{-11} \text{ K}\cdot\text{m}^{-2}$  у вузлах сітки на поверхні 300 гПа 11.09.2013 р.  
**Table 2.** Gridded values of the thermal front parameter ( $10^{-11} \text{ K}\cdot\text{m}^{-2}$ ) at 300 mb for 11 Sep 2013.

Ф, град	λ, град												
	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	30.0	32.5	35.0
60.0	0.14	0.16	0.09	0.02	-0.02	-0.05	-0.06	-0.04	-0.04	-0.01	0.01	0.032	0.03
57.5	0.14	0.14	0.08	-0.02	-0.12	-0.15	-0.09	0.00	0.02	0.05	0.07	0.04	0.01
55.0	0.19	0.14	0.00	-0.17	-0.25	-0.12	-0.10	-0.13	-0.12	-0.10	-0.07	-0.09	-0.13
52.5	0.12	0.01	-0.15	-0.27	-0.08	-0.18	-0.18	-0.06	-0.03	-0.01	0.00	-0.04	-0.09
50.0	-0.02	-0.09	-0.15	-0.01	-0.14	-0.10	0.02	0.08	0.06	0.07	0.11	0.08	0.03
47.5	-0.08	-0.12	-0.05	-0.13	-0.18	-0.06	0.08	0.14	0.08	0.02	0.07	0.07	0.04
45.0	0.06	0.03	-0.06	-0.09	-0.02	0.06	0.09	0.06	-0.01	-0.03	0.00	0.03	0.03
42.5	-0.06	-0.04	-0.03	0.00	0.04	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01
40.0	-0.01	0.00	0.02	0.05	0.07	0.09	0.09	0.09	0.07	0.08	0.08	0.06	0.04

виділяється так зване субстратосферне «повітря» перехідного шару, для якого характерні значення потенціального вихору від 1 до 4 *rvu* (Shakina, 2013).

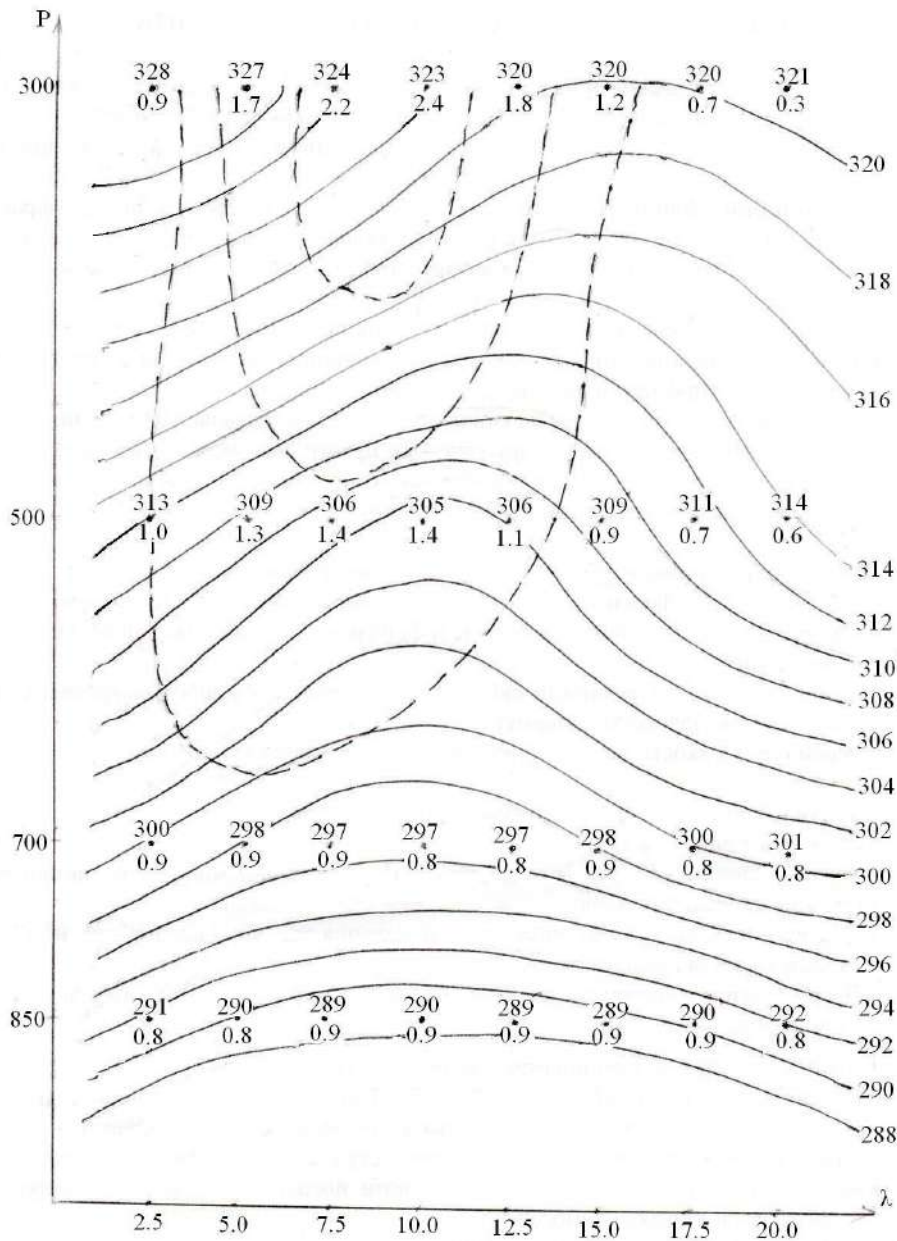
На рисунку 7 представлено вертикальний розріз через центральну частину висотного циклону, на якому нанесено значення потенціального вихору *PV* і потенційної температури  $\theta$ . Рисунок показує, що вихор *PV* в тилівій і центральній частинах висотного циклону між рівнями 700 і 300 гПа коливається в межах 1.0–2.4 *rvu*, які характерні для субстратосферного повітря. Можна зробити висновок, що в тилівій частині висотної улоговини і біля центру циклону спостерігаються низхідні вертикальні рухи, які сприяють розмиванню хмарності і формуванню погоди без опадів.

В передній частині улоговини *PV* набуває менших значень особливо в середній і верхній тропосфері, що може свідчити про наявність висхідних рухів, завдяки яким на верхні рівні потрапляє повітря з нижньої тропосфери.

Відомо, що при адіабатичних процесах ізолінії  $\theta = const$ , тобто ізентропи можна розглядати як

траєкторії повітряних частинок. На рисунку 7 ізолінії  $\theta = const$  вказують на низхідні вертикальні рухи в тилу циклону, а в центральній і передній його частинах – на висхідні, найбільш інтенсивні в середній і верхній тропосфері.

В роботах Пальмена і Ньютона (Palmen, Newton, 1973), відзначається, що розподіл погодних умов в області висотних циклонів є асиметричний. Ця особливість полягає в тому, що опади спостерігаються завжди в передній частині, а в тилівій зберігається малохмарна погода без суттєвих опадів. Автори при дослідженні структури цих циклонів зробили висновок про те, що велику роль в формуванні зон опадів відіграє дивергенція повітряних течій. Так, при русі на південь холодне полярне повітря осідає, завдяки чому в тилу циклону на верхніх рівнях виникає дефіцит маси повітря і відбувається конвергенція течій, а на нижніх, завдяки накопиченню і розширенню повітряних мас виникає дивергенція. Такий розподіл областей збіжності і розбіжності призводить до виникнення низхідних вертикальних рухів (Palmen, Newton, 1973).



**Рис. 7.** Меридіональний розріз уздовж паралелі 52,50 пн. ш. за 11.09.13 р. (— — ізолінії потенційної температури через 2К; - - - - - ізолінії потенціального вихору через 0.5  $\rho v v$ ).

**Fig. 7.** Longitude–pressure cross section of the potential vorticity (solid lines, in  $\rho v v$ , contour interval is 0.5), potential temperature (dashed lines, in K, isoline interval is 2) along 52,5° N for 11 September 2013.

В передній частині циклону навпаки: на нижніх рівнях переважає конвергенція, а на верхніх – дивергенція. В результаті виникають компенсаційні висхідні рухи, під дією яких утворюються хмарність і опади.

В даній роботі для перевірки цього твердження розраховано поля дивергенції за даними об'єктивного аналізу поля вітру за 11.09.13 р., результати розрахунків представлені у вигляді таблиць. Для прикладу розглянемо поля дивергенції на ізобаричних поверхнях 850 і 300 гПа (табл. 3, 4). Дані таблиць показують, що на рівні 850 гПа в тилівій частині висотного циклону, центр якого

знаходиться в точці з координатами 52,5° пн. ш. і 10° сх. д. переважає розбіжність повітряних течій, оскільки в більшості вузлів значення  $D_s$  додатні. В передній частині, навпаки, переважає збіжність, якій відповідають від'ємні величини  $D_s$  (зафарбовані області в табл. 3).

У верхній тропосфері розташування областей з додатними і від'ємними значеннями дивергенції зворотно по відношенню до ізобаричної поверхні 850 гПа (табл. 3,4). Таку ж картину, але менш чітку можна бачити на поверхнях 500 і 700 гПа.

Отже, наявність низхідних вертикальних рухів в тилівій частині висотної улоговини і висхідних

**Таблиця 3.** Значення  $D_s \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  у вузлах сітки, 11.09.2013 р. на поверхні 850 гПа. Заштриховані квадрати з від'ємною  $D_s$  в області висотної улоговини.**Table 3.** Gridded values of the surface divergence ( $D_s$ ) at 850 mb for 11 Sep 2013. Shaded areas of the table are ones with negative values of  $D_s$  in the cut-off trough.

φ, град	λ, град														
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5
62,5	0,26	0,32	0,33	0,29	0,24	0,18	0,11	0,01	-0,02	-0,06	-0,05	-0,06	-0,08	-0,14	-0,21
60,0	-0,09	0,05	0,19	0,23	0,23	0,22	0,19	0,14	0,13	0,14	0,09	0,07	-0,02	-0,11	-0,18
57,5	-0,30	-0,12	0,03	0,16	0,21	0,23	0,19	0,18	0,19	0,22	0,24	0,17	0,10	0,07	0,01
55,0	-0,52	-0,27	0,03	0,21	0,24	0,17	0,12	0,08	0,11	0,22	0,23	0,17	0,07	-0,02	-0,08
52,5	-0,31	-0,03	0,16	0,22	0,14	-0,03	-0,21	-0,28	-0,18	-0,02	0,09	0,10	0,05	-0,08	-0,19
50,0	0,02	0,18	0,24	0,12	-0,08	-0,33	-0,51	-0,48	-0,35	-0,14	0,01	0,13	0,12	0,06	-0,01
47,5	0,26	0,22	0,12	-0,04	-0,32	-0,51	-0,55	-0,47	-0,24	-0,02	0,11	0,22	0,27	0,35	0,34
45,0	0,30	0,13	-0,01	-0,18	-0,27	-0,39	-0,38	-0,18	0,03	0,12	0,16	0,19	0,28	0,45	0,53
42,5	0,12	0,01	-0,02	0,00	-0,04	-0,11	-0,06	0,15	0,32	0,33	0,20	0,07	0,11	0,32	0,49
40,0	-0,09	-0,02	0,12	0,18	0,08	-0,05	0,00	0,25	0,52	0,58	0,38	0,10	0,07	0,21	0,35
37,5	-0,23	-0,01	0,20	0,19	-0,09	-0,39	-0,39	0,01	0,49	0,66	0,55	0,26	0,14	0,22	0,29

**Таблиця 4.** Значення  $D_s \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  у вузлах сітки на поверхні 300 гПа за 11.09.13 р. Заштриховані квадрати з від'ємною  $D_s$  в області висотної улоговини.**Table 4.** Gridded values of the surface divergence at 300 mb for 11 Sep 2013. Shaded areas of the table are ones with negative values of  $D_s$  in the cut-off trough.

φ, град	λ, град														
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5
62,5	-0,64	-0,73	-0,74	-0,71	-0,53	-0,47	-0,31	-0,17	-0,05	0,01	0,07	0,12	0,24	0,35	1,10
60,0	-0,65	-0,85	-0,90	-0,81	-0,63	-0,45	-0,31	-0,22	-0,23	-0,31	-0,40	-0,36	-0,20	0,04	0,29
57,5	-0,31	-0,52	-0,69	-0,68	-0,62	-0,42	-0,20	-0,13	-0,16	-0,24	-0,38	-0,44	-0,35	-0,10	0,16
55,0	-0,39	-0,52	-0,53	-0,40	-0,10	0,27	0,52	0,58	0,46	0,08	-0,32	-0,60	-0,72	-0,55	-0,32
52,5	-0,52	-0,37	-0,17	0,07	0,47	0,82	1,02	1,06	0,84	0,44	-0,05	-0,50	-0,77	-0,82	-0,67
50,0	-0,85	-0,48	-0,03	0,43	0,78	1,00	1,07	0,97	0,74	0,40	0,02	-0,33	-0,54	-0,61	-0,56
47,5	-1,17	-0,68	-0,04	0,61	1,01	1,10	0,90	0,58	0,28	0,02	-0,11	-0,24	-0,29	-0,26	-0,26
45,0	-0,92	-0,46	0,19	0,80	1,12	1,05	0,64	0,12	-0,24	-0,36	-0,33	-0,22	-0,12	-0,09	-0,08
42,5	-0,35	-0,13	0,30	0,75	0,97	0,80	0,35	-0,12	-0,50	-0,63	-0,52	-0,28	-0,11	-0,12	-0,17
40,0	0,01	0,09	0,27	0,42	0,50	0,41	0,15	-0,23	-0,52	-0,60	-0,53	-0,37	-0,27	-0,25	-0,28
37,5	0,26	0,33	0,27	0,13	0,01	-0,03	-0,07	-0,18	-0,34	-0,49	-0,51	-0,43	-0,34	-0,24	-0,18

– в передній підтверджується результатами розрахунків і аналізу як потенціального вихору, так і потенційної температури і дивергенції.

Треба відзначити, що області, де виникають висхідні вертикальні рухи на всіх ізобаричних поверхнях (особливо на АТ-500) досить поширені. Порівняння цих областей з зонами опадів, які наведені на рисунках 8, 9 показує, що вони добре збігаються. Але в період 11-12 вересня на формування зон опадів ще впливали теплі і холодні ділянки арктичного фронту в північних районах Західної Європи, а над Балканським півостровом і Західним Причорномор'ям – гілки

полярного фронту. Значні півдобові суми опадів спостерігаються на північно-східному узбережжі Адріатичного моря і сягають 13-14 мм, а в районах північно-західного Причорномор'я вони перевищують 20 мм.

Можна вважати, що висхідні вертикальні рухи посилювали процеси хмаро- і опадоутворення на всій території під передньою частиною висотної улоговини. Найбільш інтенсивні опади спостерігалися над північними районами Балканського півострова і північно-західним Причорномор'ям, тобто саме під південно-східною периферією висотної улоговини, де

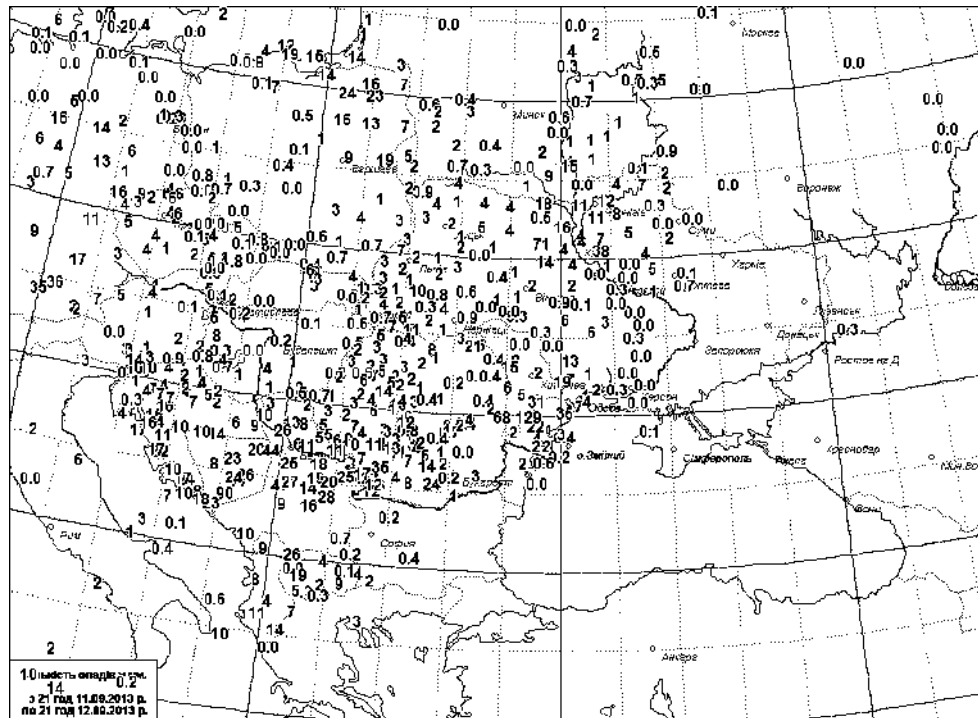


Рис. 8. Поле кількості добових опадів (мм) з 21 год. 11.09 до 21 год. 12.09.13 р.  
 Fig. 8. Daily precipitation sum (mm) from 9 PM 11 Sept. to 9 PM 12 Sept. 2013.

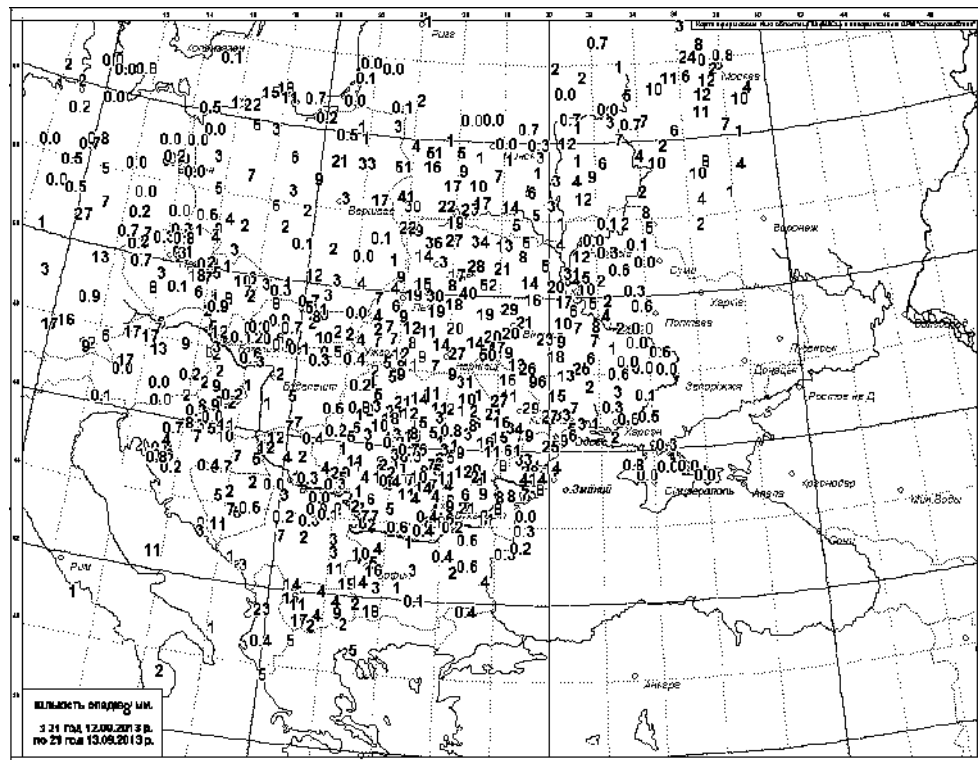


Рис. 9. Поле кількості півдобових опадів (мм) з 21 год. 12.09 до 09 год. 13.09.13 р.  
 Fig. 9. Daily precipitation sum (mm) from 9 PM 12 Sept. to 9 PM 13 Sept. 2013.

згідно з дослідженнями (Palmen, Newton, 1973) спостерігаються найбільш інтенсивні опади (рис. 8, 9).

Вперіод 12-13 вересня зона опадів поширюється і її розміри не можна пояснити лише впливом атмосферних фронтів. Ділянки полярного фронту впливають на райони Балканського півострова і західне Причорномор'я. Решта території, зокрема, західні і центральні райони України знаходяться поза зоною фронтів, під передньою частиною висотної улоговини, де завжди присутні висхідні вертикальні рухи (рис. 8).

Відзначимо, що зона опадів (з 11 на 12.09) добре збігається з областями від'ємної дивергенції на карті АТ-850 і додатної дивергенції на карті АТ-300 (в передній частині висотної улоговини). Тобто можна вважати, що наявність висхідних вертикальних рухів в передній частині висотної улоговини сприяє посиленню атмосферних процесів на фронтах. Дійсно, наприклад, в південно-західних районах Причорномор'я сильні опади супроводжувалися грозами і посиленням вітру до небезпечних швидкостей. Таке саме можна сказати і про зону опадів в період 12-13.09.13 р.

#### 4. Висновки



На основі розрахунків і аналізу фактичних і розрахованих полів зроблено такі висновки:

- висотний циклон сформувався в глибокій омега-подібній улоговині в результаті відсікання її від холодної полярної депресії;
- відносний вихор, розрахований за даними фактичного вітру, добре віддзеркалює баричне поле висотного циклону: центральній частині циклону на всіх ізобаричних поверхнях відповідають максимальні значення відносного вихору, які у верхній тропосфері досягають значень планетарного вихору, що свідчить про велику активність атмосферних процесів;
- термічний фронтальний параметр добре виявляє найбільш активні ділянки приземних фронтів і фронтальних зон в середній і верхній тропосфері;
- особливості розподілу областей збіжності і розбіжності повітряних течій визначають умови утворення висхідних вертикальних рухів у східній частині висотної улоговини і низхідних – в її західній частині;
- в полях потенціального вихору і потенційної температури виявляється практично таке ж розташування вертикальних рухів і відповідних погодних умов в області висотної улоговини з циклоном.

Таким чином, розподіл основних характеристик структури висотних циклонів свідчить про те, що сприятливі умови хмаро- і опадоутворення існують саме в східній частині цих баричних утворень, де висхідні рухи можуть активізувати процеси

на фронтах і не тільки збільшувати інтенсивність опадів, а і поширювати їх зони.

#### ORCID iD

Inna Khomenko  <https://orcid.org/0000-0002-8982-5417>  
 Елена Нажмудинова  <https://orcid.org/0000-0002-7988-603X>  
 Halyna Khomenko  <https://orcid.org/0000-0001-7728-7941>

#### Список посилань

- Vorobyev, V.I. (1991). *Sinopticheskaya meteorologiya* [Synoptic meteorology]. L.: Gidrometeoizdat (In Russian).
- Kudrian, O.P. (2002). *Suputnykova meteorologhiia: praktyka nefanalizu* [Satellite meteorology: practice of nephanalysis]. Training manual. Odesa: TES. (In Ukrainian).
- Matveev, L.T. (1991). *Teoriya obschey tsirkulyatsii atmosfery i klimata Zemli* [Theory of general circulation of the Earth's atmosphere and climate]. L.: Gidrometeoizdat. (In Russian).
- Palmen, E., Newton, Ch. (1973). *Atmospheric Circulation Systems: their structure and physical interpretation*. L.: Gidrometeoizdat. (In Russian)
- Petterssen, S.. (1961). *Weather analysis and forecasting*. L.: Gidrometeoizdat. (In Russian)
- Semenova, I.G., Khomenko H.V. (2013). *Metodychni rekomendatsii shchodo vykorystannia rezultativ obiektyvnoho analizu atmosferykh frontiv* [Methodological recommendations on using results of the objective analysis of atmospheric fronts]. Bulletin of the Hydrometeorological Centre of Black and Azov Seas. 1 (15). 8-18 (In Ukrainian).
- Shakina, N. P. (1985). *Dinamika atmosferykh frontov i tsiklonov* [Dynamics of atmospheric fronts and cyclones]. L.: Gidrometeoizdat. (In Russian)
- Shakina, N. P. (2013). *Lektsii po dinamicheskoy meteorologii* [Lectures on Dynamic meteorology]. M.: Triada LTD. (In Russian)
- Khomenko, H.V., Sosmii Ye. (2017). Vysotni tsyklony ta yikh vplyv na pohodni umovy v Ukraini [Cold-core low and their impact on weather conditions in Ukraine]. *Physical Geography and Geomorphology*, 2(86), 86–89 (In Ukrainian).
- Godoy, A.A., Possia, N.E., Campetella, C.M., Skabar, Y.G. (2011). A cut-off low in southern South America: dynamic and thermodynamic processes. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(4), 503–514.
- Hoskins, B. J., McIntyre, M.E., Robertson, A.W. (1985). On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 111, 877–946.
- Keyser, D., Shapiro, M.A. (1986). A review of the structure and dynamics of upper level frontal zones. *Monthly Weather Review*, 114, 452–499.
- Milrad, S.M. (2018). *Synoptic Analysis and Forecasting: An Introductory Toolkit*. Elsevier Science Publishing Co Inc.
- Porcù, F., Carrassi, A., Medaglia, C.M., Prodi, F., Mugnai, A. (2007). A study on cut-off low vertical structure and precipitation in the Mediterranean region. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96, 121–140.

Хоменко І. А., Нажмудінова О. М., Хоменко Г. В. **Вертикальна структура і динаміка висотних циклонів та їх вплив на погоду в Україні.** *Фізична географія та геоморфологія*, 95 (3): 50–61.

Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна

В статті надається стислий огляд робіт з дослідження циклонів в середній і верхній тропосфері, які виникають завдяки заповненню приземних центрів або при відсіканні південної частини глибокої висотної улоговини від полярного центру.

Висотні циклони є маловивченими синоптичними об'єктами, але вони завжди викликають раптове і значне погіршення погоди, тому їх дослідження є досить актуальним. Особливість цих циклонів полягає в асиметричному розподілі погодних умов: хмарна погода з опадами спостерігається під східними частинами цих циклонів; в західній частині переважає малохмарна погода без опадів.

Метою дослідження є виявлення фізичних процесів, які приводять до формування зон опадів саме під східною частиною висотних улоговин і циклонів.

В даній статті особливості термодинамічної структури висотних циклонів досліджено на прикладі циклону, з яким в західних і південно-західних районах України в період 11-13 вересня 2013 року були пов'язані інтенсивні опади з грозами і шквалами.

На основі даних об'єктивного аналізу полів вітру та температури на основних ізобаричних поверхнях отримано просторовий розподіл таких характеристик структури висотних циклонів як відносний вихор швидкості вітру, двовимірна дивергенція, потенційна температура, потенціальний вихор та термічний фронтальний параметр.

Сумісний аналіз полів розрахованих характеристик, синоптичної ситуації і карт опадів показав, що в полі відносного вихору добре виявляються центральні частини висотного циклону і гребенів, де значення вихору перевищує його порядок в декілька разів і сягає значень планетарного вихору у верхній тропосфері, що свідчить про велику активність атмосферних процесів.

Додатні значення термічного фронтального параметру добре віддзеркалюють розташування найбільш інтенсивних ділянок висотної фронтальної зони і приземних фронтів.

Просторова структура поля дивергенції, яка є показником збіжності і розбіжності атмосферних течій, показує, що сприятливі умови для генерації висхідних вертикальних рухів і, отже, для виникнення хмарності і опадів, утворюються в східній частині висотного циклону; а в західній частині умови є сприятливими для низхідних рухів, які руйнують хмарність, якщо вона є. Вертикальний розподіл потенціального вихору і потенціальної температури в цілому підтверджує цей результат.

**Ключові слова:** відносний вихор, дивергенція, потенціальний вихор, вертикальні рухи.