

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий гідрометеорологічний інститут _____
Кафедра _____ метеорології та кліматології _____
Рівень вищої освіти бакалавр _____
Спеціальність 103 «Науки про Землю» _____
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма Гідрометеорологія _____
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
метеорології та кліматології
Прокоф'єв О.М.
«06» травня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

студенту Маланічеву Максиму Юрійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Процеси градоутворення на території України

керівник роботи Нажмудінова Олена Миколаївна канд.геогр.наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ОДЕКУ від «18» грудня 2023 року № 272 «С»

2. Строк подання студентом роботи 06 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: бюлетені та щоденники погоди, результати наземних метеорологічних спостережень; дані температурно-вітрового зондування; карти, таблиці та зведення про штормові явища погоди; дані МШСЗ; індекси нестійкості атмосфери.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Огляд наукової літератури за напрямком дослідження. 2) Формування вибірки вихідної інформації з випадків граду в теплий період 2023 р. на території України. 3) Аналіз статистичних даних повторюваності граду по регіонах; визначення особливостей місячного та добового розподілу. 4) Встановлення особливостей циркуляційних умов утворення граду найвищої категорії небезпечності, найбільш ранніх та пізніх процесів градоутворення.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Рисунок 4.1-4.2, 4.4 – діаграми повторюваності граду; рисунок 4.3, 4.9, 4.12 – приземні карти погоди; рисунок 4.6-4.7– стиковані IR-знімки МШСЗ з індексами нестійкості атмосфери; рисунок 4.8, 4.11, 4.14 – супутникові знімки хмарності МШСЗ різних діапазонів; рисунок 4.10, 4.13 – карти поля температури повітря.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | немає | | |

7. Дата видачі завдання 06 травня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Термін виконання етапів роботи | Оцінка виконання етапу | |
|-------|--|--------------------------------|------------------------|-----------------------|
| | | | у % | за 4-х бальною шкалою |
| 1 | Отримання завдання. Огляд наукової літератури за напрямком дослідження. Складання теоретичної частини роботи. | 06-10.05.2024 | 90 | відмінно |
| 2 | Вибір вихідних даних за оперативною синоптичною інформацією АРМ синоптика та глобальними прогностичними центрами. | 11-15.05.2024 | 85 | добре |
| 3 | Складання таблиць, побудова графіків, діаграм. | 16-19.05.2024 | 80 | добре |
| | <i>Рубіжна атестація</i> | 20-24.05.2024 | 85 | добре |
| 4 | Проведення аналізу статистичних даних повторюваності граду. | 25-28.05.2024 | 100 | відмінно |
| 5 | Аналіз індексів нестійкості атмосфери, полів хмарності. | 29-31.05.2024 | 96 | відмінно |
| | Дослідження особливостей циркуляції атмосфери при формуванні крупного граду. | 01-03.06.2024 | 100 | відмінно |
| 7 | Узагальнення отриманих результатів. Оформлення остаточної електронної версії роботи та передача її на процедуру встановлення ступеня оригінальності, відсутності ознак плагіату. | 04-06.06.2024 | 100 | відмінно |
| 8 | Перевірка роботи на плагіат, складення протоколу і висновку керівника. Підписання авторського договору. | 07-11.06.2024 | - | |
| | Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам) | | 93 | |

Студент _____ Маланічев М.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Нажмудінова О.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 4 |
| 1 ДО ПИТАННЯ РОЗВИТКУ КОНВЕКЦІЇ В УКРАЇНІ..... | 6 |
| 2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГРАД..... | 10 |
| 2.1 Визначення та характеристики..... | 10 |
| 2.2 Синоптичні процеси формування граду..... | 15 |
| 3 ПРОГНОЗ ГРАДУ..... | 20 |
| 3.1 Прогностичні підходи..... | 20 |
| 3.2 Індекси нестійкості атмосфери..... | 26 |
| 4 АНАЛІЗ ГРАДОУТВОРЕННЯ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ У ТЕПЛІЙ ПЕРІОД 2023 Р..... | 31 |
| 4.1 Статистичні показники..... | 31 |
| 4.2 Характеристики нестійкості атмосфери..... | 43 |
| 4.3 Циркуляційні умови виникнення раннього та пізнього граду..... | 48 |
| ВИСНОВКИ..... | 53 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... | 55 |

ВСТУП

У цій кваліфікаційній роботі досліджуються характеристики градових процесів в Україні.

Актуальність обраної тематики визначається тим, що град, особливо крупний, може завдати суттєвого негативного впливу на різні галузі народного господарства і життєдіяльність людини.

Залежно від місця та масштабу градових осередків, він зумовлює пошкодження інфраструктури, призупинення руху транспорту, чим спричиняє економічні збитки. Град суттєво впливає на сільське господарство – ламає виноградні лози та гілки фруктових дерев, збиває з них плоди, знищує посіви зернових, вибиває тютюнові та баштанові плантації. Нерідко від ударів крупних градин гине домашня птиця та худоба. град може мати вплив на інші галузі економіки, такі як транспорт, будівництво та туризм. Град пошкоджує крівлі будівель, автомобілі тощо. Відомі випадки, коли великі градини серйозно пошкоджували повітряні судна, що перебували у зоні грози.

Спустошливі наслідки граду можуть відчутно вплинути на біологічну різноманітність регіону та природні екосистеми.

В багатьох країнах світу здійснюються проєкти у боротьбі з градом.

У теперішній час спостерігається тенденція до збільшення кількості небезпечного граду в Україні. Ці зміни значно посилились з кінця ХХ ст. і були зумовлені збільшенням інтенсивності конвективних процесів. Причиною цих змін стало суттєве підвищення температури повітря у нижній тропосфері та максимальної приземної температури в теплий період, яке супроводжувалось збільшенням вологовмісту атмосфери.

Дослідження характеристик градоутворення суттєво ускладнюється тим, що град – це одне з найменш тривалих явищ погоди, яке нерівномірно розподіляється по території й характеризується значною плямистістю. За таких умов град часто не фіксується станціями. Визначення градонебезпечності

території за даними метеостанцій, при існуючій щільності мережі, не може правдиво відобразити частоту випадіння граду в даному регіоні. Інформація про крупний град надходить з донесень із населених пунктів, які потерпіли внаслідок стихії. Впродовж останніх років кількість і якість таких донесень значно знизилась. Зменшилась і кількість агрометеорологічних постів, які надавали таку інформацію.

Мета роботи: встановлення особливостей повторюваності граду в різних регіонах України.

Об'єкт дослідження: град.

Предмет дослідження: статистичні характеристики граду.

Методи дослідження: синоптико-кліматичний аналіз, просторово-часове узагальнення даних.

Для дослідження використано оперативну синоптичну інформацію за даними МС України.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку літературних джерел (22).

1 ДО ПИТАННЯ РОЗВИТКУ КОНВЕКЦІЇ В УКРАЇНІ

На початку ХХІ ст. проблема вивчення стихійних метеорологічних явищ стала більш актуальною у зв'язку зі значним збільшенням кількості випадків та тривалості цих явищ, що пов'язано зі змінами у кліматичній системі, зумовленими як природними, так і антропогенними факторами.

Найбільші зміни повторюваності та інтенсивності небезпечних і стихійних явищ у теплий період спостерігаються з кінця ХХ – початку ХХІ ст. Ці зміни зумовлені зростанням приземної та середньої температури тропосфери, які супроводжувались збільшенням її вологовмісту і привели до зростання інтенсивності конvekції та потужності опадоутворюючих процесів.

Особливості географічного положення України, синоптичних процесів та велика різноманітність кліматичних умов сприяють частому виникненню стихійних метеорологічних явищ і зумовлюють надзвичайну складність їх у просторі і часі. Стихійні метеорологічні явища зазвичай спостерігаються у комплексі, що значно посилює їх негативний вплив. В період найбільш інтенсивного потепління відбулося зростання частоти стихійних явищ і у порівнянні з минулими роками змінилося співвідношення стихійних явищ [11].

За своєю природою екстремальні події можна умовно поділити на дві групи. Перша – це екстремальні явища в масштабах синоптичних процесів, тобто, які мають порядок від годин до доби у часі, від десятків до сотень кілометрів на великих територіях. До них відносяться урагани, смерчі, паводки та інші локальні явища – це сильні зливи та дуже сильні дощі, дуже сильні снігопади, сильний вітер, шквали, великий град, сильні хуртовини, сильна ожеледь. Вони призводять до екстремальних ситуацій, становлять загрозу для життя людини. Друга група — це екстремальні події у місячних часових і регіональних територіальних масштабах (сезонні засухи, аномальні холодні зими і т. п.). Вони призводять до так званих непрямих наслідків впливу на життя і здоров'я людини [7].

Конвективні явища, пов'язані із зонами активної конвекції (ЗАК), утворюються внаслідок складної взаємодії атмосферних процесів макро-, мезо- та мікромасштабів. До макропроцесів відносяться характерні синоптичні ситуації, до мезопроцесів – конкретні ділянки атмосферних фронтів, лінії нестійкості, мезомасштабні конвективні комплекси; до мікропроцесів – параметри окремих частин конвективних хмар, фазовий стан хмарних часток і т.ін. До розвитку конвективних збурень атмосфера повинна бути статистично нестійка, для оцінки якої, особливо вище рівня конденсації, не завжди зручне просте порівняння дійсного і адіабатичного вертикального градієнта температури, оскільки вологоадіабатичний градієнт не постійний і змінюється в залежності від температури і тиску. Стан атмосфери під впливом циркуляційних умов, денного прогріву або нічного вихолодження приземного шару безперервно змінюється, що ускладнює можливість точної оцінки утворення збурень конвективного характеру. У добовому ході у теплий період конвективні процеси досягають максимального розвитку на 15-18 год. [3, 5].

Найчастіше конвекція спостерігається при умовній нестійкості стратифікації повітря ($\gamma_a > \gamma > \gamma_{ва}$) вище граничного шару атмосфери. У залежності від причин, що приводять до виникнення нестійкості повітря та обумовлюють розвиток конвекції, її підрозділяють на термічну, вільну і вимушену.

Якщо в результаті денного прогріву в граничному шарі атмосфери встановлюється сухоадіабатичний градієнт, а у вище розташованих шарах спостерігається співвідношення $\gamma_a > \gamma > \gamma_{ва}$, то від поверхні землі розвивається конвекція. До рівня конденсації термічна конвекція буде сухоадіабатичною, вище – вологоадіабатичною. Цей вид конвекції розвивається переважно влітку, в денні години, в антициклонах, що руйнуються, циклонах та улоговинах, сідловинах і малоградієнтних баричних полях.

При різкому зменшенні з висотою адвекції тепла або зростанні адвекції холоду вище граничного шару виникає сухо- чи надсухоадіабатичний градієнт

температури $\gamma \geq \gamma_a$ і тоді будь-який імпульс приведе до розвитку так званої «вільної» конвекції. Цей вид конвекції відмічається головним чином у теплих секторах циклонів навесні і восени, в будь-який час доби, коли прогрів повітря від поверхні землі невеликий.

Якщо упорядкований підйом призводить до насичення значного шару повітря, при збереженні градієнта температури більше вологоадіабатичного або при збільшенні його до $\gamma > \gamma_{ва}$, то розвивається так звана «вимушена» конвекція. Причиною її виникнення може бути упорядкований підйом повітря, неоднорідність розподілу температури і вологості повітря та динамічна турбулентність. Вимушена конвекція розвивається в зонах атмосферних фронтів, у циклонах і на навітряних схилах гір у будь-який час доби і року [12].

Оскільки основним чинником, що впливає на інтенсивність конвекції є температура повітря, то її зміна впливає на зміну інтенсивності конвекції і, відповідно, на інтенсивність та повторюваність конвективних явищ погоди. Найбільша нестійкість в атмосфері спостерігається у теплий період, особливо в літні місяці. У цей період величина енергії нестійкості у три-чотири рази вища, ніж у холодний. Підвищення температури повітря, збільшення вертикальних градієнтів температури призводять до зростання нестійкості атмосфери і при значному вологовмісті – до розвитку інтенсивної конвекції. Оскільки найбільших значень температура повітря на значній частині країни досягає у липні (середня за місяць температура коливається від 18 до 23°C), саме у цьому місяці відмічаються найбільші значення енергії нестійкості, розвивається найбільш інтенсивна конвекція і утворюється максимальна кількість небезпечних і стихійних конвективних явищ погоди [1-2].

У весняні місяці атмосфера в Україні є більш нестійкою, ніж восени. Це зумовлено великим вологовмістом повітря у весняний період. Деяке зростання енергії нестійкості взимку обумовлене посиленням циклонної діяльності в цей період. Нестійкість атмосфери в Україні збільшується з північного сходу на південний захід. При цьому найбільша нестійкість спостерігається в

Українських Карпатах, на Причорноморській і Приазовській низовинах, на навітряних схилах Волино-Подільської, Придніпровської і Донецької височин. Найбільш інтенсивні конвективні процеси спостерігаються в Приазов'ї. У цьому регіоні відмічається найвища в Україні середня за місяць температура повітря – 23°C . Крім того, близькість мілководного теплового моря, температура поверхні води в якому може досягати $27-30^{\circ}\text{C}$, призводить до збільшення вологовмісту повітря і, відповідно, зростання нестійкості атмосфери.

Оскільки величина енергії нестійкості залежить від температури і вологовмісту повітря, для яких характерний добовий хід, то і нестійкість атмосфери істотно міняється впродовж доби: вночі атмосфера в Україні має незначну нестійкість, розвивається слабка конвекція; у денні години вона може збільшуватися майже вдвічі.

У теплий період в Україні переважає (87,6%) слабка конвекція. Помірна і дуже сильна конвекція спостерігається рідко (близько 5%) і переважно в липні. При сильній нестійкості в Україні середня величина CAPE перевищує $3000 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$, а на півдні – $3500 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$, висота рівня конденсації опускається нижче 900 гПа, а потужність конвективно-нестійкого шару може перевищувати 600 гПа, швидкість висхідних рухів при цьому досягає $80-90 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а вологовміст атмосфери коливається від $12 \text{ г}\cdot\text{кг}^{-1}$ на півночі до $15 \text{ г}\cdot\text{кг}^{-1}$ на півдні країни. Купчасто-дощові хмари, які при цьому формуються нерідко розвиваються вище тропопаузи, виникають дуже сильні грози зливи, град, шквал, смерчі. Із збільшенням енергії нестійкості інтенсивність конвективних явищ збільшується. При цьому із збільшенням середньої величини CAPE від 600 до $1000 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$ в Україні найбільш імовірна поява сильних злив, тому серед конвективних явищ вони мають найбільшу повторюваність. Імовірність появи великого граду, сильного шквалу та смерчів збільшується з подальшим ростом енергії нестійкості атмосфери [1].

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГРАД

2.1 Визначення та характеристики

Град – це округлі або неправильної форми частинки льоду, що випадають, в основному, в теплий період року з потужних купчасто-дощових хмар зі значними висхідними рухами та високим вологовмістом [3-4, 12].

На повторюваність, інтенсивність та діаметр граду впливають місцеві орографічні особливості, висота місця над рівнем моря. Найчастіше (4-6 днів на рік) він випадає в Українських Карпатах і Кримських горах, цьому сприяє розвиток висхідних потоків, посилення турбулентності у приземному шарі повітря і, як наслідок, збільшення конвективної хмарності [5-6]. На рівнині середнє число днів з градом не перевищує двох, дещо більше – на височинах (Волинська, Подільська, Придніпровська, Приазовська, Донецька). На узбережжі морів та великих водойм кількість випадків крупного граду майже вдвічі менша, оскільки термічні інверсії, що виникають в умовах бризової циркуляції, послаблюють конвекцію. Дуже рідко інтенсивні градові процеси розвиваються на північному сході (Сумська область) та на крайньому сході (Луганська область) країни, де вологозапас повітряних мас недостатній для розвитку процесів такої інтенсивності.

Град спостерігається переважно у теплу пору року. Ранньої весни (березень) та пізньої осені (листопад) град випадає рідко. Починаючи з квітня число днів з градом поступово зростає і досягає максимуму у травні-червні. Зимом випадання граду надзвичайно рідкісне явище. У річному ході максимум повторюваності крупного граду припадає на літній сезон. За рік найчастіше град випадає 1-2 дні. У середньому за сезон буває до 5 періодів з градом, у роки із сильно розвинутою градовою діяльністю.

Град випадає переважно (понад 40%) о 15-18 год, коли відбувається найбільший розвиток термічної конвекції. На півдні до 30% випадків граду відмічається о 12-15 год, тобто максимум повторюваності граду збігається з максимумом розвитку конвекції. У нічні та ранкові години ймовірність граду невелика (до 3%). Крупний град відмічається в основному у денні години.

Град – одне із найменш тривалих явищ погоди. Випадання граду зазвичай триває від декількох хвилин до чверті години (70-80%). Повторюваність граду, який триває від 15 до 30 хв. становить 15%, а в Українських Карпатах і Кримських горах >30 %. Град тривалістю понад 45 хв відмічається дуже рідко й переважно у горах.

Град на території розподіляється нерівномірно й характеризується значною плямистістю. Плями мають досить різну форму площею від декількох десятків до декількох сотень квадратних кілометрів. Такі градобиття можуть охопити одночасно декілька областей як поряд розташованих, так і віддалених на значну відстань. У середині плям градини зазвичай мають максимальний розмір. Град може випадати у вигляді видовжених смуг, шириною від сотень метрів до десятків кілометрів. У літні місяці (травень-липень) град може спостерігатися одночасно у декількох областях. Весною (квітень), наприкінці літа (серпень) і на початку осені (вересень), град, зазвичай, фіксується на окремих метеостанціях. Під час граду переважає західний і північно-західний вітер (35-45%). В умовах гірської місцевості напрям вітру визначається орографією. Найчастіше град випадає за температури повітря біля землі 18-22°C. Випадання граду супроводжується зниженням температури повітря на 6-8°C, іноді понад 10°C [3-5, 12].

Величина збитків залежить від розміру градин, їх щільності, інтенсивності випадання. За ступенем небезпечності град поділяють відповідно діаметру [10]:

- 1) НЯ I рівня безпеки – град діаметром 6-19 мм будь-якої тривалості;
- 2) СМЯ II рівня безпеки – град діаметром 20-39 мм будь-якої тривалості;
- 3) СМЯ III рівня безпеки – град діаметром ≥ 40 мм будь-якої тривалості.

Під розміром граду розуміється найбільша відстань по кожній осі градини, проте від кулястої форми град дуже далекий. За спостереженнями встановлено, що у більшості випадків форма градин нагадує сплюснутий сфероїд - чим більше градина у розмірі, тим більше вона сплюснута. Для градин близько 5 мм у діаметрі відношення мінімального та максимального діаметрів складає близько 0,95, а для градин розміром 50 мм – вже близько 0,6. Насправді форми градин більше нагадують сфероїд із великою кількістю «виростів», спрямованих у різні боки. Дослідження вказують на незліченну кількість варіацій форм [17-20]. Ще одна особливість пов'язана з внутрішньою структурою окремих градин, які мають чергування білястих (матових) і прозорих шарів льоду в результаті етапів їхнього формування – рис.2.1.

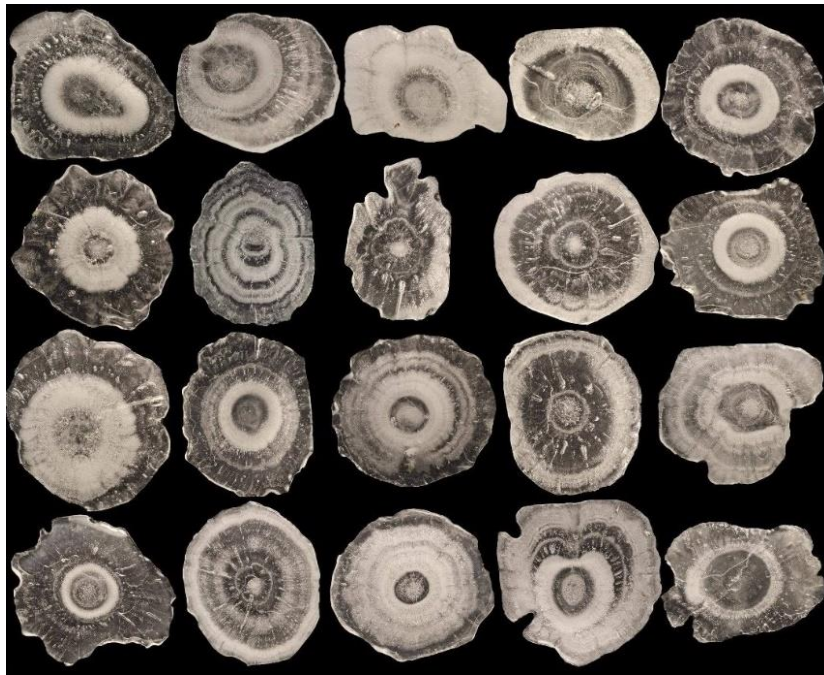


Рисунок 2.1 – Кільцева структура градин: чергування білого та прозорого льоду, що утворюються під час «сухої» та «вологої» стадій зростання граду

Незвичайні форми граду іноді спостерігаються й в Україні – рис. 2.2.

Для зростання граду необхідно поєднання кількох умов: наявність зародку (частки розміром менше 1 см, зазвичай це або замерзла крапля, або мокрий сніг,

що зліпся, або снігова крупа), велика зона переохолоджених крапель води (тобто краплі, що знаходяться в рідкому стані за від'ємної температури) та потужний підйом повітря (висхідні потоки).



21.06.2016 Закарпаття:
м. Свалява, с. Вільхівці



06.06.2019 Одеська обл.
м. Арциз



11.06.2020 Прикарпаття:
м. Калуш



25.07.2023 Тернопільська обл., Чортківський р-н

30.08.2023 Волинь

28.07.2023 Дніпро

Камінь-Каширський р-н



26.06.2021 Київська обл.
Бучанський р-н

06.07.2023 Київська обл.
с. Димер

02.06.2024 Мена
Чернігівська обл.

Рисунок 2.2 – Кільцева структура градин

Підхоплений висхідним потоком, кристал льоду (зародок) перетворюється на град, коли він замерзає у верхніх шарах атмосфери. Він може залишатися в хмарі до 10-15 хвилин, поступово збільшуючись у розмірах. Ріст граду може

бути «сухим» та «вологим». Це залежить від кількості переохолоджених крапель у хмарі, розміру граду, температури поверхні граду та навколишнього повітря.

Сухе зростання відбувається, коли навколо небагато крапель води, і в результаті поверхня градини дуже холодна. Водяна пара з навколишнього повітря сублімується на ньому, утворюючи непрозорий матовий шар льоду. На цьому етапі град росте досить повільно. Велика кількість переохолоджених крапель води та більш тепла поверхня граду призводять до швидкого росту. Поверхня градини тане, до неї активно приєднуються переохолоджені краплі з хмари. У цей час утворюється прозорий шар льоду – це стадія вологого росту. Обидві стадії можуть чергуватись кілька разів під час підйому або горизонтального перенесення градин у хмарі, що в результаті призводить до кільцевої структури градин при поперечному їй розгляді.

Експериментально встановлено, що в Сб спостерігається збільшення вертикальної швидкості повітряного потоку з висотою і вона досягає максимуму в середній частині хмари [4, 12]. При такому розподілі швидкості висхідного потоку в конвективній хмарі створюються умови для формування зони, у якій спостерігається накопичення твердих і рідких великокрапельних часток. Ця зона називається зоною акумуляції. Вона розміщується над рівнем, де швидкість конвективного потоку досягає максимуму. Градини ростуть у зоні акумуляції лише тоді, коли ця зона розташовується вище ізотерми 0°C . Ріст градин залежить від температури навколишнього повітря і водності хмари в зоні акумуляції. При максимальній швидкості конвективного потоку $W_{\text{max}} > 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, висхідний потік може підтримувати градину діаметром 5 мм. Можливість випадання граду на поверхню землі залежить від розміру градин на рівні нульової ізотерми. Град починає випадати з хмари, коли швидкість сталого падіння градин стане рівною або більше максимальної швидкості конвективного потоку в хмарі – градини стають достатньо важкими і вони падають на землю. Імовірність граду збільшується, якщо на АТ-500 спостерігається адвекція холоду, а на АТ-850 – адвекція тепла (рис.2.3).

Для України у більшості випадків (40%) характерне випадання дрібного інтенсивного граду. Повторюваність крупного граду становить близько 20%. Максимальний розмір градин на значній території становить 50-80 мм, а в окремих місцях перевищує 100 мм [5, 13].

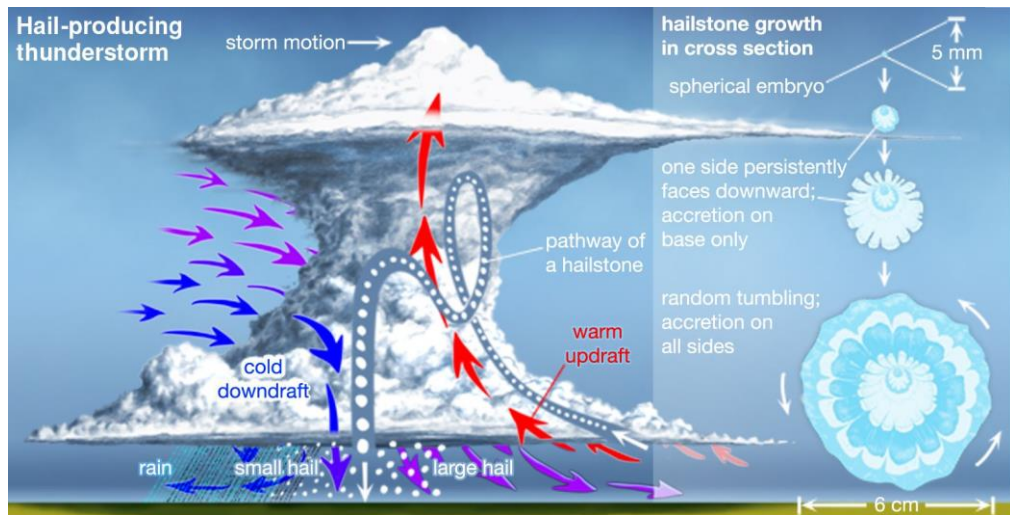


Рисунок 2.3 – Схема утворення граду у грозовій хмарі

2.2 Синоптичні процеси формування граду

Градоутворення відбувається під впливом циркуляційних факторів від макро- до мезомасштабу, що визначають потенційні енергетичні можливості повітряної маси та термодинамічні умови формування і розвитку градових процесів різної інтенсивності, а також мікрофізичні параметри, які обумовлюють механізми зародження та росту граду [3-6, 12-13].

Розвиток градових хмар спричинений інтенсивними конвективними процесами на атмосферних фронтах. Термічна конвекція, яка виникає внаслідок нестійкої стратифікації атмосфери, також може зумовлюватися прогріванням повітряної маси від підстильної поверхні при внутрішньомасових атмосферних

процесах. Найбільшої інтенсивності градоутворення досягає у тих випадках, коли ці процеси збігаються.

Найбільша повторюваність (57%) граду пов'язана з проходженням холодних фронтів і фронтів оклюзії. Дещо менша (47%) – з внутрішньомасовими процесами. У літні місяці формування граду найчастіше відбувається під впливом фронтальних процесів – 75% випадків граду пов'язане з холодними фронтами, 19 % – з фронтами оклюзії і лише 5% з теплими фронтами. У квітні та вересні випадіння граду зумовлено внутрішньомасовими процесами [3-5].

Узагальнені синоптичні ситуації, що сприяють градоутворенню:

- a) град утворюється на холодному фронті, особливо поблизу вершини хвильового збурення (центральної частини циклону), при переміщенні його зі швидкістю $\geq 30 \dots 40 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$. Градові хмари розташовуються зазвичай ланцюжком над приземним положенням холодного фронту з відхиленням від нього на $\pm 50 \text{ км}$. При зменшенні швидкості переміщення холодного фронту і в міру віддалення від центра циклону, імовірність розвитку градових хмар зменшується, за швидкості руху холодного фронту $\leq 10 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$ град малоімовірний;
- b) малорухомий фронт із хвильовими збуреннями, що зміщуються уздовж фронту зі швидкістю $\geq 30 \dots 40 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$. Градові хмари розвиваються на ділянці холодного фронту хвилі і розташовуються ланцюжком уздовж лінії його приземного положення. Чим більша швидкість руху хвилі, тим імовірніше розвиток градових хмар, за швидкості руху хвилі $\leq 10 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$ град малоімовірний;
- c) фронт оклюзії, особливо ділянка поблизу точки оклюзії і центра циклону при переміщенні його зі швидкістю $\geq 30 \dots 40 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$. Градові хмари розташовуються ланцюжком уздовж приземного його положення ($\pm 25 \text{ км}$), а також у зоні верхнього холодного фронту. При швидкості переміщення фронту $\leq 10 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$ град малоімовірний;

- d) неглибока барична улоговина у теплому секторі циклону, на периферії антициклону, в малоградієнтному баричному полі на приземній карті погоди. В улоговині, що окреслюється іноді лише однією проміжною ізобарою (ізогіпсою), при високих денних температурах повітря біля поверхні землі ($\geq 26...28^{\circ}\text{C}$), точці роси $\geq 8...10^{\circ}\text{C}$, у другій половині дня можуть розвинути потужні конвективні хмари з грозами, зливами, шквалами і градом (лінії нестійкості);
- e) передня і центральна частина осередку (улоговини) холоду в тропосфері (улоговини або замкнутого осередку холоду на картах ВТ-500/1000).

Найбільш інтенсивні зливи, що супроводжуються шквалами, інтенсивними грозами та катастрофічними градобоями розвиваються у суперкоміркових хмарах [4, 21]. Суперкомірка – найбільш високоорганізована грозова хмара, що має одну зону висхідного потоку. Розмір комірки величезний: діаметр порядку 50 км, висота 10-15 км (нерідко верхня межа проникає в стратосферу) з єдиним напівкруглим ковадлом. Швидкість висхідного потоку в суперкомірковій хмарі значно вищий, ніж в інших типах грозових хмар – до $40-60 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Основною особливістю, що відрізняє суперкоміркову хмару від хмар інших типів, є наявність обертання (рис.2.4).

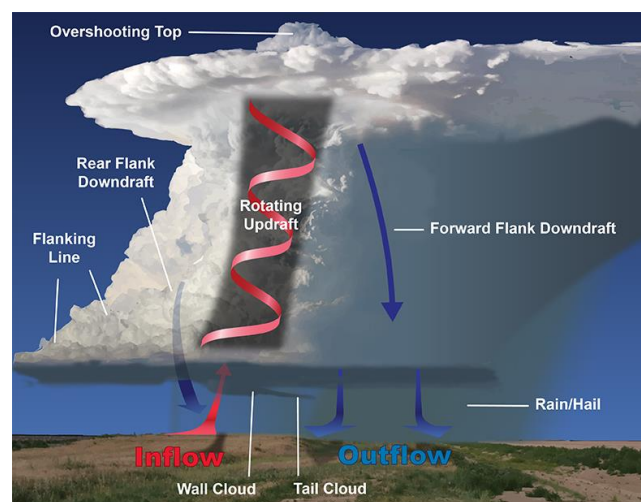


Рисунок 2.4 – Поперечний переріз зрілої суперкомірки з основними характеристиками та моделями вітру

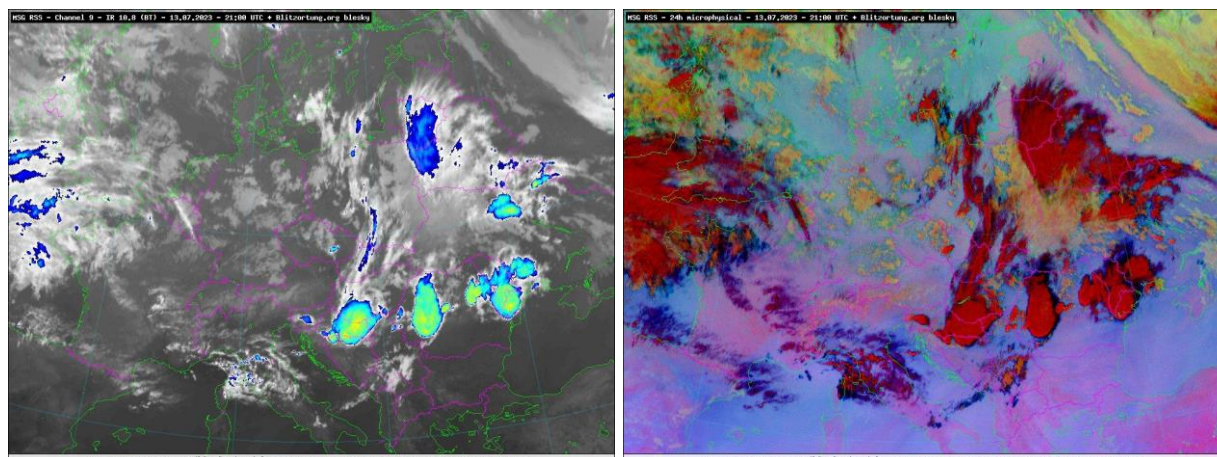
Обертвий висхідний потік у суперкомірковій хмарі зумовлює екстремальні погодні явища.

Навколишні умови є основним чинником у формуванні суперкоміркової хмари – необхідна дуже сильна конвективна нестійкість повітря, температура повітря біля поверхні землі (до грози) $\geq 27 \dots 30^\circ\text{C}$, вітер змінного напрямку, що викликає обертання. Головною умовою для утворення суперкомірки є зсув вітру в середній тропосфері [21].

Для аналізу потужної конвективної хмарності застосовують дані радіолокаторів. У разі сильно розвиненої конвекції поява С_б хмар з градом, смерчами, шквалами та стихійними опадами супроводжується збільшенням значень максимальної висоти радіолуни. Критерій грозонебезпеки, який використовують в оперативній практиці, визначає факт існування грози в інформаційній комірці 30×30 км за максимальною висотою радіолуни H_{\max} і радіолокаційною відбиваністю $\lg Z_3$ у шарі на 2÷2,5 км, який перевищує рівень нульової ізотерми. Існує критичне значення: $H_{\max} \geq 13$ км, яке є з параметрів розпізнавання зон активної конвекції (ЗАК) [6].

Суперкомірки розвиваються на холодних фронтах і фронтах оклюзії за типом холодного фронту при сильній статистичній нестійкості та великих зсувах вітру при його слабкому обертанні. Суперкомірки зустрічаються відносно рідко і складають до 10% усіх градових осередків. Це найбільш довготривалі конвективні системи, із тривалістю існування до 4 год. [3-4, 6, 12].

На сучасному етапі про посиленні конвекції над Європою в цілому суперкомірки стали спостерігатися частіше. Приклад кількох суперкомірок за супутниковими знімками хмарності 13 липня 2023 р. на півдні та південному сході Європи наведено на рис.2.5. Інфрачервоний знімок з нанесенням температури ВМХ вказує на потужність розвитку конвекції зі зледенілими вершинами ковадел С_б, а композит Microphysics 24h чітко виділяє 3 суперкомірки у багряних тонах великого діаметру з дочірніми осередками.



IR enhancements

RGB Microphysics 24h

Рисунок 2.5 – Зображення суперкомірок на супутникових знімках хмарності 13.07.2023 р., 21 UTC

У суперкомірці над Південно-західним Причорномор'ям відмічалися шквали $15-21 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ на Одещині, посилена грозова діяльність, зливи. А на півдні Європи у двох суперкомірках спостерігається надзвичайно несприятливі умови – негода охопила Словенію, Хорватію, Угорщину, Сербію та Румунію. У Словенії в Гореня Лепа Вас випав найбільший град діаметром 13,8 см; в Угорщині – до 5 см, Хорватії – до 6,5 см; на сході Румунії – до 7 см. Відмічалися значні збитки від градобію – пошкоджені дахи, автомобілі, вікна, фасади будинків, посіви сільськогосподарських культур тощо.

3 ПРОГНОЗ ГРАДУ

3.1 Прогностичні підходи

Загальним для методів прогнозу граду є врахування синоптичних умов, побудова та аналіз фактичної або прогностичної кривих стратифікації T і T_d .

При прогнозі граду насамперед аналізуються синоптичні умови, сприятливі утворенню градових хмар: у 90...95% випадків їх розвиток над рівнинною місцевістю відбувається на холодних фронтах та фронтах оклюзії з боку теплого повітря. Імовірність випадіння граду збільшується, якщо на карті АТ-500 спостерігається адвекція холоду, а на карті АТ-850 – адвекція тепла. Особлива увага приділяється положенню і динаміці осередків холоду на карті АТ-500 [3-4,12].

Метод Глушкової. Враховується механізм виникнення граду в процесі опадоутворення, а саме – вертикальна складова швидкості повітряного потоку. За допомогою моделі конвекції за величиною $(T'-T)_{max}$ розраховується $(w_k)_{max}$. В окремих випадках таких рівнів може бути кілька. Визначається температура повітря на рівні $(w_k)_{max}$ та висота нульової ізотерми. Чим нижче розташовується нульова ізотерма, тим вища імовірність випадіння граду.

Максимальна швидкість конвективного потоку визначається за формулою:

$$w_{max} = \sqrt{2Ac_p \Delta T_{max} \eta \lg \frac{p_1}{p_2}}, \quad (3.1)$$

де A – механічний еквівалент теплоти, $A \sim 1$;

c_p – питома теплоємність, $c_p = 1$;

ΔT_{max} – максимальне відхилення кривої стану від кривої стратифікації;

η – коефіцієнт переходу від теплової енергії до кінетичної, $\eta = \frac{T_0 - T_c}{T_0}$, де T_0 –

абсолютна температура на рівні конденсації; T_c – температура сухого повітря на рівні ΔT_{max} за абсолютною шкалою (суха адіабата проводиться через рівень конденсації до перетину з рівнем ΔT_{max});

$\lg \frac{p_1}{p_2}$ – визначається таблично (табл.3.1); p_1 – тиск на рівні конденсації; p_2 – тиск

на верхній межі вологонестійкого шару.

Таблиця 3.1 – Значення $\lg \frac{p_1}{p_2}$

| p ₁ , гПа | p ₂ , гПа | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 900 | 850 | 800 | 750 | 700 | 650 | 600 | 550 | 500 | 450 | 400 | 350 | 300 | 250 | 200 |
| 900 | 0 | 0,02 | 0,05 | 0,06 | 0,11 | 0,14 | 0,17 | 0,21 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,41 | 0,47 | 0,55 | 0,65 |
| 850 | | 0 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,15 | 0,19 | 0,23 | 0,28 | 0,33 | 0,39 | 0,45 | 0,53 | 0,65 |
| 800 | | | 0 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,36 | 0,42 | 0,50 | 0,60 |
| 750 | | | | 0 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,13 | 0,17 | 0,22 | 0,27 | 0,33 | 0,36 | 0,47 | 0,57 |
| 700 | | | | | 0 | 0,03 | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,19 | 0,24 | 0,30 | 0,34 | 0,44 | 0,51 |
| 650 | | | | | | 0 | 0,03 | 0,07 | 0,11 | 0,16 | 0,21 | 0,27 | 0,33 | 0,41 | 0,51 |
| 600 | | | | | | | 0 | 0,04 | 0,08 | 0,13 | 0,18 | 0,24 | 0,30 | 0,38 | 0,48 |
| 550 | | | | | | | | 0 | 0,04 | 0,09 | 0,14 | 0,20 | 0,26 | 0,34 | 0,44 |
| 500 | | | | | | | | | 0 | 0,05 | 0,10 | 0,16 | 0,22 | 0,30 | 0,40 |
| 450 | | | | | | | | | | 0 | 0,05 | 0,11 | 0,17 | 0,25 | 0,35 |
| 400 | | | | | | | | | | | 0 | 0,06 | 0,12 | 0,20 | 0,30 |
| 350 | | | | | | | | | | | | 0 | 0,05 | 0,14 | 0,24 |
| 300 | | | | | | | | | | | | | 0 | 0,08 | 0,18 |
| 250 | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0,10 |
| 200 | | | | | | | | | | | | | | | 0 |

Величину w_{max} можна визначити графічно – рис.3.1.

Встановлено, що градини діаметром більше 3 см, пролітаючи через теплий шар атмосфери, тануть незначно, тому, при w_{max} в хмарі більше

30 м с^{-1} , радіус градин (R , см), що досягають поверхні землі, можна визначити за формулою:

$$R = \nu \cdot w_{max}^2, \quad (3.2)$$

де $\nu = 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ с}^2 \cdot \text{см}/\text{м}^2$; $w_{max}, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

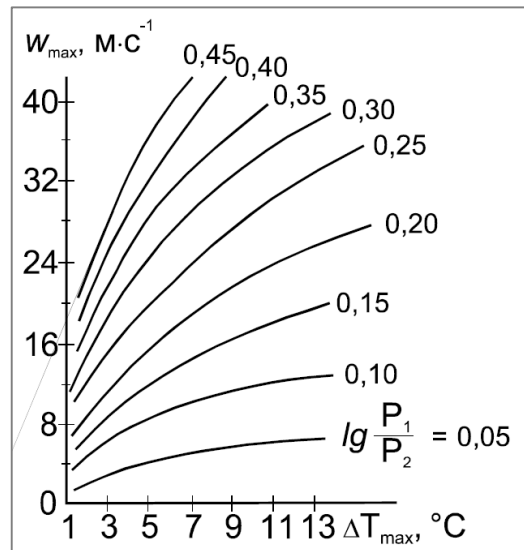


Рисунок 3.1 – Графік для визначення максимальної швидкості конвективного потоку w_{max} у хмарах

Градини меншого розміру при падінні нижче ізотерми 0°C звичайно встигають частково розтанути. Для визначення кінцевого розміру градини може бути використаний графік на рис.3.2 (а), на якому представлена залежність кінцевого розміру градин від висоти ізотерми 0°C при різних значеннях w_{max} .

У випадках, коли $w_{max} \geq 25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ та при проходженні через пункт прогнозу масштабної системи Сб, пов'язаної з циклоном, розмір градин, що випадають, визначають за допомогою графіка на рис.3.2 (б).

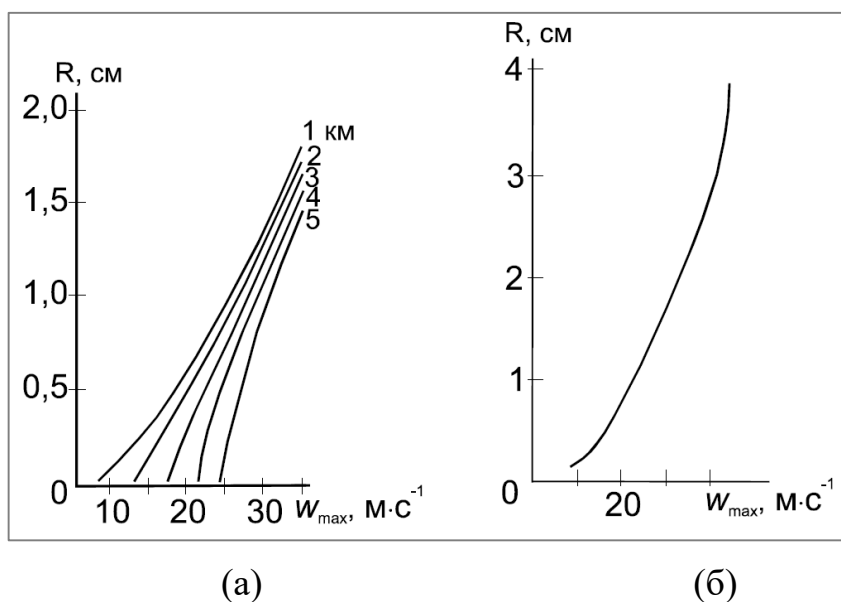


Рисунок 3.2 – Визначення розміру градин R (см) з врахуванням температури танення (а) і без врахування танення (б)

Прогноз гроз та граду методом Решетова складається у три етапи.

Перший етап – аналіз карт погоди за нічні та ранкові години із залученням супутникової та радіолокаційної інформації, а також в прогноз синоптичного положення на поточну та наступну добу.

Другий етап – розрахунок температури повітря та точки роси біля поверхні землі і на висотах до рівня 100 гПа, побудова кривої стану і визначення ряду параметрів конвекції.

Третій етап – за дискримінантними функціями, формулами та графіками складається прогноз граду, а також денних та нічних гроз.

У методиці розраховують три параметри, які знаходяться за допомогою аерологічної діаграми: висота вершин купчасто-дощової хмарності ($H_{вмх}$), значення температури повітря на цій висоті ($T_{вмх}$) і вертикальна потужність хмари ($\Delta H_{вмх}$) у шарі від'ємних температур (від висоти нульової ізотерми в частинці, що піднімається, до рівня $H_{вмх}$).

При прогнозі температури і точки роси від землі до 100 гПа, в тому числі висоти і температури тропопаузи на 36 год, рекомендується враховувати напрямок та швидкість вітру на рівні 700 гПа.

Прогноз максимальної висоти конвективних хмар полягає у аналізі відхилень кривої стану від кривої стратифікації температури навколишнього повітря на рівнях 800, 700, 600, 500, 440, 360, 280, 210, 150, 130 гПа. Вказані рівні є серединами елементарних площин, на які розбиті площі позитивної S_+ і негативної S_- енергії нестійкості на АД.

Визначається температура повітря на максимальному рівні конвекції $T_{вмх}$: чим нижча ця температура, тим більш імовірні зливи, грози та град.

Виконується розрахунок вертикальної потужності конвективних хмар в зоні від'ємних значень температур: $\Delta H_{вмх} = H_{вмх} - H_0$, де H_0 – висота нульової ізотерми у хмарі в км.

Максимальна швидкість висхідного конвективного потоку в градовій хмарі визначається за формулою:

$$w_{\max} = 0,9 \sum_{850}^{\Delta T_{\max}} \Delta T, \quad (3.3)$$

де $\sum_{850}^{\Delta T_{\max}} \Delta T$ – сума відхилень хмарної адіабати від кривої температур навколишнього повітря на рівнях 850, 700, 600, 500, 400 гПа і т.д. до рівня найбільшого відхилення хмарної адіабати від кривої температури в навколишньому повітрі – ΔT_{\max} .

Для прогнозу гроз отримані дискримінантні функції з використанням найбільш інформативних сполучень по два і три предиктори:

$$L_1 = 0,12 \cdot \Delta H_{вмх} - 0,02 \cdot T_{вмх} - 0,56; \quad (3.4)$$

$$L_2 = 0,22 \cdot \Delta H_{вмх} - 0,035 \cdot T_{вмх} + 0,05 \cdot w_{\max} - 1,64. \quad (3.5)$$

При значеннях L_1 і $L_2 \geq 0$ у прогнозі погоди слід вказувати грозу для пункту (території), якщо над ним очікуються сприятливі для розвитку гроз синоптичні умови. Якщо при цих умовах L_1 і $L_2 < 0$, то грозу очікувати не слід.

Для прогнозу граду використовують наступні дискримінантні функції:

$$L_3 = 0,52 \cdot H_{вмх} - 0,12 \cdot T_{вмх} - 4,73; \quad (3.6)$$

$$L_4 = 0,36 \cdot H_{вмх} - 0,08 \cdot T_{вмх} + 0,53 \cdot w_{\max} - 5,36. \quad (3.7)$$

При значеннях L_3 і $L_4 \geq 0$ у прогнозі погоди слід вказувати град у потужних конвективних хмарах по пункту (території), якщо очікуються сприятливі для розвитку градових хмар синоптичні умови. Якщо при цих умовах L_3 і $L_4 < 0$, то град очікувати не слід. За дискримінантною функцією L_3 побудований графік для прогнозу граду – рис. 3.3 [3-4,12].

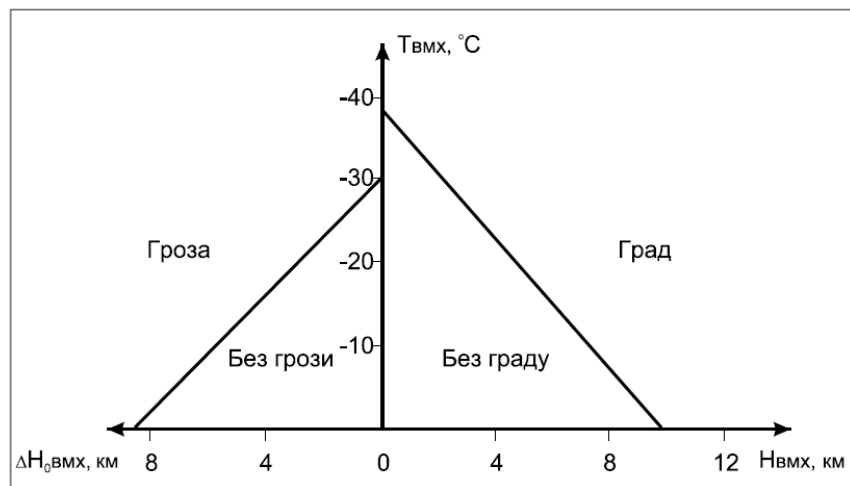


Рисунок 3.3 – Номограма для прогнозу грози і граду за методом Г. Д. Решетова.

3.2 Індекси нестійкості атмосфери

Для визначення ступеня нестійкості атмосфери і, як наслідок можливості утворення конвективної хмарності, Всесвітніми центрами зональних прогнозів) розраховуються з використанням чисельних прогностичних моделей кілька індексів, що характеризують умови конвекції [14, 16].

Наведемо основні з них.

1. *VT* – Vertical Totals индекс:

$$VT = T_{850} - T_{500}, \quad (3.8)$$

де T_{850} і T_{500} – температура повітря на рівнях 850 гПа і 500 гПа відповідно.

Якщо $VT > 28$, тропосфера має високий потенціал конвективної нестійкості, достатнім для формування грози.

2. *VT* – Cross Totals индекс (табл.3.2):

$$CT = Td_{850} - T_{500}, \quad (3.9)$$

де Td_{850} – точка роси на рівні 850 гПа;

T_{500} – температура повітря на рівні 500 гПа.

Таблиця 3.2 – Показники індексу *VT*

| <i>VT</i> | Характеристика атмосферної нестійкості |
|-----------|--|
| < 18 | тропосфера має низький потенціал конвективної нестійкості, який недостатній для грозової діяльності. |
| 18 - 19 | помірна нестійкість, слабка грозова діяльність. |
| 20 - 21 | висока нестійкість, грози. |
| 22 - 23 | енергія нестійкості при якій можливі сильні грози. |
| 24 - 25 | висока енергія нестійкості, сильні грози. |
| > 25 | дуже висока енергія нестійкості, дуже сильні грози. |

3. TT – Total Totals индекс (табл.3.3):

$$TT = VT + CT, \quad (3.10)$$

де CT – Cross Totals индекс;

VT – Vertical Totals индекс.

Таблиця 3.3 – Показники індексу TT

| TT | Характеристика атмосферної нестійкості |
|---------|---|
| < 44 | грозова діяльність неможлива |
| 44 - 45 | окрема гроза або кілька гроз |
| 46 - 47 | розсіяні грозові осередки |
| 48 - 49 | значні кількість гроз, окремі з яких сильні |
| 50 - 51 | розсіяні сильні грозові осередки, окремі |
| 52 - 55 | значна кількість осередків сильних |
| > 55 | численні сильні грози з сильними смерчами |

4. Li – Lifted index.

Індекс Li – це різниця температур навколишнього повітря і деякого одиничного об'єму повітря, яке піднялося адіабатично від поверхні землі (чи заданого рівня) до 500 гПа. Li обчислюється з врахуванням втягування навколишнього повітря і характеризує термічну стратифікацію атмосфери по відношенню до вертикальних рухів повітря. Якщо индекс Li додатний, то атмосфера стійка (табл.3.4).

5. Ti – Thompson index (табл.3.5):

$$Ti = Ki - Li, \quad (3.11)$$

де Ki – индекс Вайтинга;

Li – Lifted index.

Таблиця 3.4 – Показники індексу Li

| TT | Характеристика атмосферної нестійкості |
|----------------------|--|
| $Li \geq 6$ | глибока інверсія, атмосфера дуже стійка, низхідні рухи повітря |
| $1 \leq Li \leq 5$ | стійкий стан атмосфери, купчаста хмарність гарної погоди |
| $0 \geq Li \geq -2$ | невелика нестійкість, конвективна хмарність зі зливами, при інтенсивному денному прогріві або у зоні атмосферних фронтів – з грозами та градом |
| $-3 \geq Li \geq -5$ | помірна нестійкість, сильні грози |
| $Li \leq -6$ | висока нестійкість, дуже сильні грози |

Таблиця 3.5 – Показники індексу Ti

| Ti | Характеристика атмосферної нестійкості |
|-----------|--|
| < 25 | без грози |
| 25 - 34 | можливі грози |
| 35 - 39 | грози, місцями сильні |
| ≥ 40 | сильні грози |

6. *SWEAT* – Severe Weather ThrEAT індекс (табл.3.6):

$$SWEAT = 12 \cdot Td850 + 20 \cdot (TT - 49) + 3,888 \cdot F850 + 1,944 \cdot F500 + (125 \cdot [\sin(D500 - D850) + 0,2]), \quad (3.12)$$

де $Td850$ – температура точки роси на рівні 850 гПа,

TT – Total Totals індекс,

$F850$ – швидкість вітру на рівні 850 гПа,

$F500$ – швидкість вітру на рівні 500 гПа,

$D500$ і $D850$ – напрям вітру на рівнях 500 гПа і 850 гПа відповідно.

Другу складову рівняння прирівнюють до 0, якщо $TT \leq 49$; остання складова рівняння буде рівна 0, якщо не виконується хоча б якась з умов:

- $D850$ у діапазоні від 130 до 250°;

- D500 у діапазоні від 210 до 310°;
- Різниця напрямку вітру (D500 – D850) додатна;
- F850 та F500 швидкості вітру $\leq 7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Таблиця 3.6 – Показники індексу *SWEAT*

| SWEAT | Характеристика атмосферної нестійкості |
|------------|---|
| < 250 | немає умов для виникнення сильних гроз |
| 250-350 | існують умови для сильних гроз, граду та шквалів |
| 350-500 | існують умови для дуже сильних гроз, крупного граду, сильних шквалів, смерчів |
| ≥ 500 | умови для дуже сильних гроз, крупного граду, сильних шквалів, сильних смерчів |

7. *CAPE* – Convective Available Potential Energy.

Індекс *CAPE* – це потенціальна енергія конвективної нестійкості, яка безпосередньо пов'язана з вертикальною швидкістю висхідних потоків (вимірюється у $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ або $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$). Вищі значення енергії нестійкості вказують на більш інтенсивну конвекцію в хмарі, тобто більш небезпечні погодні явища (табл.3.7). На аерологічній діаграмі запаси нестабільності енергії – це ділянки, розташовані між кривими стратифікації та стану. Положення кривих надають висновки щодо енергії нестійкості.

Загальний запас енергії в атмосфері *CAPE* знаходиться за формулою:

$$CAPE = \int_{z_f}^{z_n} g \left(\frac{T_v - T_e}{T_e} \right) dz, \quad (3.13)$$

де z_f – висота рівня вільної конвекції;

z_n – висота рівня рівноваги (нейтральна плавучість);

T_v – віртуальна температура частинки повітря, *K*;

T_e – температура навколишнього повітря (фактична), *K*;

g – прискорення вільного падіння.

Таблиця 3.7 – Показники індексу *CAPE*

| <i>CAPE</i> | Характеристика атмосферної нестійкості |
|-------------|--|
| 400-1000 | невелика нестійкість (<i>Cu</i> , <i>Cb</i> , слабкі зливові опади) |
| 1000-2500 | помірна нестійкість (<i>Cb</i> зі зливами і грозами); |
| 2500-3500 | сильна нестійкість (грози, місцями сильні); |
| ≥ 3500 | дуже сильна нестійкість (сильні і дуже сильні грози, смерчі). |

8. Індекс (параметр) Уайтінга (Вайтінга) *Ki*.

За даними ранкового зондування розраховується параметр *Ki*:

$$Ki = 2 \cdot T_{850} - T_{500} - D_{850} - D_{700}, \quad (3.14)$$

де *T*₈₅₀ і *T*₅₀₀ – температура на рівнях 850 гПа та 500 гПа відповідно;

*D*₈₅₀ та *D*₇₀₀ – дефіцит точки роси на рівнях 850 гПа та 700 гПа відповідно.

Різниця *T*₈₅₀ – *T*₅₀₀ характеризує нахил кривої стратифікації і відповідно нестійкість атмосфери. Чим більше ця різниця, тим більша енергія нестійкості, і тим вище розташований рівень конвекції.

Якщо *Ki* < 20, то грозу очікувати не слід, якщо 20 < *Ki* < 25 – ізольовані грози, якщо 25 < *Ki* < 30 – окремі грози, якщо *Ki* > 30 – грози повсюдно.

9. Індекс стійкості Шоуолтера (США) – ΔT .

Індекс Шоуолтера являє собою різницю між фактичною температурою повітря на поверхні 500 гПа (*T*₅₀₀) і температурою, якої набуває частка повітря, якщо вона сухоадіабатично підіймається з рівня 850 гПа до рівня конденсації, а потім вологадіабатично до рівня 500 гПа (*T*_{а500}). За методикою рекомендується побудова кривої стратифікації від рівня 850 гПа.

Якщо індекс ΔT < 3°C – імовірні зливи; ΔT < 0°C – грози; ΔT < -6°C – грози зі шквалом. Індекс стійкості ΔT нерепрезентативний, коли між 850 і 500 гПа розташована фронтальна поверхня або інверсія.

4 АНАЛІЗ ГРАДОУТВОРЕННЯ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ У ТЕПЛИЙ ПЕРІОД 2023 Р

Вихідними даними для дослідження виступили: бюлетені погоди, карти і таблиці розподілу штормових явищ погоди, штормові зведення, оперативна синоптична інформація за даними програми АРМсин, супутникові знімки хмарності та карти погоди, індекси нестійкості атмосфери [14-16, 22].

4.1 Статистичні показники

На першому етапі проаналізовано повторюваність граду за даними МС України з квітня по жовтень 2023 р. Вихідні дані представлено у табл.4.1.

Відсутні дані частини Херсонської та Запорізької областей, повністю – АР Крим, Луганської та Донецької областей, що ускладнює порівняльний регіональний аналіз поширення явища погоди.

Всього за теплий період зафіксовано 49 випадків з градом.

Аналізуючи формування граду за рівнем небезпечності, відмітимо, що всі випадки належать до категорії НЯ I рівня безпеки – град діаметром 6-19 мм, а саме – 23 епізоди, всі інші випадки – дрібний град (діаметр до 6 мм).

Град діаметром більше ≥ 10 мм спостерігався 8 разів, найкрупніший град влітку 2023 р. зафіксовано на МС Конотоп 2 липня – 16 мм.

За частотою явища – двічі град відмічався на МС Івано-Франківськ, Нижні Ворота, Селятин, Стрий, Маневичі, Сміла, Одеса, Сербка, Первомайськ.

Більшість випадків з градом супроводжувалися грозовим становищем, у 21-му випадку – із сильним дощем чи зливою. Найсильніші опади спостерігалися при конвективних процесах на Одещині 7 липня – МС Роздільна,

зливовий дощ сильний 35 мм за 1 год., сильний дощ 54 мм за 2 год., проте град відмічався дрібний, діаметром лише 2 мм.

Таблиця 4.1 – Повторюваність граду на території України у теплий період 2023 р.

| Дата/ час | Метеостанція | Характеристики градових процесів | |
|---------------------|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| | | діаметр, мм | явища погоди |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 08.04.2023 12:38 | 33593 Сміла (Черкаська обл.) | 10 | град, гроза |
| 08.04.2023 13:38 | 33215 Коростень (Житомирська обл.) | 7 | град, гроза |
| 09.04.2023 11:40 | 33837 Одеса | 2 | град, зливовий дощ сильний |
| 09.04.2023 12:01 | 33325 Житомир | 3 | град, гроза |
| 09.04.2023 13:50 | 33182 Маневичі (Волинська обл.) | 5 | град |
| 10.04.2023 10:15 | 33598 Новомиргород (Кіровоградська обл.) | 5 | град |
| 10.04.2023 11:06 | 33213 Овруч (Житомирська обл.) | 3 | град |
| 10.04.2023 12:37 | 33466 Миронівка (Київська обл.) | 2 | град |
| 10.04.2023 13:30 | 33421 Ямпіль (Хмельницька обл.) | 3 | град |
| 15.04.2023 10:08 | 33513 Стрий (Львівська обл.) | 6 | град, гроза, зливовий дощ сильний |
| 22.04.2023 11:24 | 34304 Коломак (Харківська обл.) | 5 | град, гроза |
| 22.04.2023 11:32 | 33759 Затиштя (Одеська обл.) | 3 | град |
| 27.04.2023 11:32 | 33723 Комісарівка (Дніпропетровська обл.) | 8 | град, гроза |
| всього за квітень | | 13 | |
| 25.05.2023 10:35 | 33633 Міжгір'я (Закарпатська обл.) | 10 | град, гроза, сильний дощ 16 мм |
| 25.05.2023 17:25 | 33645 Яремче (Ів.-Франківська обл.) | 5 | град, гроза |

Продовження таблиці 4.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|---|----|---|
| 26.05.2023 12:20 | 33801 Лошкарівка (Дніпропетровська обл.) | 7 | град, гроза |
| 27.05.2023 14:04 | 33699 Первомайськ (Миколаївська обл.) | 10 | град, гроза, зливовий дощ сильний |
| всього за травень | 4 | | |
| 02.06.2023 10:53 | 33446 Білопілля (Житомирська обл.) | 6 | град, гроза, пориви вітру $12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 02.06.2023 12:41 | 33526 Івано-Франківськ | 4 | град, гроза, зливовий дощ сильний, пориви вітру $16 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 02.06.2023 14:45 | 33517 Н.Ворота (Закарпатська обл.) | 6 | град, гроза, зливовий дощ дуже сильний |
| 10.06.2023 15:20 | 33646 Пожежевська (Ів.-Франківська обл.) | 5 | град, гроза, сильний дощ 26 мм за 4 год. |
| 17.06.2023 09:47 | 33657 Селятин (Чернівецька обл.) | 8 | град, гроза, зливовий дощ дуже сильний 25 мм за 2 год. |
| 20.06.2023 15:11 | 33182 Маневичі (Волинська обл.) | 8 | град, гроза |
| 21.06.2023 10:14 | 33506 Полтава | 5 | град, гроза, пориви вітру $13 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 23.06.2023 16:52 | 33524 Долина (Ів.-Франківська обл.) | 14 | град, гроза, пориви вітру $14 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 29.06.2023 14:06 | 33067 Свитязь (Волинська обл.) | 14 | град, гроза, зливовий дощ сильний |
| всього за червень | 9 | | |
| 02.07.2023 13:08 | 33261 Конотоп (Сумська обл.) | 16 | град, гроза, зливовий дощ дуже сильний, пориви вітру $16 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 06.07.2023 13:57 | 33517 Н.Ворота (Закарпатська обл.) | 4 | град, гроза, пориви вітру $17 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, сильний дощ 29 мм за 2 год. |
| 06.07.2023 13:57 | 33515 Плай (Закарпатська обл.) | 6 | град, гроза |
| 07.07.2023 12:25 | 33834 Роздільна (Одеська обл.) | 4 | град, гроза, зливовий дощ сильний 35 мм за 1 год., сильний дощ 54 мм за 2 год., пориви вітру $16 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 10.07.2023 15:35 | 34304 Коломак (Харківська обл.) | 5 | град, гроза |
| 10.07.2023 15:37 | 33593 Сміла (Черкаська обл.) | 2 | град, гроза |
| 20.07.2023 12:37 | 33837 Одеса | | град, гроза, зливовий дощ сильний, шквал $17 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 22.07.2023 14:25 | 33833 Сербка (Одеська обл.) | 5 | град, гроза, пориви вітру $12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 24.07.2023 14:55 | 33088 Сарни (Рівненська обл.) | 3 | град, гроза, зливовий дощ дуже сильний, пориви вітру $16 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 25.07.2023 20:45 | 33296 Дубно (Рівненська обл.) | 2 | град, гроза, зливовий дощ сильний |

Кінець таблиці 4.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------|---|----|---|
| 27.07.2023 15:05 | 34409 Лозова (Харківська обл.) | 6 | град, гроза, пориви вітру $14 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 27.07.2023 19:15 | 34407 Губиниха (Дніпропетровська обл.) | 6 | град, гроза |
| 30.07.2023 12:45 | 33526 Івано-Франківськ | 2 | град, гроза, пориви вітру $21 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, сильний дощ 46 мм за 4 год. |
| 31.07.2023 12:45 | 33833 Сербка (Одеська обл.) | 6 | град, гроза, шквал $24 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| всього за липень | | 14 | |
| 01.08.2023 12:14 | 33275 Суми | 8 | град, гроза |
| 07.08.2023 09:40 | 33342 Вишгород (Київська обл.) | 6 | град, гроза, пориви вітру $14 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 07.08.2023 10:48 | 33146 Покошичи (Чернігівська обл.) | 4 | град, гроза, шквал $18 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, зливовий дощ сильний |
| 07.08.2023 10:58 | 33135 Чернігів | 5 | град, гроза, пориви вітру $12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, зливовий дощ сильний |
| 20.08.2023 11:35 | 33657 Селятин (Чернівецька обл.) | 8 | град, гроза, пориви вітру $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, сильний дощ 28 мм за 3 год. |
| 23.08.2023 12:58 | 33393 Львів | 5 | град, гроза, пориви вітру $13 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ |
| 29.08.2023 14:58 | 33699 Первомайськ (Миколаївська обл.) | 14 | град, гроза, пориви вітру $13 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, зливовий дощ сильний |
| 29.08.2023 15:28 | 33513 Стрий (Львівська обл.) | 12 | град, гроза, сильний дощ 16 мм за 2 год. |
| всього за серпень | | 8 | |
| всього за вересень | | 0 | |
| 10.10.2023 12:57 | 34208 Золочів (Харківська обл.) | 6 | град |
| всього за жовтень | | 1 | |

У кількох випадках градові процеси поєднувалися із шквалоутворенням. Зокрема, найсильніший шквал зафіксовано 31 липня на МС Сербка – $24 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, це НЯ I рівня небезпеки.

Цікавим є факт, що посилення процесів градоутворення нетипово відмічалось у квітні – 13 випадків. Незначно вищий максимум – у липні, згідно середнім кліматичним показникам – 14 випадків. У вересні град не реєструвався, одноразово – у жовтні (рис.3.2). Також низька повторюваність явища у травні,

хоча в цей місяць вже посилюються конвективні процеси і відбуваються перехідні процеси на пiтній режим погоди. Очевидно, що особливості циркуляції атмосфери навесні та восени зумовили такі відхилення у місячному розподілі явища.



Рисунок 4.1 – Місячна повторюваність граду на території України

Представляє інтерес дослідити розподіл повторюваності граду територіально за регіонами України, що може показати зв'язок градоутворення з місцевими особливостями розташування метеостанцій (дані за східним і частково південним регіонами неповні) – рис.4.2.

Зареєстровані випадки граду вказують на суттєве зростання повторюваності явища на заході країни – 20 випадків з 49 (~41%). Особливо виділяється посилення градоутворення у західному регіоні у червні – 7 випадків, в той же час в інших регіонах град у червні спостерігався вкрай рідко. У липні максимум також припадає на захід країни – 5 випадків з градом. На другому місці за повторюваністю градових процесів (хоча і з удвічі нижчим показником) нетипово північ країни – 10 (20%). Цікавим є факт зростання частоти

градоутворення на півночі країни у квітні та серпні – по 4 епізоди, це найвищий показник регіонального розподілу явища цього місяця.

Не зважаючи на неповний архів даних по півдню і ще більше – сходу України, мінімум повторюваності явища припадає на центр країни – лише 4 випадки за весь теплий сезон 2023 р. При чому це 2 випадки у квітні та по одному у червні та липні, з них 3 випадки – це дрібний град та нетипово крупніший (діаметр 10 мм) у ранньовесняний період на МС Сміла 8 квітня.

Щодо регіонального місячного розподілу виділяється квітень та липень – у ці місяці град реєструвався у всіх регіонах.

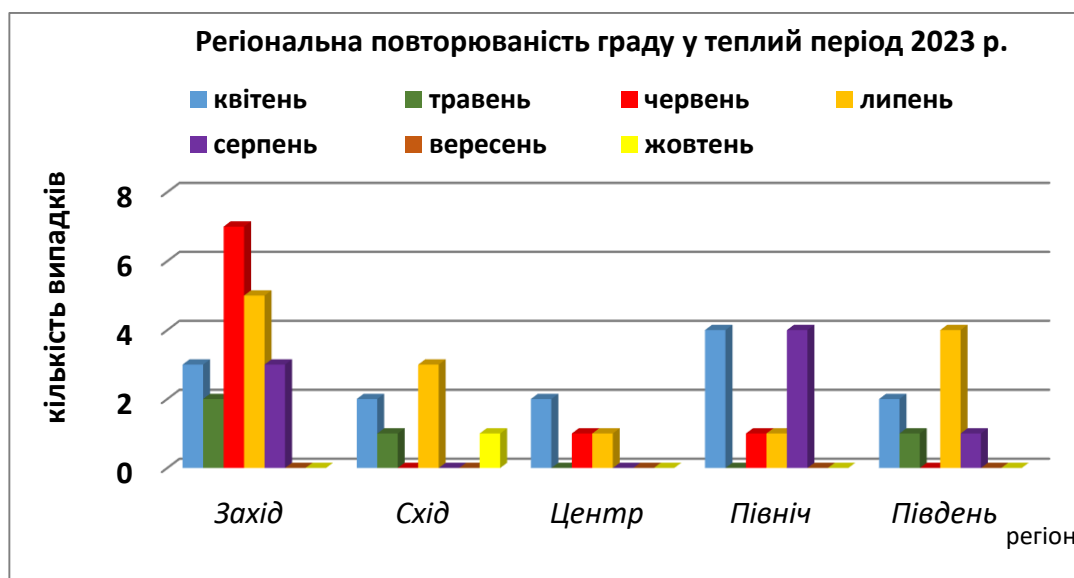


Рисунок 4.2 – Повторюваність граду за регіонами України

Аналіз такої неоднорідної повторюваності явища показав особливості циркуляційних процесів у всіх місяцях. Зокрема, до ймовірності розвитку термічної конвекції навесні, що могло б пояснити підвищення градоутворення у квітні, виділяється деяка розбіжність. Квітень та травень виділялися відсутністю високих аномалій температури повітря, тобто прогрівом підстильної поверхні до можливого імпульсу конвекції. Так, квітень 2023 року виявився в Україні дуже вологим та з температурами нижче норми та в межах норми. Середня місячна температура повітря була найвищою нетипово на північному сході, сході, у

центрі та на півдні країни – до 10-11°C, а максимальна температура не піднімалася вище 21-23°C. Також у травні майже повсюдно температурна аномалія склала $\pm 1,0^\circ\text{C}$, середня місячна не піднімалася вище 17°C (Закарпаття та південь), а от максимальна температура повітря сягала місцями 27-29°C. Отже, град навесні формувався під впливом інших умов.

Впродовж квітня чергувалися процеси посиленої фронтальної діяльності з малоградієнтними полями тиску біля поверхні землі.

У травні переважала антициклонічна циркуляція, особливо у другій половині місяця, що призвело до формування посушливих умов і зниження ймовірності конвективних процесів. На відміну від квітня, травень виявився в Україні переважно сухим, норму опадів було перевищено тільки на 12 метеостанціях. На МС Коростень та Житомир випало взагалі менше 1 мм опадів.

Як зазначалося, розподіл граду суттєво залежить від місцевих умов і для території країни за середніми кліматичними показниками найвища повторюваність граду припадає саме на західні області України. Проведене дослідження узгоджується з кліматичним розподілом явища. Так, розглядаючи західний регіон, найчастіше град відмічався у Івано-Франківській області – 5 випадків, Закарпаття – 4, по 3 випадки на Львівщині та Волині, по 2 – на Рівненщині, Чернівецьчині, 1 – Хмельниччина. При цьому, у Тернопільській області град не зафіксовано.

Влітку та восени не лише місцеві особливості визначили посилення конвекції на заході країни та нерівномірний розподіл чи відсутність граду в інших регіонах. Літо 2023 р. на території Європи характеризувалося посиленням антициклогенезом, який переривався при зміщенні із заходу та північного заходу фронтальних розділів, що впливали переважно на західні регіони України. На атмосферних фронтах формувалися зони активної конвекції (ЗАК) і комплекси небезпечних явищ погоди – злив, грози, граду, шквалів. Над іншою частиною країни здебільшого панувала спекотна суха погода. Літній режим погоди продовжився у вересні-жовтні, при цьому циркуляційні умови не сприяли розвитку конвекції (рис.4.3).

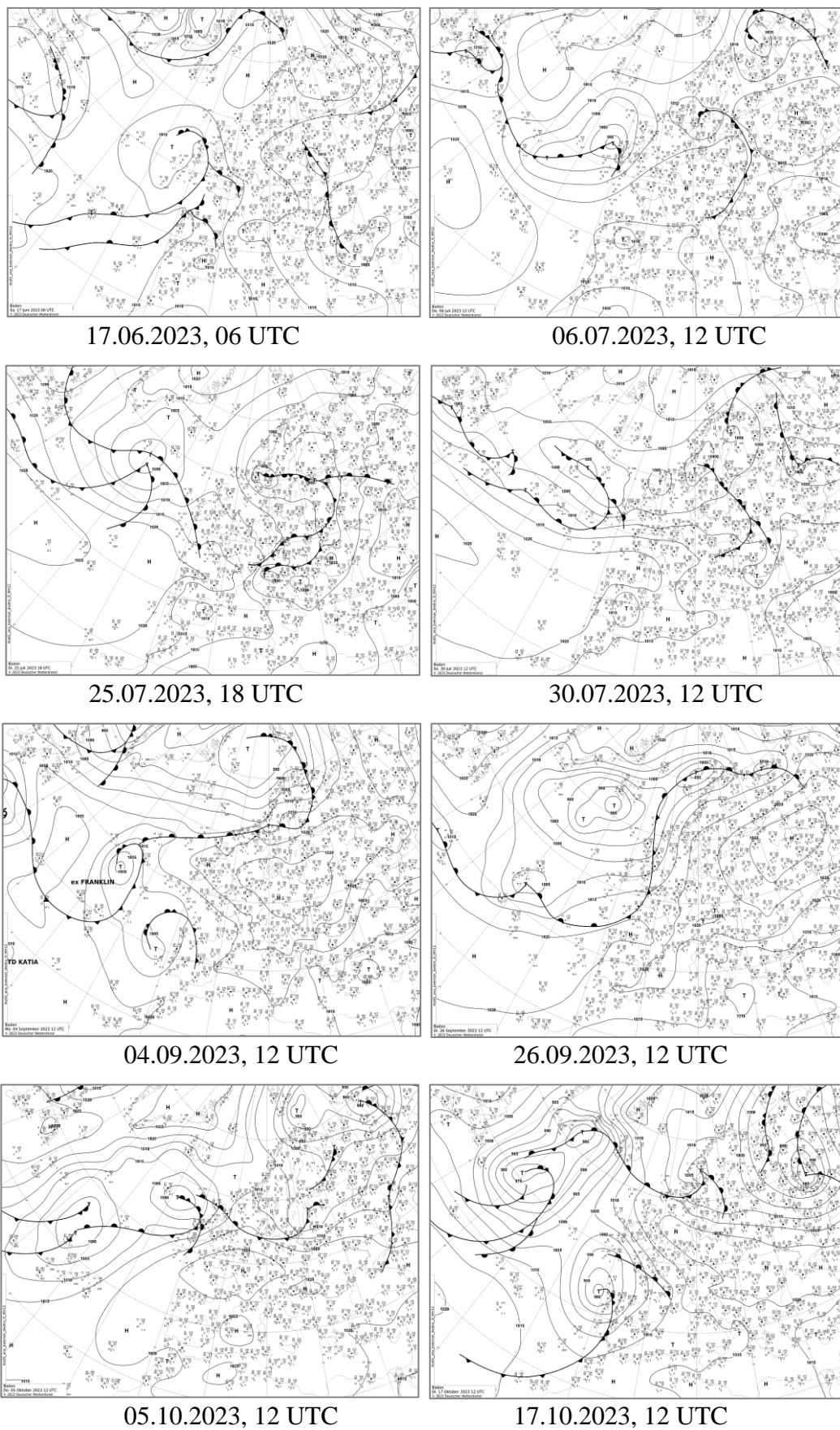


Рисунок 4.3 – Приземні карти погоди за червень-жовтень 2023 р.

Вересень виявився теплим, лише у період з 8 по 12 вересня температура дещо знизилась. Середня місячна температура була вищою від норми на 3-5°C, а на МС Київ, Одеса, Вінниця, Рівне, Івано-Франківськ, Ужгород, Чернівці та інших оновлено історичні місячні рекорди. Дощів було дуже мало. Такі умови, навпаки, не сприяли формуванню градових процесів і загалом конвективних явищ. Так само, жовтень був особливо теплим місяцем з додатними аномаліями середньої місячної температури повітря на 2-4°C. А от у третю декаду відмічалися небувало високі температури повітря і встановлення ряду температурних рекордів. При цьому у жовтні південь знову перебував у посушливих умовах, достатньо зволженими та перезволженими став північний захід та північ країни в умовах посиленої фронтальної діяльності.

У роботі проаналізовано циркуляційні процеси формування граду за синоптичною класифікацією поділу явища на фронтальний (АФ) та внутрішньомасовий (ВМ) град (табл.4.2, рис.4.4).

Таблиця 4.2 – Типи циркуляційних процесів при формуванні граду на території України влітку 2023 р.

| Дата/ час | Метеостанція | Тип процесу | | | | |
|------------------|--------------------|-------------|----|----|----|----|
| | | ВМ | АФ | | | |
| | | | ТФ | ХФ | ЛН | ФО |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 08.04.2023 12:38 | 33593 Сміла | | | | 1 | |
| 08.04.2023 13:38 | 33215 Коростень | | | | 1 | |
| 09.04.2023 11:40 | 33837 Одеса | | | | | 1 |
| 09.04.2023 12:01 | 33325 Житомир | | | | | 1 |
| 09.04.2023 13:50 | 33182 Маневичі | | | | | 1 |
| 10.04.2023 10:15 | 33598 Новомиргород | 1 | | | | |
| 10.04.2023 11:06 | 33213 Овруч | 1 | | | | |
| 10.04.2023 12:37 | 33466 Миронівка | 1 | | | | |
| 10.04.2023 13:30 | 33421 Ямпіль | 1 | | | | |
| 15.04.2023 10:08 | 33513 Стрий | | | 1 | | |
| 22.04.2023 11:24 | 34304 Коломак | 1 | | | | |
| 22.04.2023 11:32 | 33759 Затишшя | 1 | | | | |

Кінець таблиці 4.2.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------|------------------------|----|---|----|---|---|
| 27.04.2023 11:32 | 33723 Комісарівка | | | 1 | | |
| 25.05.2023 10:35 | 33633 Міжгір'я | 1 | | | | |
| 25.05.2023 17:25 | 33645 Яремче | 1 | | | | |
| 26.05.2023 12:20 | 33801 Лошкарівка | 1 | | | | |
| 27.05.2023 14:04 | 33699 Первомайськ | 1 | | | | |
| 02.06.2023 10:53 | 33446 Білопілля | | | | 1 | |
| 02.06.2023 12:41 | 33526 Івано-Франківськ | | | | 1 | |
| 02.06.2023 14:45 | 33517 Н.Ворота | | | | 1 | |
| 10.06.2023 15:20 | 33646 Пожежевська | | | 1 | | |
| 17.06.2023 09:47 | 33657 Селятин | | | 1 | | |
| 20.06.2023 15:11 | 33182 Маневичі | 1 | | | | |
| 21.06.2023 10:14 | 33506 Полтава | | | 1 | | |
| 23.06.2023 16:52 | 33524 Долина | 1 | | | | |
| 29.06.2023 14:06 | 33067 Свитязь | 1 | | | | |
| 02.07.2023 13:08 | 33261 Конотоп | 1 | | | | |
| 06.07.2023 13:57 | 33517 Н.Ворота | | | 1 | | |
| 06.07.2023 13:57 | 33515 Плай | | | 1 | | |
| 07.07.2023 12:25 | 33834 Роздільна | | | | 1 | |
| 10.07.2023 15:35 | 34304 Коломак | 1 | | | | |
| 10.07.2023 15:37 | 33593 Сміла | 1 | | | | |
| 20.07.2023 12:37 | 33837 Одеса | 1 | | | | |
| 22.07.2023 14:25 | 33833 Сербка | | | 1 | | |
| 24.07.2023 14:55 | 33088 Сарни | 1 | | | | |
| 25.07.2023 20:45 | 33296 Дубно | | | 1 | | |
| 27.07.2023 15:05 | 34409 Лозова | | | 1 | | |
| 27.07.2023 19:15 | 34407 Губиниха | | | 1 | | |
| 30.07.2023 12:45 | 33526 Івано-Франківськ | | | 1 | | |
| 31.07.2023 12:45 | 33833 Сербка | | | | 1 | |
| 01.08.2023 12:14 | 33275 Суми | 1 | | | | |
| 07.08.2023 09:40 | 33342 Вишгород | | | 1 | | |
| 07.08.2023 10:48 | 33146 Покошичи | | | 1 | | |
| 07.08.2023 10:58 | 33135 Чернігів | | | 1 | | |
| 20.08.2023 11:35 | 33657 Селятин | 1 | | | | |
| 23.08.2023 12:58 | 33393 Львів | 1 | | | | |
| 29.08.2023 14:58 | Первомайськ | 1 | | | | |
| 29.08.2023 15:28 | 33513 Стрий | 1 | | | | |
| 10.10.2023 12:57 | 34208 Золочів | 1 | | | | |
| Всього | | 24 | 0 | 15 | 7 | 3 |

При внутрішньомасових процесах град формувався у 24 випадках (~49%). Град фронтального походження – відповідно 25 випадків, з них переважає повторюваність явища у системах холодних фронтів 15 (~31%) або на лініях нестійкості – ЛН (т. зв. лінія шквалів ЛШ), ~14%. Град на передфронтальних ЛН дещо частіше формувався у червні (3), а в системах холодних фронтів – у липні (7). Внутрішньомасовий град переважав у квітні – 6 випадків, усі випадки за травень та мав підвищену однакову повторюваність у липні-серпні – по 5 випадків.

На теплих фронтах град не відмічався, у системах фронтів оклюзії – тричі (09 квітня на різних метеостанціях). Пізній жовтневий шквал мав внутрішньомасове походження.

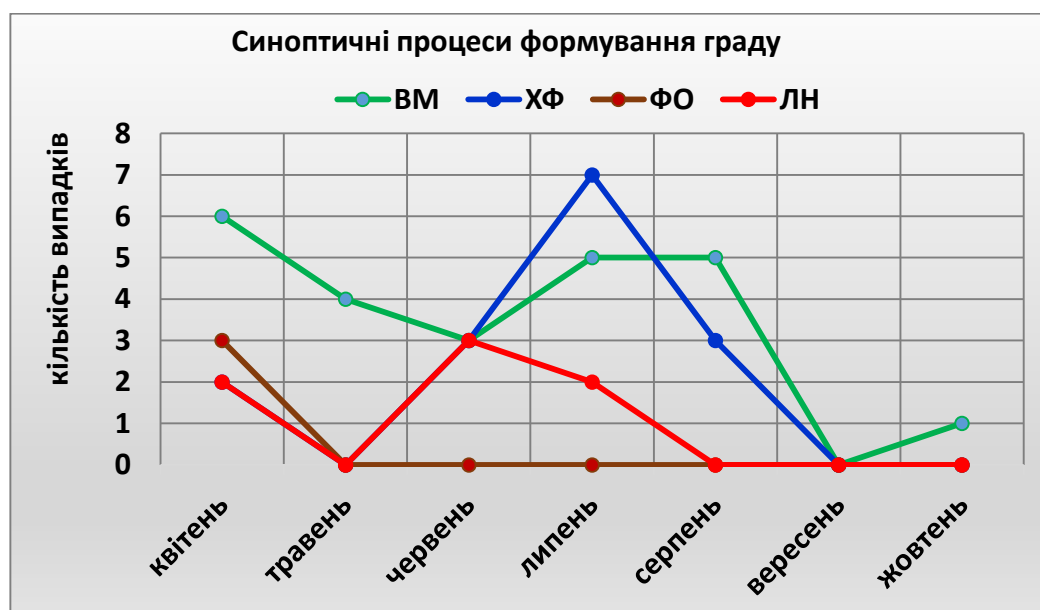


Рисунок 4.4 – Повторюваність граду за синоптичною класифікацією у теплий період 2023 р. на території України

У роботі проаналізовано час формування граду впродовж доби (табл.4.3, рис.4.5). За середніми кліматичними показниками найбільша повторюваність граду припадає на після полуденні години при максимальному розвитку конвекції. Результати роботи збігаються з кліматичними показниками.

Таблиця 4.3 – Повторюваність граду за строками спостереження на території України у теплий період 2023 р. (кількість випадків)

| Місяць | Строки спостереження, години UTC | | | | | | | |
|---------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 00-03 | 03-06 | 06-09 | 09-12 | 12-15 | 15-18 | 18-21 | 21-00 |
| Квітень | 0 | 0 | 0 | 7 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| Травень | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| Червень | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| Липень | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 3 | 2 | 0 |
| Серпень | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| Жовтень | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Всього | 0 | 0 | 0 | 15 | 24 | 8 | 2 | 0 |

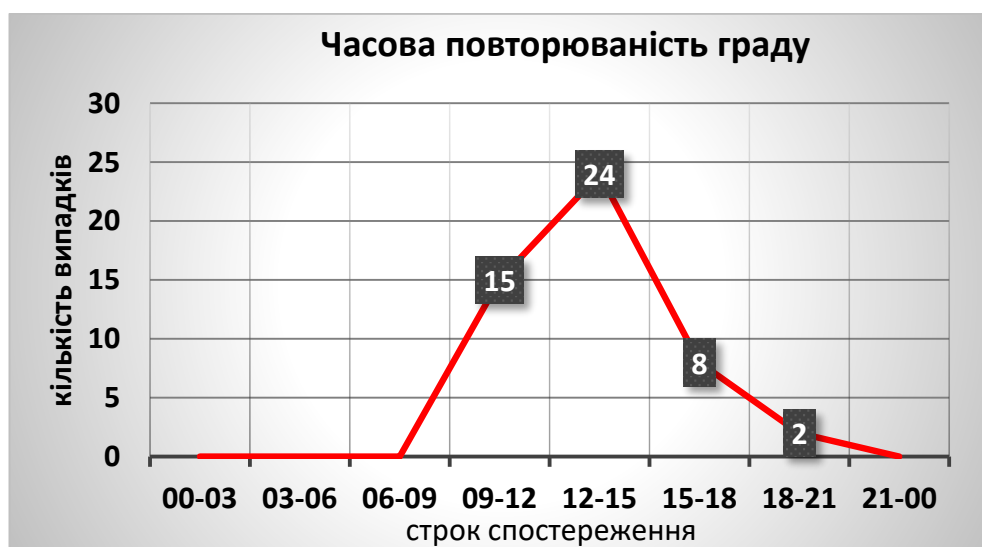


Рисунок 4.5 – Повторюваність граду за строками спостережень

За досліджуваний період найчастіше град формувався у період 12-15 годин – 24 випадки (~49%). Підвищена повторюваність явища також у проміжок часу з 9 до 12 години (~31%), дещо рідше град формувався у проміжок 15-18 год. (~16%). Вкрай рідко град спостерігався у надвечірні години – лише 2 випадки. З 21 години до 09 години град не реєструвався.

4.2 Характеристики нестійкості атмосфери

У роботі проаналізовано характеристики деяких параметрів нестійкості атмосфери та розвитку конвективної хмарності, а саме:

- 1) *CAPE* – Потенціальна енергія конвективної нестійкості.
- 2) Індекс Шоуолтера ΔT ;
- 3) ІР-знімки МШСЗ з характеристикою температури ВМХ (Radar).

Не всі випадки градоутворення характеризувалися значущими відмітками розглянутих індексів нестійкості, що в певній мірі може пояснюватися розрахунком цих показників за результатами інтерполяції, оскільки радіозондування над Україною наразі не проводиться. Більш чітко розвиток зон активної конвекції демонструють супутникові знімки з нанесенням ТВМХ, проте в поодиноких випадках з градом не відмічалось значного розвитку хмарності по вертикалі, навіть влітку.

Найбільш показовими випадками нестійкості атмосфери за індексом *CAPE* стали 11 епізодів. Показники індексу сягали вище 1000-1400 Дж·кг⁻¹ у зонах, куди входили метеостанції з градом, подекуди до 2200 Дж·кг⁻¹ – помірна нестійкість. В інших випадках значення *CAPE* здебільшого було в межах 600 Дж·кг⁻¹, тобто невелика нестійкість.

На рис.4.6 проілюстровані стиковані знімки інфрачервоного діапазону (ІР) з нанесеним полем індексу *CAPE*. Випадки зі значущими індексами *CAPE* відмічалися переважно у липні-серпні, навесні жодного разу, у червні здебільшого слабка нестійкість.

Розподіл індексу Шоуолтера ΔT у 21-му випадку з градом демонструє значущі відмітки у областях, що охоплюють метеостанції з конвективними явищами. Поле індексу Шоуолтера ΔT теж зображено на стикованих знімках ІР-діапазону задля визначення збіжності показника з полем хмарності (рис.4.7).

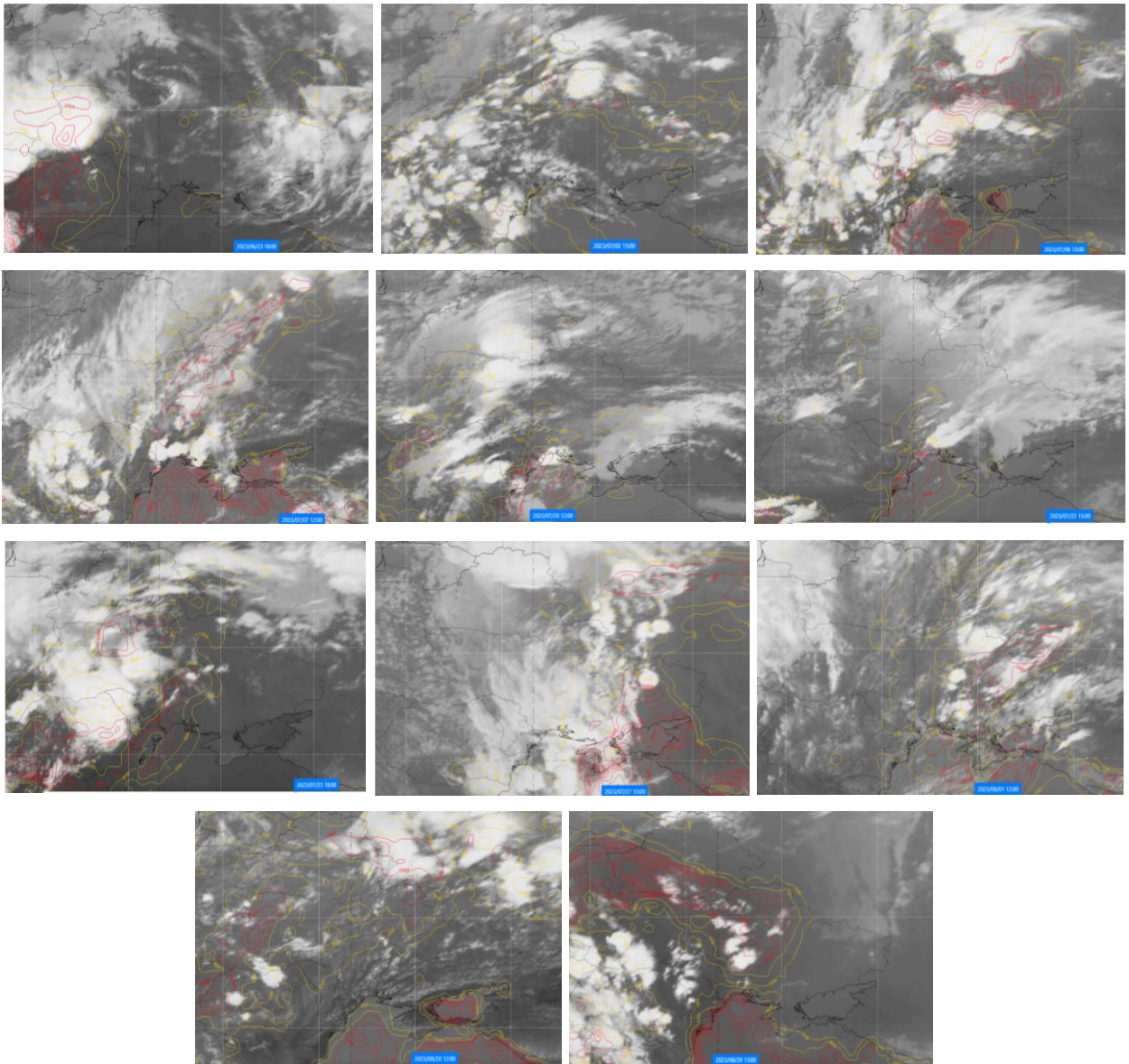


Рисунок 4.6 – Стиковані супутникові IR-знімки з полем індексу *CAPE*

Значення $\Delta T < 0^{\circ}\text{C}$ вказують на високу ймовірність грозової активності, зниження до від'ємних показників відмічається один раз при градових процесах на Харківщині 27.07.2023 р. на двох метеостанціях (град діаметром 6 мм, гроза, посилення вітру). В інших випадках здебільшого індекс рівнявся ~ 3 , тобто вказував лише на ймовірність злив.

Проте, індекс Шоуолтера ΔT нерепрезентативний, коли між 850 і 500 гПа розташована фронтальна поверхня або інверсія, тобто є більш показовим при внутрішньомасовій конвекції.

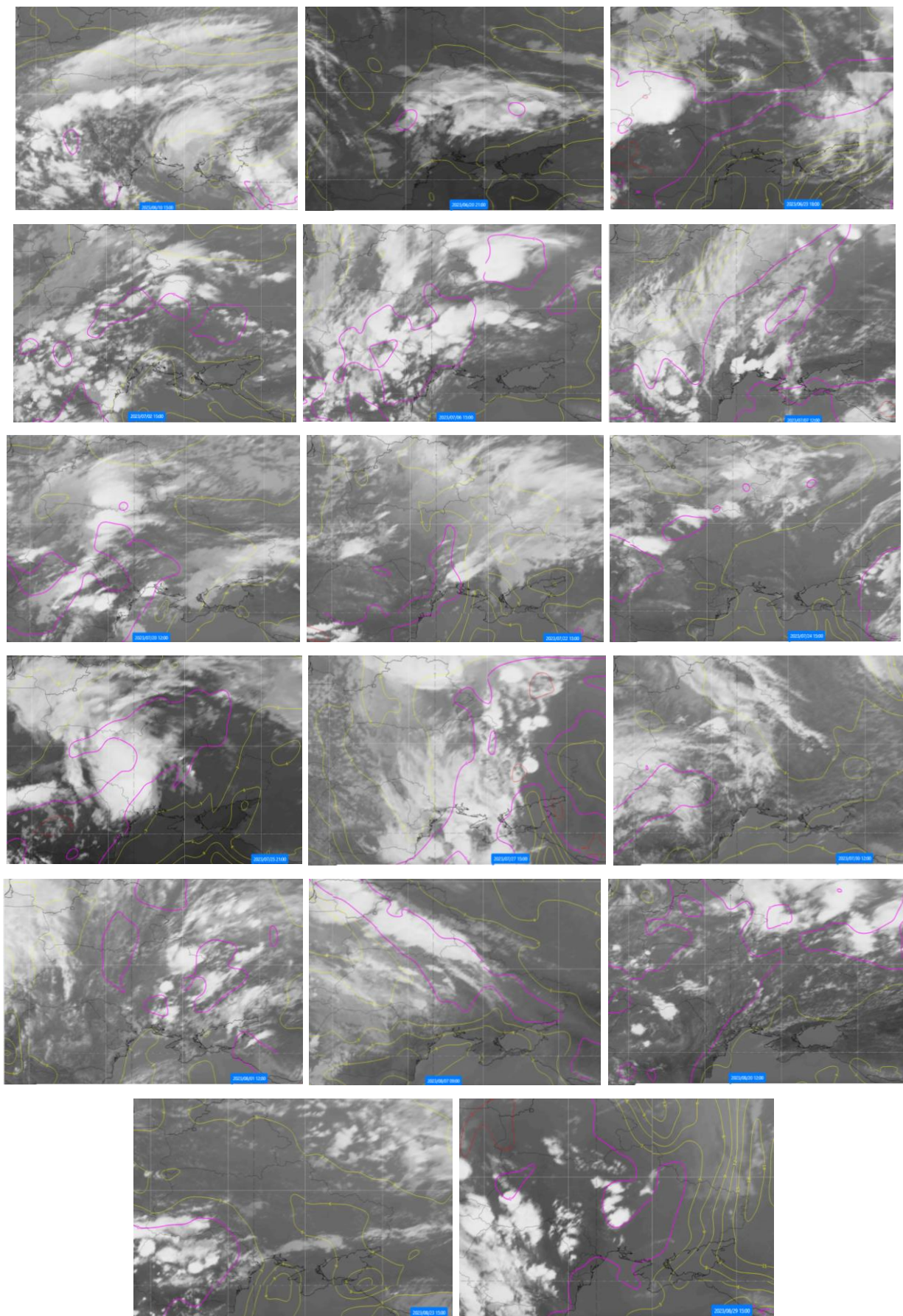


Рисунок 4.7 – Стиковані супутникові IR-знімки з полем індексу *Шоуолтера*

Активність розвитку конвекції чітко ілюструють радарні характеристики, зокрема, температура верхньої межі хмар, що показує розвиток потужної хмарності по вертикалі і зледенілі вершини ковадел С_b (рис.4.8). Для аналізу відібрано 35 випадків з градом (подекуди кілька метеостанцій за одну дату) при посиленому розвитку конвективної хмарності, як фронтального походження при загостренні градієнті у зоні фронту, так і розвиток однокоміркових, багатокоміркових та у кількох випадках суперкоміркових хмар. Таким чином, у більшості випадків з градом (71%) град формувався у зонах активної конвекції.

Розвиток потужної конвективної хмарності спостерігався впродовж всього теплого періоду, у квітні-травні також реєструвалася посилена конвекція.

Ускладнення погодних умов з утворенням суперкомірок та мезомасштабних конвективних комплексів і систем (МКК і МКС) відмічалось 5 разів: 23 червня і 2, 7, 25 та 27 липня.

Потужні МКК сформувалися 23 червня та 25 липня – масштабна хмарна система округлої форми з температурою ВМХ до 200 К, тобто -73°C . Такі низькі температури вказують на розвиток хмарності вище тропопаузи, тобто хмарність пробиває тропопаузу, розтікаючись у ковадлах, це так звана «проникаюча конвекція». 23 червня град відмічався на МС Долина, діаметр 14 мм; у західному регіоні в цій системі реєструвалися шквали, сильні зливи, відмічалось підтоплення, падіння дерев, руйнування інфраструктури (Івано-Франківщина, Львівщина). 25 липня град сформувався на Рівненщині у дочірніх осередках, а в МКС над Центральною та Південною Україною – сильні зливи та грози.

Град найбільшого діаметру у досліджуваний період зареєстрований 2 липня на МС Конотоп –16 мм, явище внутрішньомасового походження виникло у суперкомірковій хмарі над Сумщиною [9].

Також посилена конвекція сформувалася у системі ХФ 10 червня. Супутниковий знімок показує чітку лінійну структуру хмарності, в яку вкраплені окремі потужні кластери С_b з температурою ВМХ до -68°C . Град відмічався на МС Пожежевська, діаметр 5 мм, сильний дощ 26 мм за 4 год.

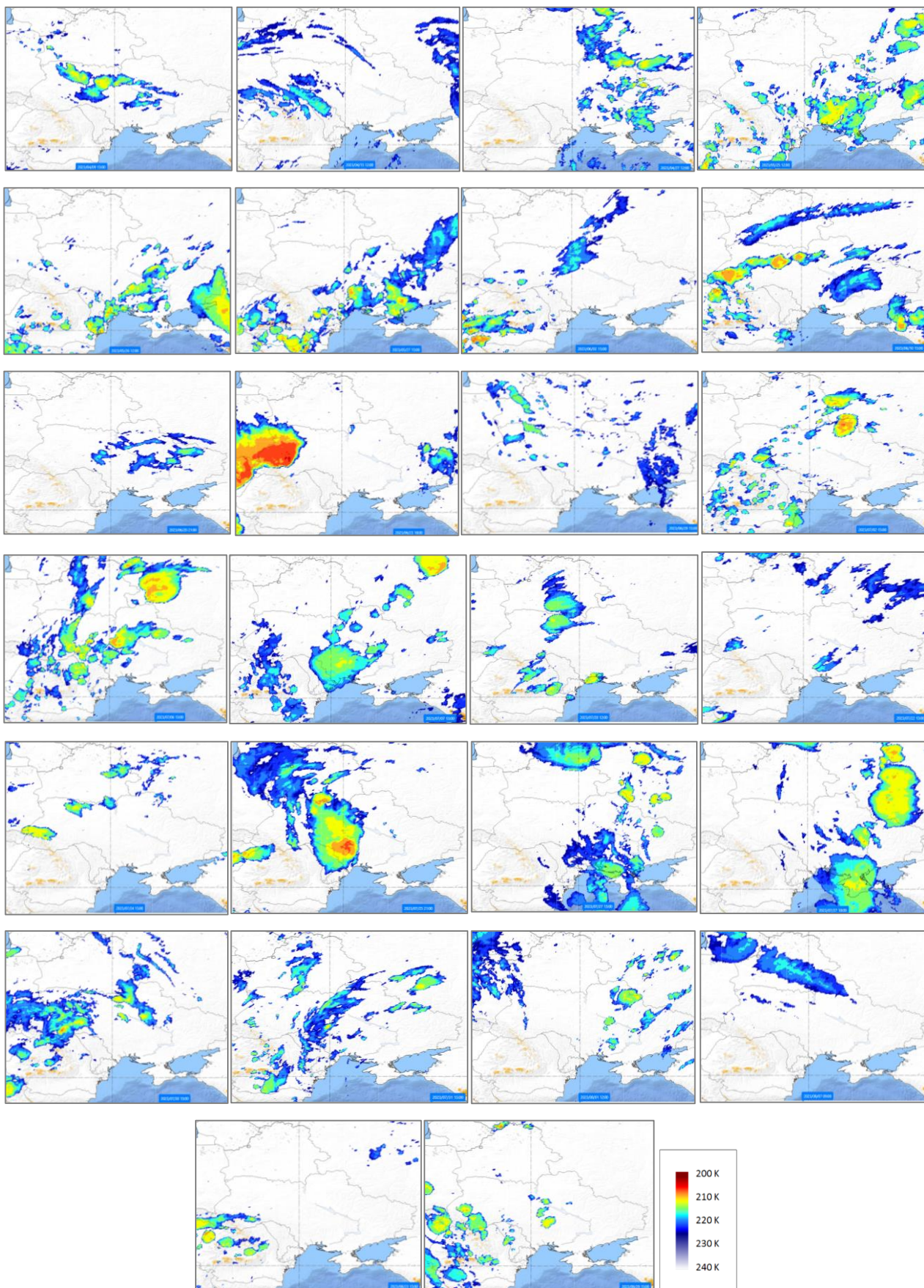


Рисунок 4.8 – Супутникові знімки MSG IR 10,8 Enhanced

4.3 Циркуляційні умови виникнення раннього та пізнього граду

Окремим етапом роботи досліджено процеси формування граду в ранні весняні та пізні осінні строки. Для аналізу використано оперативний синоптичний матеріал і супутникову інформацію [14-15, 22].

Град у найбільш ранні строки спостерігався 8 квітня [8]. Зауважимо, що у ряді пунктів град не був зареєстрований через дискретність явища.

Град відмічався близько полудня на півночі та у центрі країни, супроводжувався грозовою діяльністю. Явище мало внутрішньомасове походження, фронтальні розділи за синоптичним приземним аналізом відсутні. Над країною переважає малоградієнтне поле тиску, при цьому територія Східної Європи знаходиться під впливом двоцентрового антициклону з центрами над Скандинавією та Східноєвропейською рівниною (рис.4.9).

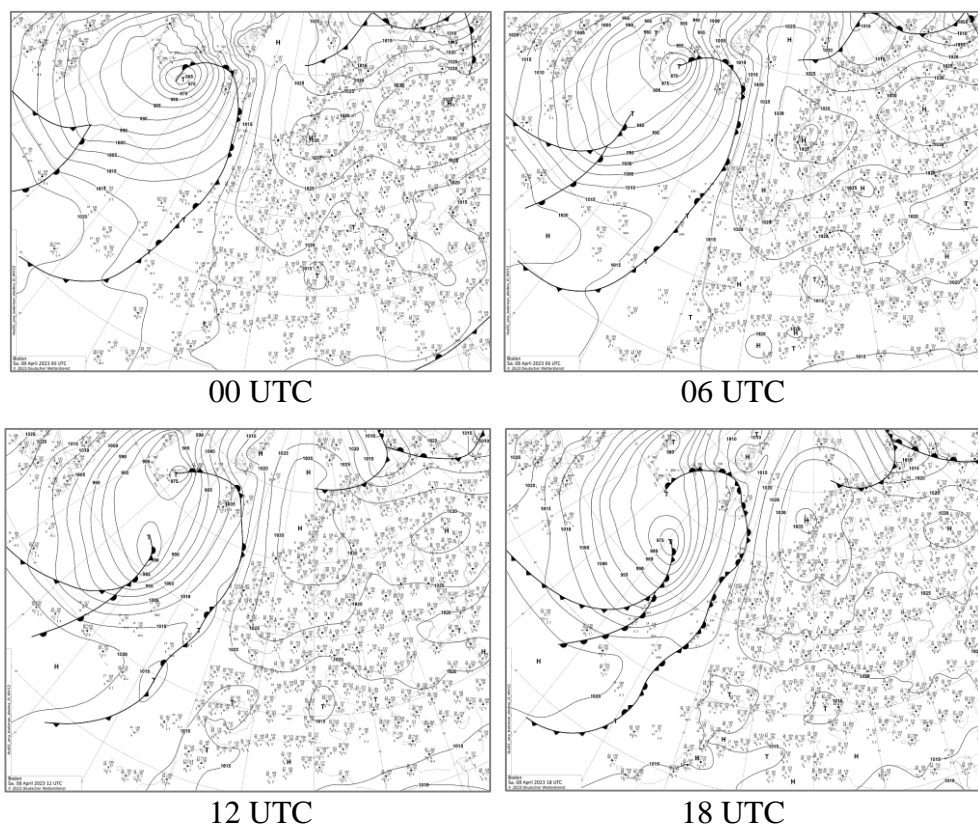


Рисунок 4.9 – Приземні карти погоди 08.04.2023 р.

Впродовж доби змін синоптичного положення немає, конвективні явища виникли на південній периферії високого тиску.

На такий календарний строк термічна конвекція ще не була достатньо розвинена, про що свідчить поле температури повітря. Проте, на МС Сміла град був досить крупний – 10 мм. Так, максимуми приземної температури повітря не перевищували 18°C, більш прогрітою була територія північного сходу, сходу, південного сходу та центру країни. На рівні 850 гПа простежується деякий градієнт температури повітря між західним і південно-західним регіоном та іншою частиною країни з виокремленням осередку холоду над Угорщиною і Румунією (рис.4.10).

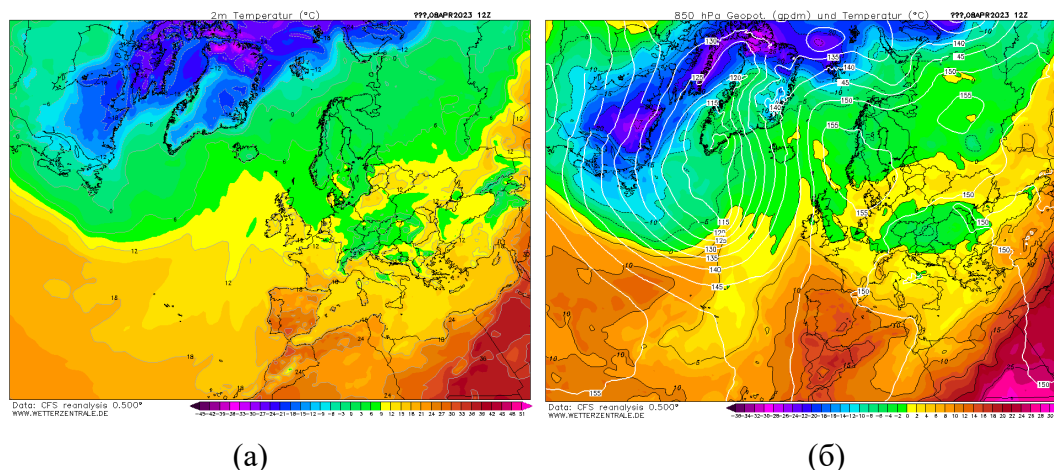


Рисунок 4.10 – Поле приземної температури повітря (а) і температури на рівні 850 гПа (б) 08.04.2023 р., 12 UTC

Виявлення причин формування градових процесів проводилося із залученням супутникових знімків різного спектрального діапазону (рис.4.11).

Супутникові знімки хмарності показують розвиток ланцюжка осередків купчасто-дощових хмар над територією України за типом лінії нестійкості. Саме у кластерах Сб і формувалися град, грози та місцями зливи й шквалистий вітер. Орієнтація ЛН була саме з північного заходу від Житомирщини через центр країни на південний схід. Як видно за знімками хмарності, активний осередок

Сб виділяється на Запорозжжі і Дніпропетровщині, в цій системі спостерігалось суттєве погіршення погодних умов – сильні зливи, шквали.

Розвиток конвективної хмарності простежувався від 12 год. UTC, сягнув піку на 15 год. і згасає до 21 год. Показники параметрів нестійкості (CAPE, Li- index, Showalter index) не показали значних умов нестійкості, лише ймовірність злив.

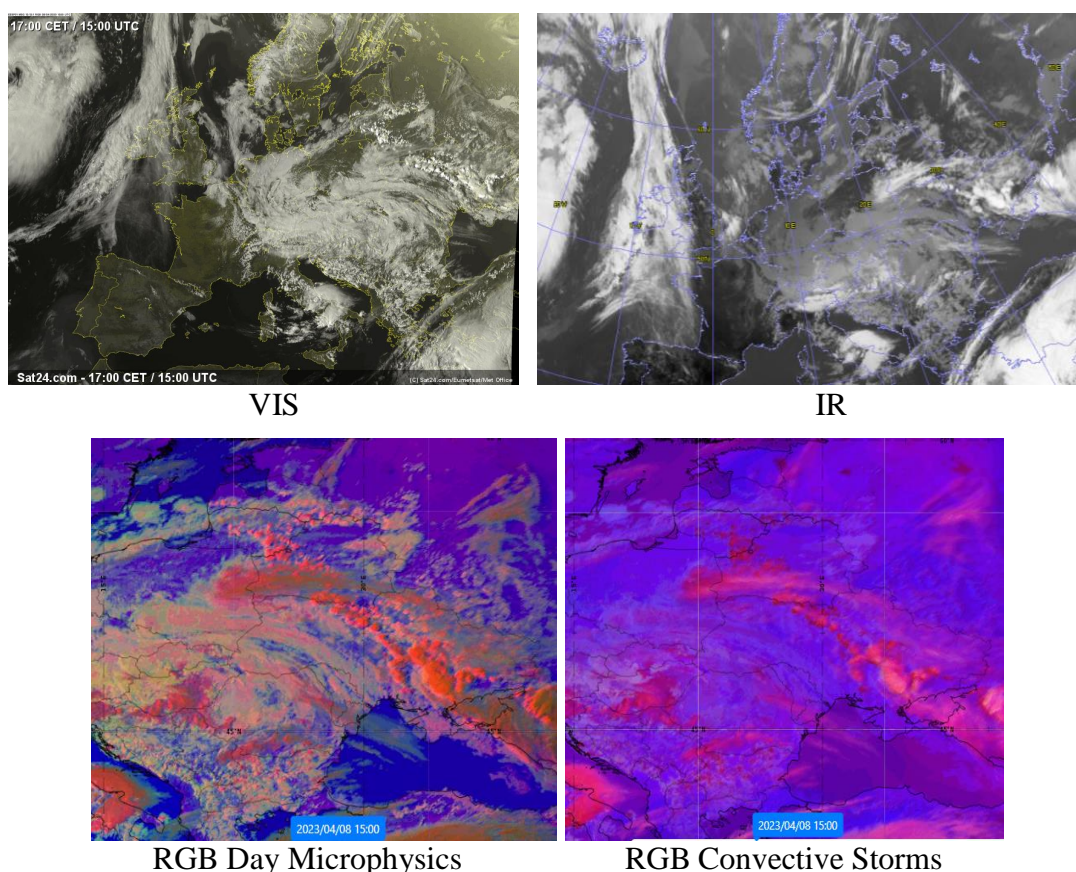


Рисунок 4.11 – Супутникові знімки хмарності 08.04.2023, 15 UTC

Останній зареєстрований град теплого періоду 2023 р. припадає на 10 жовтня. Град випав на Харківщині, МС Золочів, діаметр 6 мм, як локальне явище у регіоні, супроводжувався зливовим дощем.

За походженням це також внутрішньомасовий град (рис.4.12).

Приземне баричне поле характеризувалося поширенням відроду антициклону з Південно-західної Європи, до кінця доби на заході України

виділяється центр максимуму з ізобарою 1025 гПа. Східний регіон перебуває під впливом малоградієнтного поля підвищеного тиску. Фронтальні розділи відсутні.

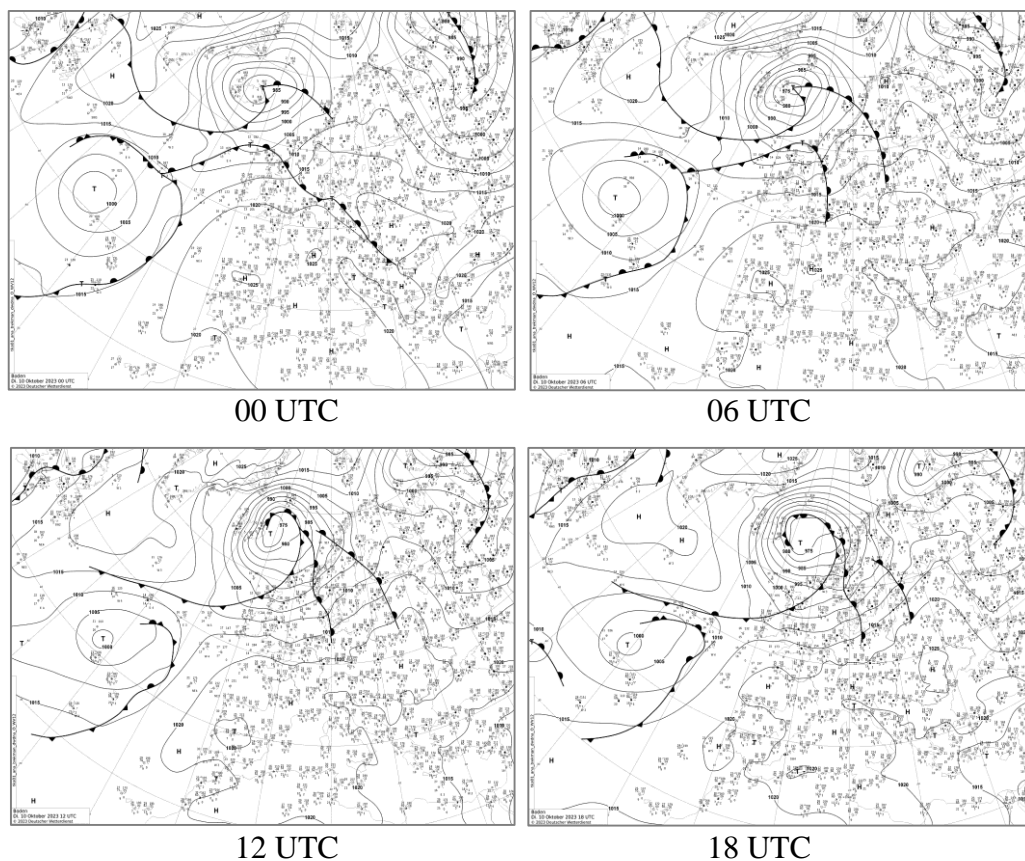


Рисунок 4.12 – Приземні карти погоди 10.10.2023 р.

Слід зазначити подібність термобаричного поля формування раннього граду у квітні на фоні невисоких температур повітря, як і у жовтні. Загалом, впродовж місяця спостерігалися високі додатні аномалії температури, але саме у першу декаду температура знижувалася (рис.4.13). 10 жовтня максимальні температури повітря по території країни не перевищували 12°C.

На рівні 850 гПа простежується адвекція холоду в улоговині за північно-східною віссю з Карського моря, одночасно над Європою – потужний гребінь тепла в антициклоні. Таким чином, метеорологічні умови сприяють формуванню граду – центральна частина улоговини холоду в тропосфері.

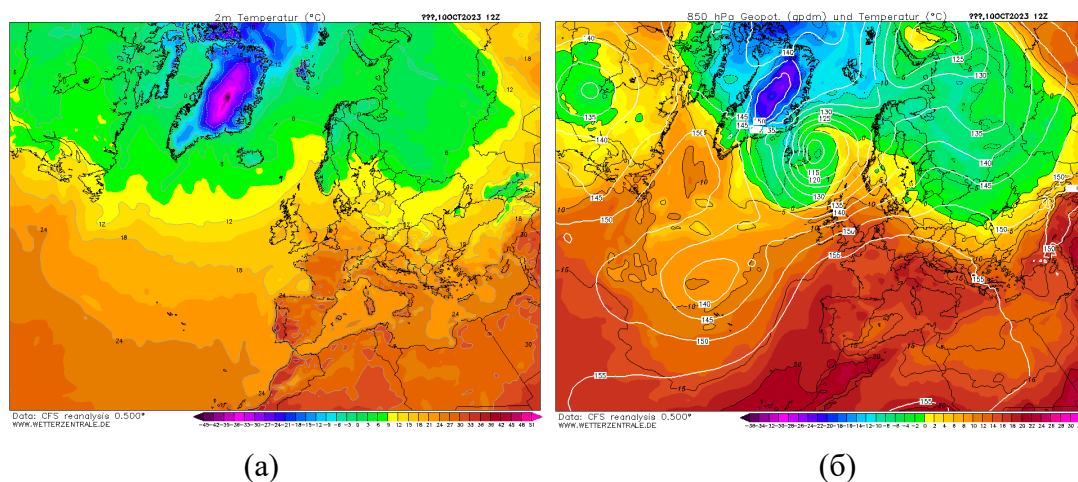


Рисунок 4.13 – Поле приземної температури повітря (а) і температури на рівні 850 гПа (б) 10.10.2023 р., 12 UTC

Аналіз супутникової інформації уточнює причини виникнення граду (рис.4.14). У полі хмарності спостерігався розвиток масиву конвективних хмар осередкової структури, що чітко видно за композитом RGB ch1+2+4 – саме над східним регіоном виділяється мілка конвекція з появою Cu та Cb хмар на фоні більш низьких осередків жовтого тону. Розширений інфрачервоний знімок не показує значного розвитку хмарності по вертикалі на момент формування граду. Деяке посилення конвекції є до 15 год., але далі процес згасає.

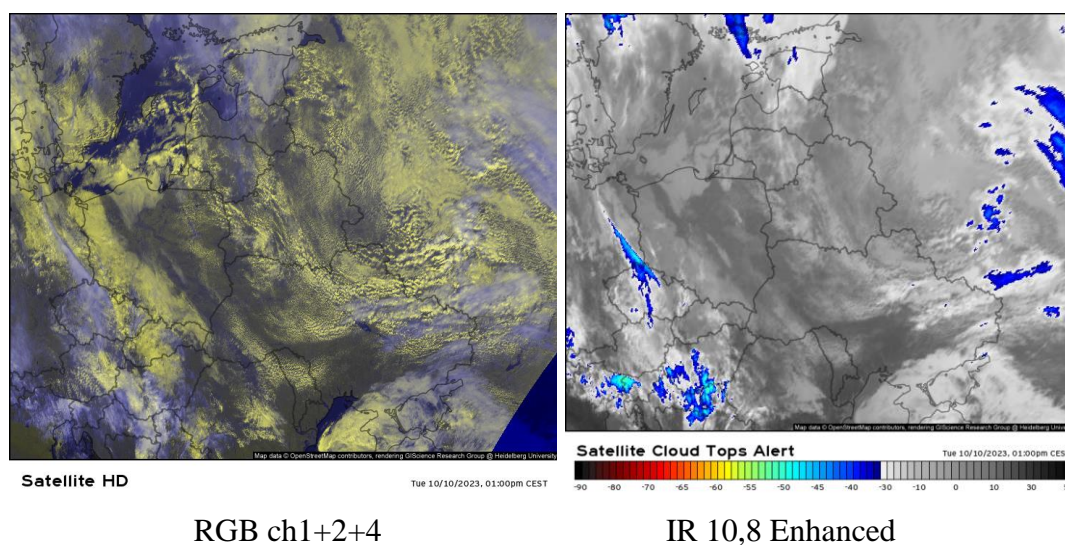


Рисунок 4.14 – Супутникові знімки хмарності 10.10.2023, 13 UTC

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження градових процесів теплового періоду 2023 р. над Україною можна зробити наступні висновки:

1. Всього за теплий період 2023 р. зареєстровано 49 випадків з градом.
2. Всі випадки граду належать до категорії НЯ I рівня небезпеки – град діаметром 6-19 мм (23 випадки), всі інші – дрібний град (діаметр до 6 мм). Град діаметром більше ≥ 10 мм спостерігався 8 разів.
3. Регіональне поширення граду вказує на суттєве зростання повторюваності явища на заході країни – 20 випадків з 49 (~41%), що пояснюється впливом місцевих умов на розвиток конвекції. Найрідше град відмічався у центрі країни – лише 4 випадки.
4. Місячний розподіл граду виділяє максимум повторюваності у липні – 14 випадків. Посилення процесів відмічається у квітні – 13 випадків. У вересні град не реєструвався, одноразово – у жовтні. У регіональному місячному розподілі виділяється квітень та липень – град реєструвався у всіх регіонах.
5. За синоптичною класифікацією град формувався при внутрішньомасових процесах у 24 випадках (~49%); град фронтального походження – 25 випадків, з них у системах холодних фронтів 15 (~31%), на лініях нестійкості 7 (~14%). Град на ЛН частіше формувався у червні (3), у системах холодних фронтів – у липні (7). Внутрішньомасовий град переважав у квітні – 6 випадків. На теплих фронтах град не відмічався, у системах фронтів оклюзії – тричі (за одну добу).
6. У добовому ході найчастіше град формувався у період 12-15 годин – 24 випадки (~49%). Підвищена повторюваність граду з 9 до 12 години (~31%), рідше град формувався у період 15-18 год. (~16%). Вкрай рідко град

спостерігався у надвечірні години – лише 2 випадки. З 21 години до 09 години град не реєструвався.

7. Аналіз індексів нестійкості *CAPE* та *Showalter index* виділяє умови помірної нестійкості лише у частині випадків з градом. За індексом *CAPE* умови нестійкості є у 11 випадках, це значення індексу 1000-1400 Дж·кг⁻¹, подекуди до 2200 Дж·кг⁻¹ – помірна нестійкість. *Showalter index* підтвердив нестійкість у 21 випадку з градом при показниках $\Delta T < 0^{\circ}\text{C}$.
8. Дослідження полів хмарності за температурою ВМХ показало значний розвиток конвективних хмар у 35 випадках. Ускладнення погодних умов з утворенням суперкомірок та мезомасштабних конвективних комплексів і систем відмічалось 5 разів: 23 червня і 2, 7, 25 та 27 липня.
9. Град найбільшого діаметру зареєстрований 2 липня на МС Конотоп – 16 мм, явище внутрішньомасового походження виникло у суперкомірці над Сумщиною.
10. Найбільш ранній град спостерігався 8 квітня у центрі та на півночі країни. Град сформувався на лінії нестійкості при розвитку кластерів Сб. Найбільш пізній локальний град зареєстрований 10 жовтня на Харківщині, внутрішньомасового походження при посиленні адвекції холоду з висотою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Балабух В. О. Зміна інтенсивності конвекції в Україні: причини та наслідки https://web.archive.org/web/20200211114435id_/https://meteo.gov.ua/files/content/docs/Vinnitsa/UkrGMI.pdf
2. Балабух В. О. Зміна інтенсивності, повторюваності та локалізації небезпечних явищ погоди в Україні та їх регіональні особливості / В. О. Балабух, О. М. Лавриненко, С. М. Ягодинець, Л. В. Малицька, Ю. О. Базалєєва Системи контролю навколишнього середовища: *Збірник наукових праць МГІ НАН України*. 2013. Вип.19. С.189-198.
3. Івус Г. П. Спеціалізовані прогнози погоди: підручник. Одеса, 2012. 407 с.
4. Івус Г. П., Гурська Л. М. Методичні вказівки для лабораторної роботи з дисципліни «Короткострокові прогнози погоди» на тему «Прогноз граду». Одеса: ОДЕКУ, 2012. 27 с.
5. Клімат України / під ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ. Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.
6. Лєсков Б. Н., Носар С. В., Сирота М. В., Бондаренко А. В., Єгорова А. В. До питання про потужність градових процесів у літньому сезоні в Криму. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 1 (52). С.97-108.
7. Лялько В. І., Єлістратова Л. О., Кульбіда М. І., Апостолов О. А., Барабаш М. Б. Особливості змін клімату в Україні на кінець ХХ – початок ХХІ ст. за наземними та супутниковими даними. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2015. Вип.6. С.33-84.
8. Маланічев М. Ю, Нажмудінова О. М. Процеси градоутворення на території України. *Матеріали студентської наукової конференції ОДЕКУ (10-17 травня 2023 р.)* Одеса: ОДЕКУ. 2023. С.556-557.
9. Маланічев М. Ю, Нажмудінова О. М. Процеси градоутворення влітку 2023 р. *Матеріали студентської наукової конференції ОДЕКУ (10-19 квітня 2024 р.)* Одеса: ОДЕКУ. 2024. С.347-348.
10. Настанова з метеорологічного прогнозування. Укр.ГМЦ. Київ.

- 2019.URL: https://www.meteo.gov.ua/f/pro_nas/normativni_akt/Nastanova%20z%20meteoprognozuvannia.pdf (дата звернення: 20.05.2024).
- 11.Осадчий В. І., Бабіченко В. М. Динаміка стихійних метеорологічних явищ в Україні. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. Вип.4. С.8-14.
- 12.Практикум з синоптичної метеорології: Навчальний посібник / під ред. Г. П. Івус, С. М. Іванової. Одеса: «ТЭС», 2004. 419 с.
- 13.Татарчук О. Г., Корж Т. В. Особливості розподілу крупного граду в Україні на рубежі ХХ–ХХІ століть. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 3 (54). С.159-160.
- 14.[ePort - Online Weather NG Maps](http://212.232.25.232/ng-maps/) URL: <http://212.232.25.232/ng-maps/> (дата звернення: 24.05.2024).
- 15.[Wokingham Weather](http://www.woksat.info/wos.html) URL: <http://www.woksat.info/wos.html> (дата звернення: 25.05.2024).
- 16.[FlyMeteo](https://flymeteo.org/stat/indexneust.php) URL: <https://flymeteo.org/stat/indexneust.php> (дата звернення: 29.05.2024).
- 17.[Hail formation](https://weathermod-bg.eu/hail-formation) URL: <https://weathermod-bg.eu/hail-formation> (дата звернення: 06.05.2024).
- 18.[Joshua Soderholm, PhD - Hail Observations](https://www.joshuasoderholm.com/current-projects/hail-observations) URL: <https://www.joshuasoderholm.com/current-projects/hail-observations> (дата звернення: 06.05.2024).
- 19.[Severe Weather 101 Hail Basics](https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/hail/) URL: <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/hail/> (дата звернення: 07.05.2024).
- 20.[Hail around the world: the biggest, heaviest, and deadliest hailstone records](https://www.severe-weather.eu/theory/hail-world-records-the-biggest-heaviest-and-deadliest-hail/) URL: <https://www.severe-weather.eu/theory/hail-world-records-the-biggest-heaviest-and-deadliest-hail/>(дата звернення: 07.2024).
- 21.[Spotter's Field Guide - The Supercell, Pt. 1](https://www.weather.gov/spotterguide/supercell1) URL: <https://www.weather.gov/spotterguide/supercell1> (дата звернення: 10.05.2024).
22. [wetter3.de/fax_dt.html](https://www.wetter3.de/fax_dt.html) URL: https://www.wetter3.de/fax_dt.html (дата звернення: 20.05.2024).