

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий гідрометеорологічний
інститут
Кафедра метеорології та кліматології

Кваліфікаційна робота бакалавра

на тему: Небезпечні фронтальні опади на території України

Виконала студентка групи МКА-18
Спеціальності 103 «Науки про Землю»

Матросова Ольга Павлівна

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

Керівник канд. геогр. наук, доцент
Нажмудінова Олена Миколаївна

Консультант _____ - _____

Рецензент канд. геогр. наук, доцент
Барсукова Олена Анатоліївна


Одеса 2022

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)
Освітня програма _____ Гідрометеорологія _____
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
метеорології та кліматології


Прокоф'єв О.М.
«02» березня 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

- студентці _____ Матросовій Ользі Павлівні _____
1. Тема роботи _____ Небезпечні фронтальні опади 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 « 21 » грудня 2021 року № 267 - С _____
2. Строк подання студентом роботи _____ 9 червня 2022 р. _____
3. Вихідні дані до роботи: бюлетені погоди; результати наземних метеорологічних спостережень та температурно-вітрового зондування; карти, таблиці, зведення про опади та штормові явища погоди; знімки EUMETSAT; дані Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF).
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Огляд та систематизація наукової літератури за напрямком роботи. 2) Вибір вихідної інформації з випадків виникнення СМЯ та НЯ за опадами у системах атмосферних фронтів на території України. 3) Визначення умов фронтогенезу. 4) Аналіз параметрів та характеристик фронтальних розділів. 5) Встановлення особливостей структури хмарності атмосферних фронтів. 6) Аналіз розподілу небезпечних та стихійних явищ погоди.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
- синоптичні карти: приземні та баричної топографії;
 - інфрачервоні супутникові знімки хмарності з розподілом фронтального термічного параметру TFP, дивергенції швидкості та адвекції температури повітря на різних рівнях тропосфери;
 - карти розподілу опадів та штормових явищ погоди.

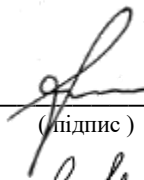
6. Консультанти розділів роботи


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

7. Дата видачі завдання 02 березня 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Огляд наукової літератури за темою дослідження. Складання теоретичної частини роботи.	02-09.03.2022	80	добре
2	Вибір вихідних даних за архівом синоптичної інформації АРМ син та мережею Internet.	10-20.03.2022	60	задовільно
	Рубіжна атестація	16.05.2022 р.- 20.05.2022 р.	70	задовільно
3	Визначення циркуляційних умов формування атмосферних фронтів. Аналіз фронтального параметру, дивергенції, адвекції, індексів нестійкості.	24-29.05.2022	100	відмінно
4	Аналіз хмарних систем фронтальних розділів за даними МШСЗ.	30.05- 01.06.2022	100	відмінно
5	Дослідження розподілу стихійних та небезпечних опадів і явищ погоди.	02-06.06.2022	100	відмінно
6	Складання висновків. Заключне редагування тексту.	07-09.06.2022	100	відмінно
7	Перевірка роботи на плагіат. Підписання авторського договору Підготовка до захисту кваліфікаційної роботи.	09.06.2022 р.- 11.06.2022 р.	-	-
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		90	відмінно

Студентка  Матросова О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ПРОЦЕСИ ОПАДОУТВОРЕННЯ НАД СХІДНОЮ ЄВРОПОЮ У СУЧАСНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ.....	5
2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРОНТАЛЬНИХ ОПАДІВ.....	10
2.1 Умови виникнення фронтальних опадів.....	10
2.2 Особливості хмарності фронтальних розділів.....	13
3 ОБ'ЄКТИВНИЙ АНАЛІЗ АТМОСФЕРНИХ ФРОНТІВ.....	18
4 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ФРОНТАЛЬНИХ ОПАДІВ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ.....	24
4.1 Синоптичні умови виникнення та еволюції атмосферних фронтів.	24
4.2 Термодинамічні параметри атмосферних фронтів.....	38
4.3 Аналіз хмарності фронтальних розділів.....	48
4.4 Аналіз процесів опадоутворення.....	60
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	80

ВСТУП

В роботі досліджуються особливості формування небезпечних та стихійних опадів в зонах атмосферних фронтів над Україною.

Посилені опади часто мають особливо несприятливі наслідки з утворенням паводків під час тривалого дощу або сильної зливи. Тому їхнє дослідження у сучасний кліматичний період збільшення інтенсивності небезпечних та стихійних явищ, є особливо актуальним для економіки, зокрема транспорту, сільського та комунального господарства.

На території України основна кількість опадів випадає з фронтальних хмар. Небезпечні та стихійні явища погоди переважно виникають в зонах атмосферних фронтів, пов'язаних з конкретними типами циклонів. Взимку це вплив середземноморських та атлантичних циклонів. У теплий період року максимальна кількість небезпечних опадів на території України, пов'язаних з циклонічною діяльністю, зазнала значних змін на початку XXI ст. У помірних широтах Європи спостерігається зростання меридіональної й послаблення зональної циркуляції атмосфери, що зумовлює зміну траєкторії переміщення циклонів, їхньої інтенсивності й сезонного розподілу.

В умовах глобального потепління на території України відмічається значна мінливість опадів як у часі, так і в просторі, з високою ймовірністю випадання сильних дощів протягом доби, особливо в теплий період року.

Мета роботи – визначення характеристик фронтальних розділів, що зумовлюють небезпечні та стихійні опади.

У якості методів дослідження використовувалися синоптико-кліматичний аналіз, просторово-часове узагальнення даних.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку літературних джерел (21).

1 ПРОЦЕСИ ОПАДОУТВОРЕННЯ НАД СХІДНОЮ ЄВРОПОЮ У СУЧАСНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ

Сильні опади характеризуються значною просторовою та часовою неоднорідністю, що пояснюється багатьма чинниками - характером та інтенсивністю атмосферних процесів, фізико-географічними особливостями території (рельєф, місцеві умови) та ін. [6].

Сучасні дослідження вказують, що за останні десятиліття в європейському регіоні спостерігаються вагомні тенденції збільшення надзвичайних опадів, які призвели до катастрофічних повеней в Європі. Це вказує на те, що характер опадів стає більш екстремальним в останні роки, ніж в попередні десятиліття.

Дослідження Балабух В.О. [1] динаміки кількості випадків сильних дощів показав, що з початку 90-х років ХХ ст. в Україні спостерігається тенденцію до зростання їх кількості. З початку ХХІ ст. вона стала більш виражена на всій території, але має деякі особливості в регіонах. Відсоток дуже сильних дощів по відношенню до кількості випадків сильних дощів, свідчить про інтенсивність процесів, що зумовлюють утворення опадів. В Україні він коливається від 2 до 5% з максимумом на півдні країни. Аналіз лінії тренду річної кількості випадків дуже сильних дощів в Україні показав, що він має виражений циклічний характер зі змінним періодом.

Для території України у січні кількість опадів ≥ 15 мм становить від 5-10% від загальної норми місячної кількості опадів у 2000-2014 рр., крім Карпатського регіону, Чернівецької та Одеської областей, де вони мають понад 20-25%. У весняному сезоні кількість екстремальних опадів збільшується і їх внесок в норму місячної кількості опадів у квітні становить близько 20% в більшості областей. До літа кількість опадів ≥ 15 мм збільшується, а в липні їх процентний внесок у загальну місячну кількість опадів становить 50-70%. Восени кількість екстремальних опадів зменшується, але частка їх внеску майже в два рази

більша, ніж навесні, - у більшості регіонів це близько 30-40%. Найбільш значні екстремальні добові суми опадів спостерігаються влітку [9].

У роботі [7] проведені дослідження просторової та часової еволюції розподілу кількості опадів на території України протягом 2002-2011 рр. Виявлено відмінності у річному розподілі опадів порівняно з середньою нормою опадів. Найбільші суми опадів за теплий період спостерігалися у серпні–жовтні, найменші – у квітні. В окремі роки відмічались декілька вологих або посушливих місяців (чи обидва разом) з екстремальною кількістю опадів. Зберігається основна закономірність – зростання посушливості на схід та південь, але в окремих регіонах (південний захід, північний схід) така закономірність порушується. За холодний період найбільша кількість опадів на території країни відмічалась в листопаді, найменша – в березні.

Особливості локалізації та інтенсивності небезпечних та стихійних опадів значно залежать від типу синоптичного процесу. Зміна синоптичного процесу, району формування та траєкторій переміщення циклонів призводить до зміни територіального розподілу явищ погоди та їх інтенсивності. В дослідженні [2] побудовано середні траєкторії циклонів для регіонів, з яких вони зміщуються на Україну для теплого періоду року. Переважна більшість циклонів, що своїм центром переміщуються через Україну, формуються під впливом південних та західних синоптичних процесів, виходять на її територію з південною складовою та зумовлюють майже 90% небезпечних та стихійних явищ погоди. Через східні та північні області країни траєкторій циклонів пролягає майже вдвічі менше. У той час як на сході України переважають циклони, що формуються над Північним Кавказом та сходом Азовського моря, на півночі переважають циклони із Середньодунайської низовини, Італії та Адріатичного моря. Більше половини сильних та дуже сильних опадів зумовлені циклонами, що переміщуються територією України своїм центром. Велика кількість небезпечних та стихійних опадів теплого періоду в західних, центральних та північних областях України значною мірою зумовлена переміщенням

найбільшої кількості циклонів, які у цьому регіоні суттєво уповільнюють свій рух та поглиблюються. Значна кількість циклонів також заповнюється в цьому регіоні. Через східні області України теж пролягає багато траєкторій циклонів, але самі баричні утворення формуються значно рідше. Рухаючись з великою швидкістю циклони призводять до того, що небезпечна та стихійна кількість опадів утворюється значно рідше і ці явища займають меншу площу.

В дослідженнях [3] виконано синоптичний аналіз умов формування небезпечних опадів. Результати вказують, що такі опади у теплий період року спостерігаються за умови виходу на територію України південно-західних та південних циклонів або їх взаємодії з холодним фронтом з хвилями із заходу чи північного заходу та наявності блокуючого процесу, що гальмує рух циклонів, при якому має місце як їх стаціонування, так і аномальне переміщення. В результаті блокування створюються великі горизонтальні градієнти тиску та температури, що зумовлюють хуртовини, сильні та дуже сильні опади. У холодний період року виділено два типи процесів: 1 – основний (80% усіх випадків) характеризувався зміщенням на Україну південних та південно-західних циклонів, але через розвиток антициклогенезу (на сході чи півночі від України) ці циклони блокувались та ставали квазістаціонарними, надзвичайно сильні опади виникали перед теплим фронтом; 2 тип - зміщення (найчастіше повільне) холодного фронту з хвилями у системі північно-західних циклонів, на південній периферії яких через загострення температурних контрастів згодом формувалася вторинний циклон. Після переміщення на територію України системи холодного фронту з хвилями та вторинного циклонів об'єднувались, поблизу вершин хвиль і перед теплими фронтами випадали дуже сильні опади.

Аналіз багаторічної зміни випадків сильної зливи на території України в умовах сучасного клімату у дослідженні [15] показав, що кількість випадків з цим явищем, починаючи з кінця XX і на початку XXI ст. значно збільшилася. За період 2001–2010 рр. кількість злив зросла більше ніж вдвічі порівняно з попереднім десятиріччям. В останні роки, в умовах сучасного потепління,

зливові опади почали відмічатися у квітні, вересні та жовтні, - переважно в південних областях (Одеська, Миколаївська, Херсонська та АР Крим). Проведено класифікацію синоптичних процесів при сильних опадах влітку за 2001–2010 рр. Отримано поля класів імовірності геопотенціалу H500 та типові поля приземного тиску:

- висотний циклон відсічення, з окремим центром біля поверхні землі, атмосферними фронтами або малоградієнтним полем,
- розвинена висотна або приземна улоговина (циклон) у поєднанні з ХФ із хвилями, які призводять до значних опадів, або ділянки холодних фронтів циклонів, що рухаються на північ від України.
- деформаційне поле (у тому числі замаскована улоговина) або зона взаємодії з квазістаціонарним гребенем на сході Європи. При цьому біля поверхні землі розташовуються атмосферні fronti з хвилями, переважно меридіонально орієнтовані.

Типовим є розвиток конвективних осередків різних масштабів, у тому числі мезомасштабних конвективних комплексів (МКК), суперкомірок, перш за все у центрі, на півдні або сході України, а також у Румунській (або Причорноморській) зоні конвергенції. Більшість випадків сильних опадів улітку (57%) пов'язані з висотними ізольованими циклонами (відсічення), які зазвичай малорухомі й тривалий час впливають на визначену територію [15].

Дослідження небезпечних та дуже сильних опадів у теплий період року на рівнинній території України у роботі [10] показало, що вони формуються за умови виникнення блокуючих циркуляційних процесів у регіоні і безпосередньо пов'язані з хмарними системами фронтальними циклонів. Часовий розподіл інтенсивності опадів у теплий період, в тому числі небезпечних та дуже сильних, має хвильову структуру, що є підтвердженням теоретичних висновків про особливості процесів хмаро- та опадоутворення. Тривалість (довжина) хвилі підсилення опадів та її амплітуда залежать від макросиноптичних процесів та фізичних процесів хмаро- і опадоутворення. Небезпечні та дуже сильні опади

практично завжди пов'язані з хмарними системами атмосферних фронтів, особливо таких, що розташовані близько точки оклюзії та на холодних фронтах.

За даними роботи [8], у багаторічному ході опадів не встановлено вираженої тенденції. Тренд або трохи підвищується, або понижується. Бувають і піки, й тут же йде зниження; не змінюється і середньомісячна кількість опадів. Зазначається, що при підвищенні температури збільшуються стихійні опади. Режим зволоження знаходиться в межах кліматичної норми. Водночас у середині місяця мінливість опадів залишається значною, з високою ймовірністю випадання сильних дощів протягом доби, особливо в теплий період року. Одночасний розгляд зміни глобальної температури повітря та річної кількості опадів в Україні показує, що зв'язок між цими двома змінними не є лінійним. Це ускладнює прогнозування тенденції режиму зволоження на майбутнє. Прогнозування тенденції змін опадів на майбутнє за допомогою закономірностей, які отримані шляхом аналізу емпіричних рядів спостережень за опадами, не завжди однозначне.

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРОНТАЛЬНИХ ОПАДІВ

2.1 Умови виникнення фронтальних опадів

Основна кількість опадів випадає з фронтальних хмар. Зимомою їх випадання найчастіше пов'язано з середземноморськими циклонами, що переміщуються з Чорного моря у північному та північно-східному напрямках. Вплив середземноморських циклонів відмічається майже на всій території країни. Більшість атлантичних циклонів переміщуються північніше і рухаються за зональними траєкторіями із заходу на схід, південні ділянки фронтів цих циклонів охоплюють всю Україну і зволожують її.

Влітку лише невелика частина опадів випадає у тилу циклонів безпосередньо з морських повітряних мас у вигляді, так званих, опадів конвективної нестійкості. Важливе значення мають опади із тропічного повітря, яке переміщуючись з південного сходу через південну та південно-західну периферію антициклону, зволожується і, зустрічаючись з полярним повітрям, дає велику кількість опадів зливого характеру. Певну роль у збільшенні літніх опадів має місцевий циклогенез. На східноєвропейській гілці полярного фронту виникають циклони, що супроводжуються випаданням опадів з континентального повітря [6].

В останні десятиріччя кількість циклонів всіх типів траєкторій, які виходять на територію України, в цілому зменшилася приблизно на 20%, а кількість атмосферних фронтів, що переміщуються Україною, зросла на 30%. Це пов'язано з тим, що зросла кількість циклонів, траєкторія яких пролягає на захід, північний захід і північ від України, а через її територію переміщуються атмосферні фронти, пов'язані з ними. Наприкінці ХХ – початку ХХІ ст. в Україні спостерігалася тенденція до зменшення повторюваності однорідних повітряних

мас і зростання повторюваності фронтальних зон. При цьому повторюваність зони полярного фронту зростає, а арктичного – зменшується [14].

Облогові опади (дощ, сніг, мокрий сніг) спостерігаються перед теплим фронтом в області найбільш значних упорядкованих вертикальних рухів. Облогові опади формуються і в зоні фронту, а в холодну половину року – за холодним фронтом I роду. Поглиблення циклону та «загострення» фронту супроводжується розширенням зони облогових опадів та їх посиленням. Інтенсивність опадів зростає зі збільшенням вологості повітряної маси та упорядкованих вертикальних рухів. Додатково потрібно враховувати показники, які свідчать про умови формування та розвитку облогових опадів: висоту верхньої межі хмарності системи As-Ns, товщину шару хмар та положення ізотерми -10°C . Опади найбільш імовірні за умови товщини шару хмар ≥ 2 км. Положення ізотерми -10°C характеризує наявність льодяної фази в хмарі, якщо ізотерма -10°C розташовується всередині шару хмарності, то випадіння опадів більш імовірно [12].

Загальними метеорологічними умовами, за яких утворюються зливові опади, є: висока вологість повітря ($> 7\%$) у приземному шарі та на висотах, невеликі значення дефіциту точки роси ($< 3-5^{\circ}\text{C}$), значні вертикальні градієнти температури, що перевищують вологоадіабатичний градієнт, відсутність затримуючих шарів (інверсії та ізотермії), адвекція холоду на висотах, перевищення потужності купчасто-дощових хмар відмітки 2 км тощо. Ці умови частіше за все відповідають зонам збіжності повітряних мас при циклонічній кривизні ізобар (фронтальні зливи) та малоградієнтним полям з достатнім прогрівом і вологістю (внутрішньомасові зливи). Холодні фронти та фронти оклюзії за типом холодного найбільш часто супроводжуються зливами, рідше зливи спостерігаються на теплих фронтах. Фронтальні зливи характеризуються менш вираженим добовим ходом, ніж внутрішньомасові, однак мають тенденцію до посилення у другій половині дня. При прогнозі злизових опадів

фронтального характеру необхідно визначити майбутнє положення фронту, його еволюцію та зміни конвективної нестійкості.

Однією з головних умов виникнення фронтальних опадів є наявність упорядкованих висхідних рухів. Можна вважати, що завдяки посиленню циркуляції внаслідок блокування упорядковані висхідні рухи будуть більші за середні статичні значення. Волога маса, піднімаючись угору, через падіння температури стає вологонестійкою, тобто складаються сприятливі умови для розвитку вимушеної конвекції, яка охоплює великі площі та є тривалою у часі. Фронтальна хмарність та опади, як правило, мають смугову структуру, але смуги неоднорідні і складаються з окремих осередків з різною інтенсивністю опадів.

Отримання осередкової структури всередині смуги опадів в чисельному моделюванні на вкладеній сітці свідчить про стабільне і довготривале існування цієї фронтальної хмарності та опадів. Відсутність неоднорідної структури чи зменшення смуги опадів вказує на недостатність даних спостережень чи сіткового розділення, або на те, що опадоутворення в даному регіоні не пов'язане з фронтальними процесами. Результати моделювання у роботі [11] дозволили виділити та представити смугово-коміркову структуру полів фронтальної хмарності та відповідних їм полів опадів. Смугово-коміркова структура властива практично усім полям фізичних параметрів, що формують процеси хмаро- та опадоутворення. Поле вертикальних рухів має розміри комірок від декількох до десятків кілометрів, приблизно такі ж масштаби областей додатної інтегральної швидкості конденсації. Найменші просторові розміри мають області з наявною та здатною до конденсації водяною парою – від декількох сотень метрів до декількох кілометрів. Просторовий перетин і повторення комірок призводить до виникнення термодинамічно активних смуг, розташованих переважно вздовж наземних ліній фронтів, в межах яких і формуватимуться опади, але навіть в межах таких смуг інтенсивність опадоутворення є змінною величиною. Характерні розміри ділянок з однорідними властивостями атмосфери в межах шаруватоподібних

фронтальних хмарних систем становлять від декількох кілометрів до декількох десятків кілометрів, а в купчастих хмарах подібні зони з однорідними термодинамічними параметрами будуть на порядок меншими. Структура поля опадів в основному відповідає структурі поля хмарності, яка формує опади.

2.2 Особливості хмарності фронтальних розділів

При проходженні теплого фронту ширина зони опадів з високошаруватою та шарувато-дощовою (As–Ns) хмарністю приблизно визначається з наступних міркувань: якщо перші опади випадають з хмар з основою на висоті 2 км, то за значного нахилу фронту виникає зона опадів шириною в 300 км. Для зони дощу з Ns приймають середню ширину 300 км і для зони снігу з As–Ns - до 400 км. Тилова межа зони опадів проектується на синоптичну карту поблизу лінії фронту. Відхилення в той або інший бік від лінії фронту (в межах 50 км) невеликі, так що на синоптичній карті зазвичай позначається область опадів попереду лінії фронту. Опади стають все інтенсивнішими при зниженні висоти хмар. Біля самої лінії фронту, де хмарна система може не досягати рівня крижаних ядер, великокрапельний дощ може перейти в мряку. Слідом за припиненням опадів хмари швидко розмиваються знизу.

У середині холодного клину, під хмарною системою ТФ, хмари конвекції відсутні у зв'язку з послабленням або припиненням інсоляції в холодному повітрі. Але в зоні опадів, внаслідок насичення повітря шляхом випаровування опадів (особливо дощу), і турбулентного переносу водяної пари вгору, може виникнути вторинний рівень конденсації. У зв'язку з цим можливе виникнення під As-Ns розірвано-дощових хмар Fn (Fractonimbus). Під As вони спостерігаються у вигляді окремих розкиданих хмар, але під Ns можуть утворюватися скупчення темного синьо-сірого кольору (на більш світлому фоні

Ns), з нижньою межею на висотах близько декількох сотень метрів (500 - 200, в районі фронту до 100 - 50 м, іноді навіть до поверхні землі), такі скупчення по суті є покривом St або Sc. Поблизу лінії фронту, за умов особливо великої вертикальної потужності хмар у Fn може виникнути коагуляція внаслідок турбулентності й утворитися мряка, поєднуючись з облоговими опадами з Ns.

Хмарність та характер погоди холодних фронтів відрізняються великою різноманітністю. Це залежить від безлічі факторів і насамперед від швидкості переміщення фронту біля поверхні землі та характеристик взаємодіючих повітряних мас. Безпосередньо перед фронтом або над ним спостерігаються купчасто-дощові (Cb) хмари, і зливові опади з проходженням лінії фронту переходять в облоги. Малорухливі холодні фронти (I роду), розташовані в малоградієнтному баричному полі або в вузькій й слабо вираженій баричній улоговині біля поверхні землі, є динамічно нестійкими. На таких ХФ виникають хвильові збурення, які переміщаються уздовж фронту. В денні години при проходженні холодної ділянки фронту у хвильовому збуренні розвиваються потужні купчасті і купчасто-дощові хмари, виникають грози, зливи, град, а іноді шквали. У нічні години ці явища спостерігаються на теплій ділянці фронту.

В області ХФ II роду (рухливого) хмарні маси утворюються перед фронтом. У цих випадках витіснення вгору теплого повітря клином насунання холодного повітря відбувається особливо бурхливо, що призводить до розвитку конвективної нестійкості та формування системи потужних купчастих і купчасто-дощових хмар з комплексом небезпечних конвективних явищ. Cb хмари спостерігаються у вузькій смузі шириною 50 - 100 км перед фронтом. За фронтом опади припиняються і фронтальна хмарність розмивається. На таких фронтах Cb утворюються головним чином влітку і досягають найбільшого вертикального розвитку в денні години. У холодний період року для цього типу фронтів також характерна система хмар As-Ns.

Хмарні системи фронту оклюзії розташовуються по обидва боки від приземного положення фронту, особливо у холодних фронтів оклюзії.

Поблизу лінії фронту можуть зберігатися Сб - при проходженні фронту облогові опади змінюються зливовими, а потім знову можуть перейти в облогові [11-12].

Для практичного використання, наприклад розроблення чисельних моделей хмаро- та опадоутворення, необхідні дані розподілу хмар на всіх типах фронтів, що переміщуються територією України, а саме: теплому, холодному, холодному з хвилями, оклюзії та вторинному холодному.

У роботі Заболоцької та ін. [4] детально проаналізовано дані зондувань близько 2000 хмарних систем, зумовлених дією атмосферних фронтів. Незалежно від типу фронту за його зміщенням фіксуються будь-які форми хмар, але співвідношення різне: на теплих фронтах, холодних із хвилями та оклюзії шаруватоподібні хмари (Ns, Ns-As, As, Ci, Cs) мали повторюваність близько 60-65%, хвилеподібні (St, Sc, Ac) – 35-40%, на холодних і вторинних холодних відповідно близько 40 і 60%. Купчасті хмари (Cu) на всіх фронтах спостерігалися рідко (1-4%). Якщо порівнювати повторюваність суто фронтальних шарувато-дощових хмар та їх систем (Ns, Ns-As) з шаруватими (St) та шарувато-купчастими хмарами (Sc), тобто хмарами нижнього ярусу, які мають найбільший покрив, то на ТФ, ФО та ХФ з хвилями спостерігали 35-40% випадків Ns і Ns-As; St і Sc – у межах 10-15%, причому фронт оклюзії майже однаково супроводжують і St, і Sc (~10%).

На ТФ частіше бувають Sc (15%), а на холодному із хвилями – St (15%). На холодному і вторинному холодному фронтах шарувато-дощових хмар фіксували ~20% випадків, а шаруватих та шарувато-купчастих ~ 45%, але є і відмінність: для ХФ більш характерні St (25%), а для вторинних холодних – Sc (~30%). Розподіл хмарності на ТФ відносно його приземної лінії такий: у зоні фронту (± 50 км) переважають Ns, As, Ci, Cs (~80%); St, Sc, Ac, Cu – ~20%. Далі від лінії фронту (51-100 км, але перед фронтом) це співвідношення становить 65-70 і 30-35%, на відстані 101-200 км – ~60 і 40%, 201-300 км – ~45 і 55%, 301-400 км – 20-25 і 75-80%. За ТФ на відстані до 100 км шаруватоподібних хмар

відмічали майже порівну з хвилеподібними та конвективними (відповідно ~45 і 55%), але далі від лінії фронту їх кількість зменшувалася: на відстані 101-200 км – 35-40 і 60-65%, на відстані 201-300 км – 20 і 80%. Ширина смуги хмарного покриву для аналізу відбиралася в межах близько 700 км (400 км перед фронтом і 300 км за ним).

Розподіл хмарності на ФО подібний до розподілу на ТФ: у зоні фронту та перед ним на відстані 100 км переважають шаруватоподібні хмари (відповідно ~80 і 65-70%), на відстані 100-200 км перед фронтом – 55-60%, 200-300 км – 55%. За фронтом повторюваність шаруватоподібних хмар значно зменшилася: на відстані до 100 км їх уже втричі менше (30-35%), ніж хвилеподібних. Ширина досліджуваної фронтальної смуги хмарності становила 500 км (300 км перед фронтом, 200 км за ним).

Ширина хмарного покриву на ХФ із хвилями, де виконували зондування атмосфери, у середньому була 600 км (300 км перед фронтом і 300 км за ним). У передній частині фронту (до 200 км) переважали шаруватоподібні хмари: у зоні фронту – 65-70%, до 100 км – ~65%, від 100 до 200 км – ~60%, а на відстані 200-300 км шаруватоподібних та хвилеподібних хмар було зафіксовано порівну (50%). Поза фронтом на відстані до 100 км Ns, As, Ci, Cs було відмічено 60-65% випадків, далі від лінії фронту їх повторюваність зменшувалась і на відстані 200-300 км становила 35-40%. Холодні фронти в середньому мали ширину хмарного покриву близько 500 км (200 км перед фронтом і 300 км за ним).

У зоні ХФ спостерігали 55-60% випадків шаруватоподібних хмар, перед фронтом на відстані до 200 км – 30%. За фронтом їх повторюваність значно знижувалась: на відстані до 100 км – 35-40%, 101-200 км – 15%, 201-300 км – 5%, тобто холодним фронтам більш характерні хвилеподібні хмари. Досить висока повторюваність шаруватоподібних хмар у зоні фронту та частково в передній його частині зумовлена своєрідністю фронтогенезу над Україною. На її територію виходить переважно уже сформована система фронтів, тобто майже

завжди існує теплий сектор, в якому через наявність «теплої несучої смуги» перед ХФ є умови для утворення шаруватоподібних хмар.

Вторинний холодний фронт мав досліджувану хмарну систему завширшки ~300 км (100 км перед фронтом і 200 км за ним). Тільки в зоні фронту (± 50 км) повторюваність шаруватоподібних хмар становила 40-45%, а далі від лінії фронту як у передній частині, так і в тиловій таких хмар було зафіксовано значно менше (15-30%).

Будь-які експериментальні дані щодо еволюції хмар мають практичне значення для розроблення схем прогнозів хмарності [4].

3 ОБ'ЄКТИВНИЙ АНАЛІЗ АТМОСФЕРНИХ ФРОНТІВ

Аналіз атмосферних фронтів полягає у визначенні положення, типу фронту на приземних картах погоди та картах баричної топографії і називається фронтологічний аналіз. Ця операція є складною внаслідок:

- відсутності прямих об'єктивних кількісних критеріїв визначення положення фронту біля поверхні землі і на різних висотах;
- впливу на атмосферні фронти процесів різних масштабів, які розвиваються не тільки в зоні фронту, але й на деякій відстані від нього;
- впливу орографії, характеру підстильної поверхні, властивостей повітряних мас, особливостей баричного поля та ін.

При аналізі атмосферних фронтів на картах погоди необхідно враховувати комплекс метеорологічних величин та явищ погоди, які визначають положення, характер та інтенсивність процесів, а також контрасти температури, нахил фронтальної поверхні, профіль баричної улоговини, в якій розташований фронт. Інколи в реальних умовах деякі з цих ознак відсутні, інші виражені настільки слабо, що не дозволяють визначити положення або навіть існування фронту [12].

Об'єктивний аналіз атмосферних фронтів проводиться на основі кількісного обліку особливостей метеорологічних полів в області фронту. В якості кількісних характеристик на практиці використовують фронтальні параметри, які в першу чергу включають горизонтальний градієнт температури, враховують структуру полів геопотенціалу, вологості, опадів і т.д. [5, 13, 16-17].

Одним з таких показників є термічний фронтальний параметр - Thermal Front Parameter (TFP), який завдяки своїй універсальності може застосовуватися для оцінки бароклінності атмосферних процесів різних просторово-часових масштабів [13, 20-21]. Максимальні значення TFP вказують на розташування лінії атмосферного фронту. Термічний фронтальний параметр є найпростішою

кількісною характеристикою, що використовується для об'єктивного аналізу атмосферних фронтів і визначається за формулою:

$$TFP = -\nabla|\nabla T| \frac{\nabla T}{|\nabla T|}, \quad (3.1)$$

де $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y}$ – двовимірний векторний диференціальний оператор;

$|\nabla T| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$ – модуль горизонтального градієнта температури.

Перший множник рівняння (3.1) описує зміну температурного градієнта, другий – проекцію першого члена у бік градієнта температури. Існує чіткий зв'язок між TFP, як параметром фронтального аналізу та загальноприйнятим визначенням фронту, а саме – на холодному фронті температура починає падати, а на теплому фронті спостерігається закінчення підвищення температури. Це визначення ідентичне максимальному показнику TFP – рис.3.1 (а).

Температура для розрахунку TFP може братися з будь-якого рівня. Оскільки фронт є синоптичним об'єктом не тільки на поверхні, але й у певному шарі тропосфери, то використовується деяка еквівалентна товщина, визначена підвищенням температури повітря, яке відбулося б в разі конденсації всього вмісту вологи.

Перевагою такого модифікованого параметра є чіткість фронтальних градієнтів. Існує зв'язок між полем еквівалентної товщини і TFP, а саме – максимум поля TFP, яке визначає положення фронту, можна виявити на теплій стороні зони зі значними градієнтами, оскільки там зміна градієнта товщини максимальна – рис.3.1 (б). Розраховані поля TFP мають вигляд смуг, розташованих переважно в областях зниженого тиску. Лінію фронту проводять за максимальними додатними показниками TFP, від'ємні значення не використовуються.

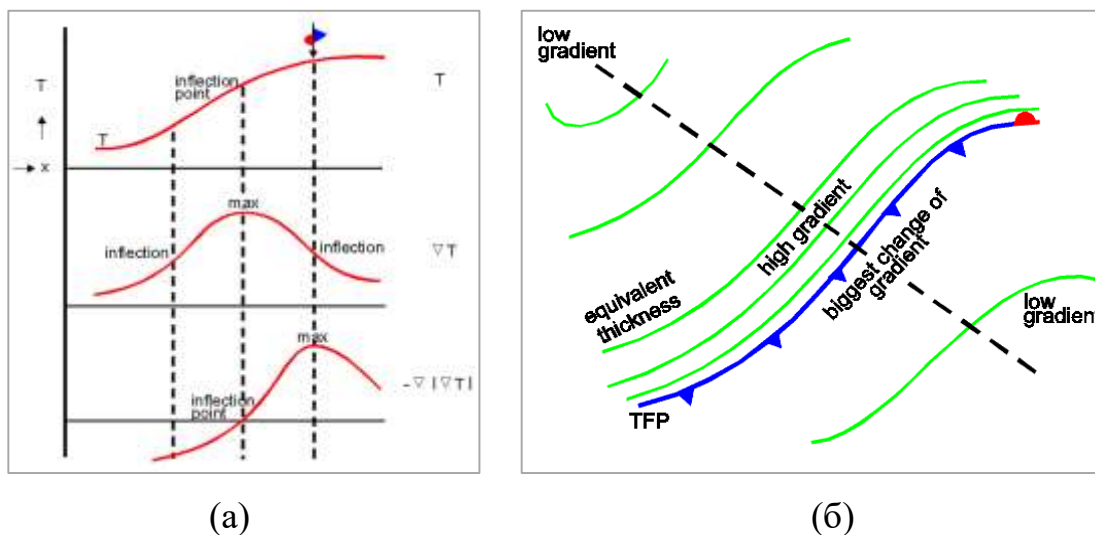


Рисунок 3.1. – Схема розподілу TFP у зоні атмосферного фронту

Поле термічного фронтального параметра також задовільно узгоджується з хмарними полями на супутникових знімках. При цьому зони додатних значень TFP, особливо з врахуванням вологості повітря, збігаються з ділянками найбільшої яскравості хмарності на знімках.

В реальних синоптичних процесах інтерес представляє об'єктивна ідентифікація зон атмосферних фронтів в циклонах, - показники TFP можуть відображати інтенсивність фронтогенезу та циклогенезу [13, 20-21].

Інший підхід до об'єктивного аналізу атмосферних фронтів було запропоновано в роботах Шакіної Н.П. та ін. [5, 16-17]. Аналіз заснований на введенні деякої функції, розрахованої у вузлах регулярної сітки, тобто фронтального параметру Ψ , значення та розподіл поля якого використовують для визначення положення фронтів. Можна виділити або зону фронту (як область всередині окресленої ізолінії фронтального параметру), або фронт, як лінію. У першому випадку положення виділеної зони фронту повинно узгоджуватися з розташуванням зони опадів. Узгодження слід вважати тим кращим, чим більша частка розподілу опадів спостерігається в межах зони фронту. У звичних термінах оцінок справджуваності це означає, що всередині зони фронту потрібно діагностувати за даними об'єктивного аналізу наявність

опадів, а за межами цієї зони – їх відсутність. При цьому передбачуваність наявності опадів повинна бути високою ($\gg 50\%$), а критерії Пірсі-Обухова – значними. Критерій Пірсі-Обухова характеризує успішність прогностичного методу, враховуючи (окрім природної повторюваності явища) передбачуваність та справджуваність явища. Чим вище ці показники, тим більш ефективний метод. Необхідне виконання третьої умови: безперервно змінюваний фронтальний параметр повинен бути пов'язаний з монотонною залежністю повторюваності опадів: чим вищий фронтальний параметр, тим вища повторюваність опадів всередині області, окресленої його ізолініями. Таким чином, ступінь активності фронту визначається ступенем інтенсивності процесів, які формують опади на цьому фронті.

Положення фронту співвідноситься з зонами максимальних градієнтів полів метеорологічних величин. Ступенем бароклінності виступає число ізобаро-ізостеричних соленоїдів, яке пов'язане з горизонтальним градієнтом товщини шару тієї області, де градієнт бароклінності має екстремум у напрямку градієнта товщини шару і ототожнюється з фронтами - рис.3.2 (заштрихованим ділянкам відповідають області максимальних градієнтів еквівалентної товщини шару 850 – 500 гПа).

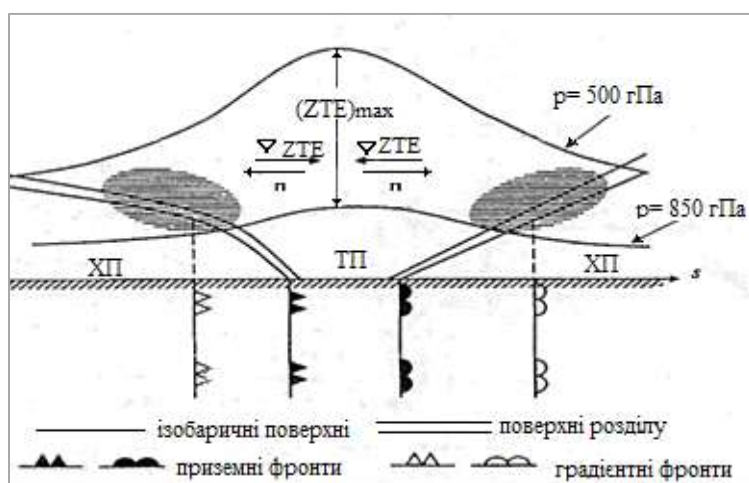


Рисунок 3.2 – Схема положення приземних та градієнтних фронтів

Фронтальний параметр являє собою горизонтальний градієнт модуля градієнту еквівалентної товщини шару ZTE між ізобаричними поверхнями 925 та 700 гПа або 850 та 500 гПа, тобто фронтальний параметр характеризує зміну густоти ізоліній ZTE. Формула для визначення параметра має вигляд:

$$\Psi_{ZTE} = \nabla |\nabla ZTE| \vec{n} \quad (3.2)$$

де $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y}$ – двовимірний векторний диференціальний оператор;

$\vec{n} = - \frac{\nabla ZTE}{|\nabla ZTE|}$ – одиничний вектор, спрямований до області мінімальних

значень температури та вологості;

ZTE – еквівалентна товщина шару між ізобаричними поверхнями P_u і P_l :

$$ZTE = - \sum_{P_l}^{P_u} \frac{R}{g} \bar{T}_e \ln \left(\frac{P_u}{P_l} \right) \quad (3.3)$$

де R – газова стала;

$P_u = 850$ гПа;

$P_l = 500$ гПа;

\bar{T}_e – функція від еквівалентної температури:

$$\bar{T}_e = - \frac{(T_e)_u - (T_e)_l}{\ln \frac{(T_e)_u}{(T_e)_l}}.$$

Оскільки приземний фронт розташовується завжди на теплому боці зони максимальних градієнтів, то з формули (3.2) слідує, що фронтальним умовам відповідають тільки додатні значення Ψ_{ZTE} . При цьому положення фронту

співпадає з лінією максимальних значень фронтального параметру. Таким чином, фронтальний параметр Ψ є характеристикою бароклінності у шарі 850-500 гПа.

Поле розподілу фронтального параметру Ψ використовують для проведення фронтів на картах погоди, тобто лише для діагнозу наявності фронту, а не його інтенсивності. Розміщення фронтів визначається як положення гребневих ліній у полі Ψ , при чому до розгляду приймаються лише значення $\Psi > 2,5 \text{ K}/\Delta n$ (де Δn – крок сітки). Від'ємні значення Ψ не приймаються на розгляд, оскільки вони відповідають нефронтальним умовам і обнуляються. Значення Ψ тим більше, чим більша бароклінність у шарі 850 – 500гПа.

Ефективність методів об'єктивного аналізу фронтів дозволяє виділити зону фронту кінцевої ширини і надає інформацію про ступінь активності фронту. Якщо цей метод дозволяє виділити не зону, а лінію фронту, і не надає вказівок на інтенсивність, то запропонований підхід не приймається [16-17].

4 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ФРОНТАЛЬНИХ ОПАДІВ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Для дослідження відібрано 5 випадків посилених опадів фронтального походження над територією України: один випадок - тверді опади у січні 2021 р. і 4 випадки теплового періоду при формуванні небезпечних та стихійних злив у 2020-2021 рр. В якості вихідної інформації використано оперативні синоптичні дані програми АРМсин, бюлетені погоди, дані про хмарність МШСЗ, індекси нестійкості, характеристики термобаричних полів [18-19].

4.1 Синоптичні умови виникнення та еволюції атмосферних фронтів

Досліджувані випадки аналізуються у хронологічному порядку.

Синоптичні ситуації з активною фронтальною діяльністю відмічалися двічі у травні 2020 р.: 05-08 травня та 28-31 травня.

У першій декаді травня 2020 р. фронтальні розділи над Східною Європою і Україною, зокрема, були пов'язані з циклоном у стадії заповнення. Локалізацію його розмитого центру біля поверхні землі та стаціонарування над Україною зумовили дві області високого тиску над північчю Європи та Західним Сибіром - рис.4.1. Приземний центр мав лише одну замкнену ізобару 1010 гПа, а мінімальний тиск у центрі на 12 год. 5 травня складав 1006,8 гПа у Мінську. З циклоном пов'язані 2 фронтальні системи – арктична з хвилями, широтно орієнтована через європейський сектор до вершини неподалік Києва і, далі, теплою ділянкою на Східноєвропейську рівнину, та полярна, - вираженої меридіональної спрямованості, оклюдована, з напрямом від Туреччини до точки

оклюзії на північно-східних кордонах України і, далі, на південь через Прикаспійську низовину до Середньої Азії.

Таким чином, через Україну проходила ділянка холодного фронту арктичного розділу від Одещини через центр країни на Київ, а схід підпадав під вплив холодного фронту полярної системи. Висотне термобаричне поле за даними карти АТ-500 5 травня виділяє глибоку улоговину над Україною з криволінійною віссю від Баренцевого моря через Скандинавію, Центральну та Східну Європу, Чорне море на схід Середземномор'я. Барична улоговина «V»-подібного профілю, загострена, суміжні висотні гребені розміщені відповідно на крайньому заході Європи та над Східноєвропейською рівниною і Уралом. За винятком східних та північно-східних районів, територія України перебуває під впливом цієї улоговини. За даними карти ВТ-500/1000 структура висотного баричного поля практично співпадає з термічним – Україна охоплена висотною улоговиною холоду, і лише схід та північний схід – гребенем тепла.

До 6 травня на карті АТ-500 виділяється висотний центр циклону в районі Варшави, висотна фронтальна зона (ВФЗ) над центром і сходом Європи різкої меридіональної спрямованості, з максимальними градієнтами над Скандинавією та півднем Європи. Висотний циклон термічно однорідний – на ВТ-500/1000 йому відповідає замкнена область холоду. Територія України залишається в термічно несиметричному полі відносно меридіану 35° сх.д – західна частина під впливом улоговини холоду, а східна – гребеня тепла.

Біля поверхні землі тиск падає до 1003,8 гПа у Києві на строк 00 год. Циклон стаціонує, положення фронтальних розділів зберігається. Активізація процесу відбувається під впливом посилення антициклонів зі сходу до 1034 гПа над Сибіром та заходу – 1026 гПа над Північним морем. На 12 год. 6 травня арктична фронтальна система також оклюдується над Білоруссю, а холодні ділянки обох фронтальних розділів зміщуються на схід так, що холодний фронт арктичного розділу впливає вже на східні регіони України. До 18 год. 6 травня центр циклону над Україною не виділяється, а фронтальна діяльність

залишається активною, формуються хвилі на фронтальних розділах та ділянки вторинних холодних фронтів.

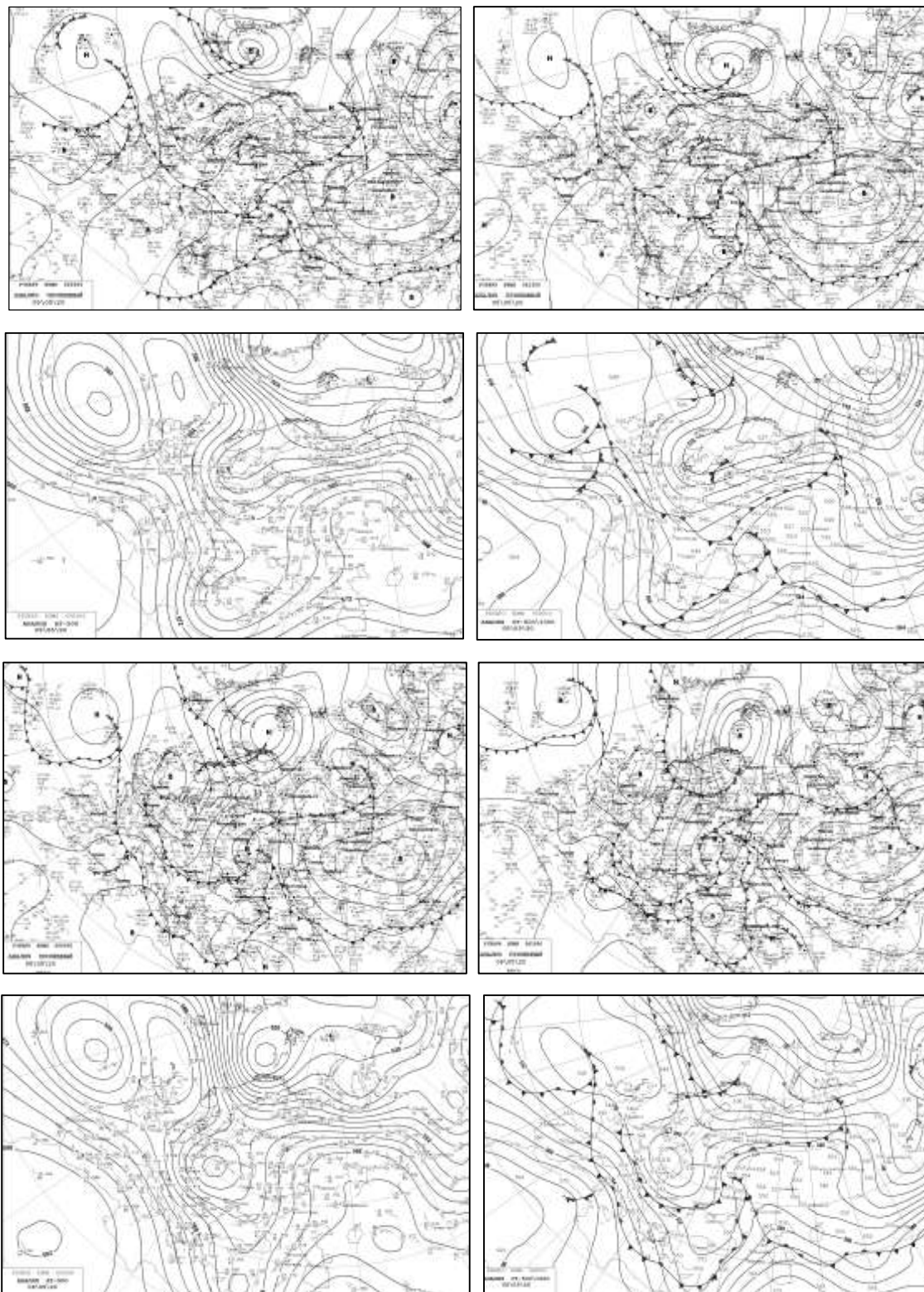


Рисунок 4.1 – Приземні та висотні карти погоди 05-06 травня 2020 р.

До 7-8 травня висотне та приземне баричні поля дещо трансформуються – рис.4.2. Так, на 7 число у приземному баричному полі над східною Європою виділяється улоговина циклону з центром над Баренцовим морем, мінімальний тиск 996,7 гПа поблизу о. Шпіцберген. Над Україною зберігається розмите поле зниженого тиску при заповненні приземного циклону і виділенні висотного центру вихору безпосередньо над країною із центром поблизу Києва за даними АТ-500. ВФЗ активна над Центральною та Східною Європою, територія України знаходиться у системі висотної улоговини при зростанні баричних градієнтів. Протягом доби 7 травня полярна фронтальна система зміщується далеко на південь і не впливає на погодні умови України, а меридіонально орієнтована ділянка холодного фронту арктичної системи зумовлює ускладнення погоди на сході країни, а також фронт оклюзії визначає небезпечні явища погоди на заході та півночі країни.

До наступної доби 8 травня висотне термобаричне поле дещо змінюється – висотний центр циклону не відмічається над Україною, територія охоплена термобаричною улоговиною, вісь якої симетрично орієнтована вздовж 30°сх.д. При цьому динамічно значима ділянка ВФЗ по висхідній гілці виділяється на сході України. Загостренню градієнтів у цій області сприяє пологий гребінь над Сибіром. Отже, штормова зона над східними і північно-східними областями України визначає ускладнення погодних умов.

Приземне баричне поле характеризується слабкими градієнтами протягом доби, при русі антициклону з заходу область впливу північного циклону над Східною Європою звужується. Центр вихору спостерігається над Баренцовим та Карським морями. В результаті на сході Європи формується смуга, або «перемичка» зниженого тиску між двома антициклонами – над Європою та Сибіром. У цій смузі зберігається меридіонально орієнтована арктична система фронту з хвилями, яка ще впливає на процеси опадоутворення на сході України.

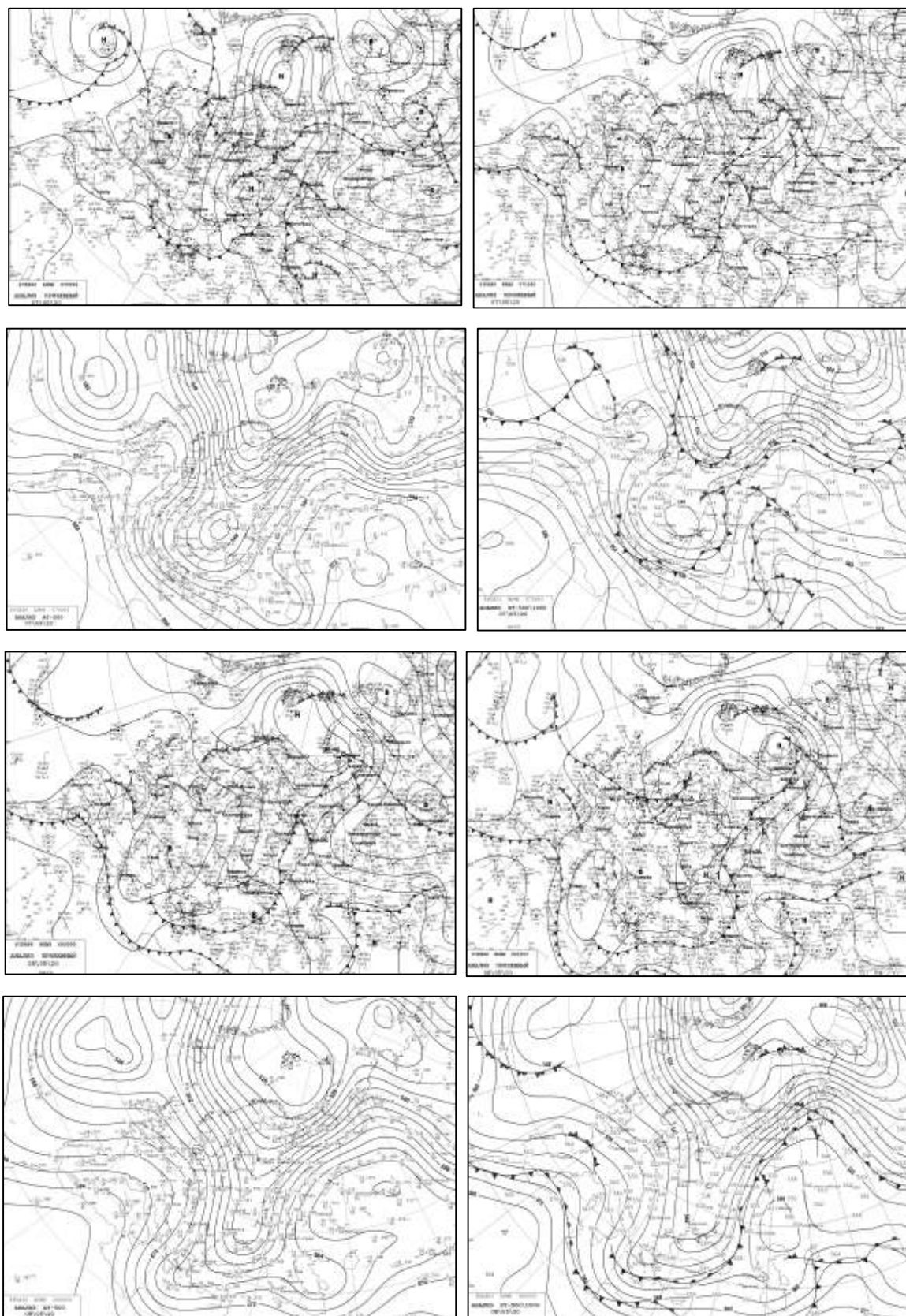


Рисунок 4.2 - Приземні та висотні карти погоди 07-08 травня 2020 р.

Наступний випадок активного фронтогенезу над Україною спостерігався наприкінці місяця - 28-31 травня 2020 р. Ускладнення погодних умов було зумовлене впливом висотного циклону, білі поверхні землі через територію країни проходили дві фронтальні системи - арктична та полярна (рис.4.3). Небезпечні явища погоди сформувалися як на теплому, так і холодному фронтах.

У приземному баричному полі протягом періоду відмічається розмита система циклону, що заповнився у нижніх шарах тропосфери, а на рівні 300 гПа над Балканами, Румунією та Україною спостерігається поглиблений висотний циклон. ВФЗ 28-31 травня має виражену меридіональну спрямованість над європейським регіоном з хвилями великої амплітуди, Україна перебуває в несиметричному висотному термобаричному полі, подібно вищерозглянутому випадку у першій декаді травня. Переважна територія України підпадає під вплив глибокої термобаричної улоговини, а східні регіони – тилової частини пологого гребеня над Кавказом та Східноєвропейською рівниною.

28 числа через територію України у приземному полі проходили дві паралельні фронтальні системи, орієнтовані з південного заходу на північний схід, вершини фронтальних розділів виділялися в районі Одеси (арктична система) та над східною акваторією Чорного моря (полярна система). В результаті смуга посиленних опадів точно відповідала орієнтації теплих ділянок фронтів обох систем. У тропосфері за даними карт АТ-500, АТ-400, АТ-300 центр висотного циклону відмічається над Болгарією, вихор більш чітко виражений у верхній тропосфері – на рівні 300 гПа йому відповідає 3 замкнені ізогіпси. Цей циклон розміщений у системі глибокої видовженої улоговини від основного центру циклону над Гренландським морем – так званий, «відсічений циклон». Вісь улоговини орієнтована від Скандинавії через Східну Європу на Балкани та Середземномор'я. На карті ВТ-500/1000 підвищені градієнти відмічаються саме над півднем, центром, північчю та сходом України - ВФЗ динамічно значима. До кінця доби 28 травня у приземному баричному полі відбуваються зміни, разом з цим фронтальні розділи здійснюють деякий

зворотній рух і зміщуються до строку 18 год. на захід так, що теплий фронт арктичної системи проходить від Вінницької області на Київщину та Чернігівщину, а полярний фронт оклюдується поблизу Харкова.

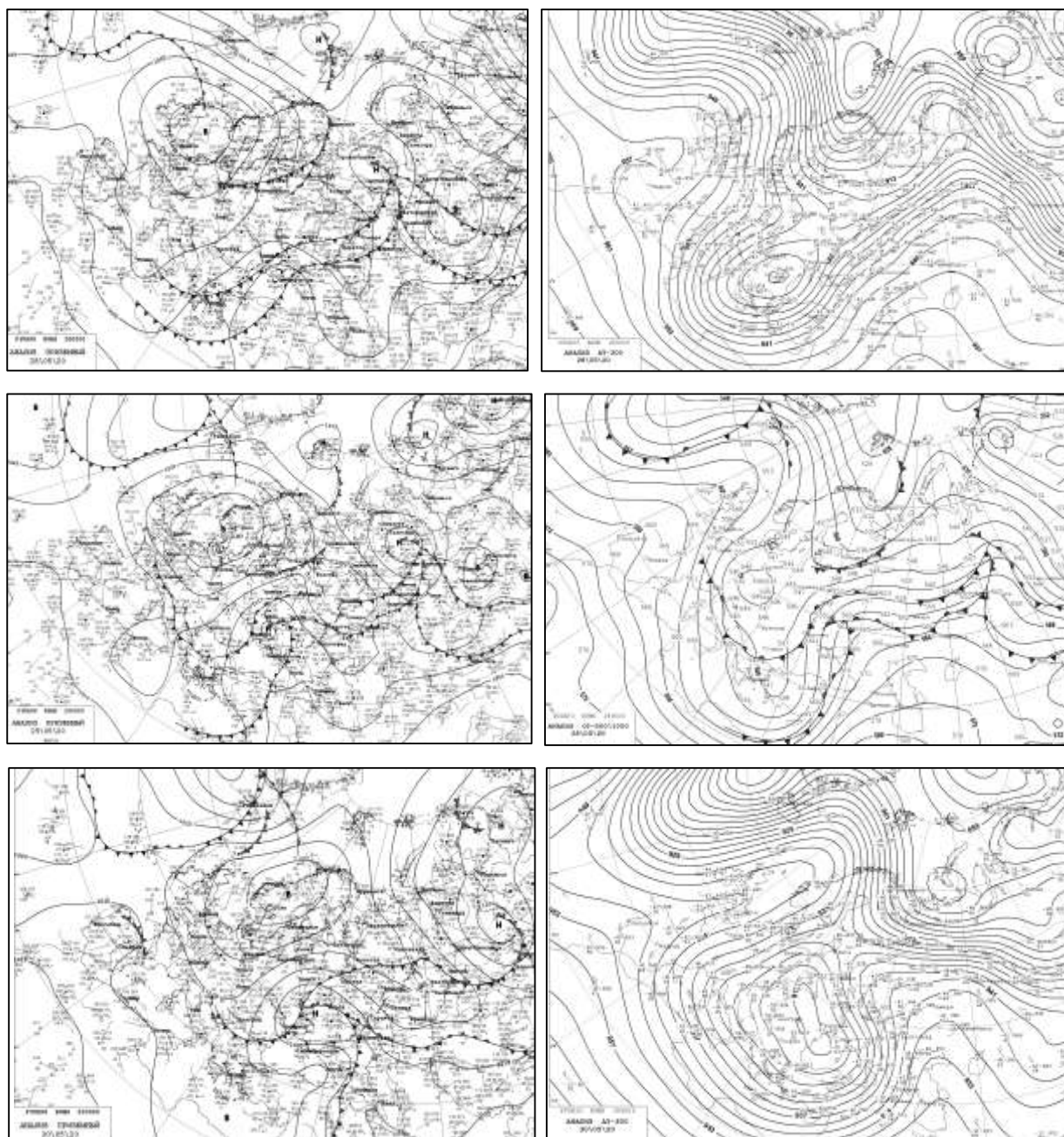


Рисунок 4.3 - Приземні та висотні карти погоди 28-30 травня 2020 р.

За добу на 29 травня біля поверхні землі над Україною суттєвих змін у структурі баричного поля не відбувається, стаціонавання фронтів і їх

загострення зумовлює розміщення посиленого антициклону з центром над Скандинавією (максимум тиску 1032 гПа), відріг якого поширюється на Східноєвропейську рівнину і «відтісняє» фронтальні розділи до півдня. Україна підпадає під вплив теплого та холодного фронту арктичної системи та фронту оклюзії полярної системи. На карті ВТ-500/1000 та АТ-500 зростають градієнти ВФЗ над Україною при посиленні меридіональності у перехідній штормовій зоні між улоговиною над Європою та гребенем над Кавказом та Східним Сибіром. За даними АТ-300 над Україною спостерігається струминна течія (СТ) у південних потоках, швидкості вітру до $50 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

На 12 год. 30 травня у приземному полі виділяється центр циклону над Україною при регенерації вихору – тиск знижується до 998 гПа у центрі над Києвом. З центром вихору пов'язана арктична система фронту, полярний фронт оклюдований і зміщений далеко на східну периферію циклону. У верхній тропосфері масштабний висотний циклон охоплює практично всю територію України, Балкани та Центральну Європу, у передній частині якого зростають градієнти на сході та північному сході України.

Активізація фронтальної діяльності спостерігалася у липні 2020 р., випадок представляє інтерес з тієї точки зору, що влітку над перегрітим континентом fronti здебільшого розмиті. У літні місяці баричні градієнти та інтенсивність адвекції повітря значно зменшуються, що призводить до загального послаблення інтенсивності синоптичних процесів.

13-14 липня 2020 р. по території України відмічалось зміщення двох паралельних ділянок холодних фронтів (рис.4.4), що зумовили стихійні опади на Лівобережній частині країни.

13 липня висотне баричне поле над Східною Європою досить розмите, зростання градієнтів відмічається лише в області входу ВФЗ на півночі Східноєвропейської рівнини (вище 60° півн.ш.). За даними АТ-500 переважна територія України знаходиться в улоговині з криволінійною віссю від Норвезького моря через Центральну Європу до східної акваторії Чорного моря,

на східні регіони країни впливає тилова частина висотного антициклону з центром над Нижнім Уралом. На карті АТ-300 над Україною зберігається дельта ВФЗ при циклонічній кривизні ізогіпс. На карті ВТ-500/1000 територією країни проходять дві ділянки холодних фронтів у зоні збільшених термічних градієнтів, орієнтовані з південного заходу на північний схід. Біля поверхні землі протягом доби відмічається деяке зміщення холодних фронтів у розмитому полі зниженого тиску під впливом поширення через Європу відрогу азорського максимуму, в якому на строк 18 год. формується ядро антициклону над Центральною Європою з максимальним тиском у Вені 1022 гПа. При цьому на Урал поширюється інший відріг, - арктичного антициклону, що перешкоджає переміщенню фронтальних розділів за межі Східної Європи. В результаті впливу фронтальних розділів, небезпечні та стихійні явища погоди сформувалися у східному, північно-східному та південно-східному регіонах країни.

На наступну добу 14 липня біля поверхні землі над сходом України, Середньоруською височиною та Донською рівниною оформлюється центр циклону з мінімальним тиском 1004,1 гПа у Харкові на строк 00 год; до кінця доби циклон зміщується на північний схід і поглиблюється до 998,5 гПа над Східноєвропейською рівниною. Циклон термічно неоднорідний, просторова вісь має значний нахил на захід. Висотне баричне поле зазнає деяких змін у середній та верхній тропосфері. За даними АТ-500 над Києвом виділяється висотний центр циклону, а на АТ-300 вихор чітко виражений з центром над заходом України. У східному регіоні країни спостерігається СТ у південних потоках. ВФЗ має виражену меридіональну спрямованість над Центральною та Східною Європою, а на півдні континенту - практично квазізональні потоки по Середземномор'ю в області «підшови» масштабної висотної улоговини. За даними карти ВТ-500/1000 на сході України виділяються найбільші термічні градієнти по висхідній гілці ВФЗ. На погодні умови України впливає арктична фронтальна система з хвилями.

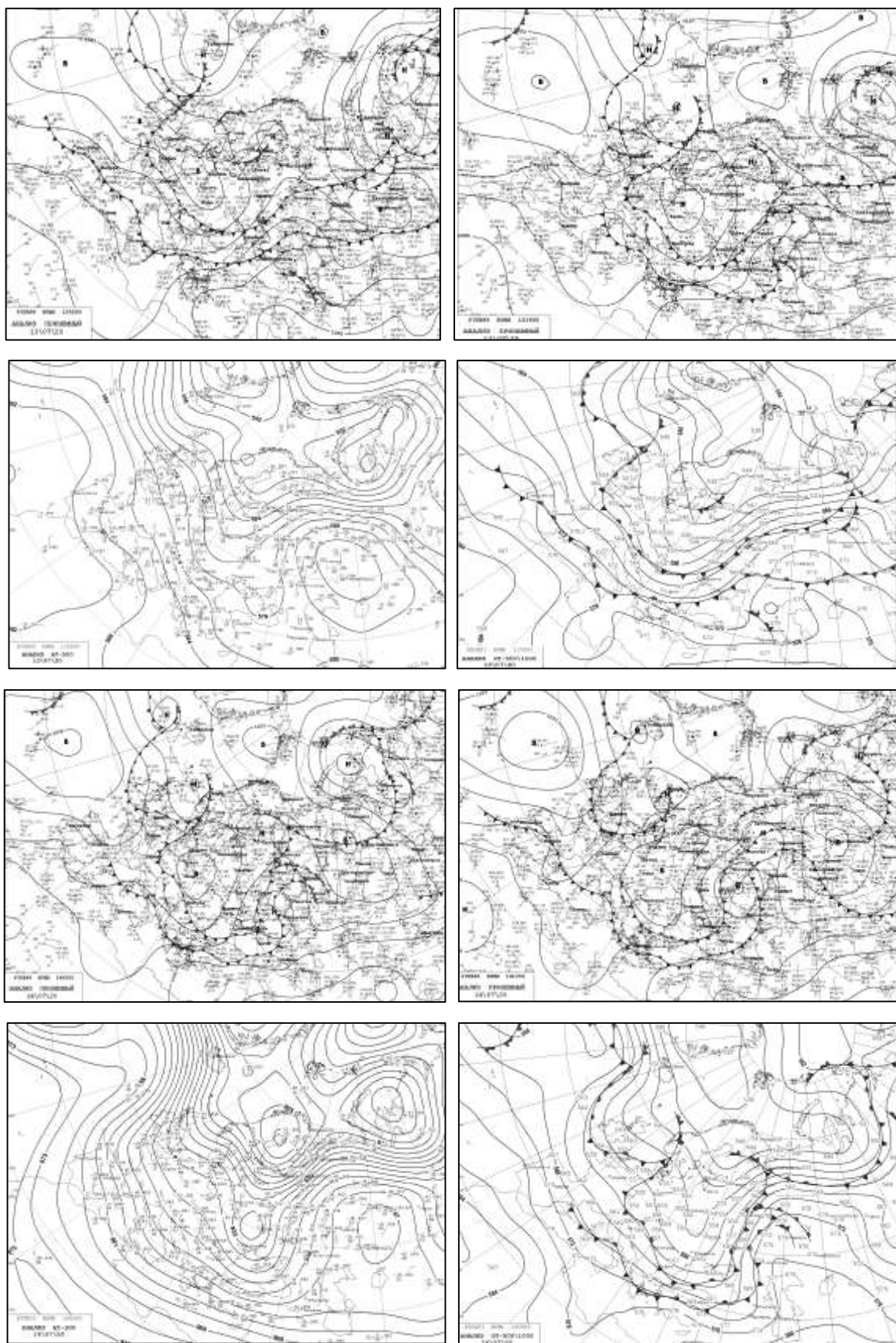


Рисунок 4.4 - Приземні та висотні карти погоди 13-14 липня 2020 р.

У 2021 р. відібрано для дослідження дві ситуації – формування стихійних снігопадів наприкінці січня та сильних злив у середині липня.

Наприкінці січня 2021 р. на паралельних теплих ділянках фронтів південного циклону на території України спостерігалися сильні снігопади та складні відкладення. Південний циклон сформувався від 00 год. 26 січня на хвилі арктичної фронтальної системи над Адріатичним морем в улоговині основного циклону з центром над Білоруссю – рис.4.5.

26 січня територія України знаходилася під впливом основного циклону і пов'язаної з ним фронтальної діяльності – холодної ділянки арктичної системи та оклюдованої полярної системи. Центр циклону виділяється до рівня 850 гПа, вихор термічно неоднорідний. На сході країни сформувалася штормова зона між циклоном над Східною Європою (мінімальний тиск 994 гПа) та відрогом азійського максимуму (максимальний тиск у центрі над Середньосибірським плоскогір'ям 1050 гПа). Такі умови спричинили загострення фронтальних розділів та збільшення термобаричних градієнтів. За даними карти ВТ-500/1000 над європейським сектором виділяється різка меридіональність потоків, переважна частина України охоплена термічним гребенем з віссю від Ірану через Кавказ, Східну Європу до Скандинавії, і лише на захід країни впливає передня частина висотної улоговини холоду з осередком над центром Європи. На рівні 500 гПа над Західною, Південною та Східною Європою простежується динамічно значима ВФЗ зі збільшеними градієнтами. До 12 год. біля поверхні землі південний циклон вже має одну замкнену ізолінію, це стадія молодий циклон, арктична та полярна фронтальні системи пов'язані з центральною частиною вихору. Тиск у південному циклоні протягом доби знижується, а основний центр циклону над Східноєвропейською рівниною зазнає зворотного руху на північ і також поглиблюється.

За добу на 00 год. 27 числа у приземному полі південний циклон зміщується на Балкани та захід Чорного моря, поглиблюється до 1000 гПа; через Україну спрямовані дві ділянки паралельних теплих фронтів.

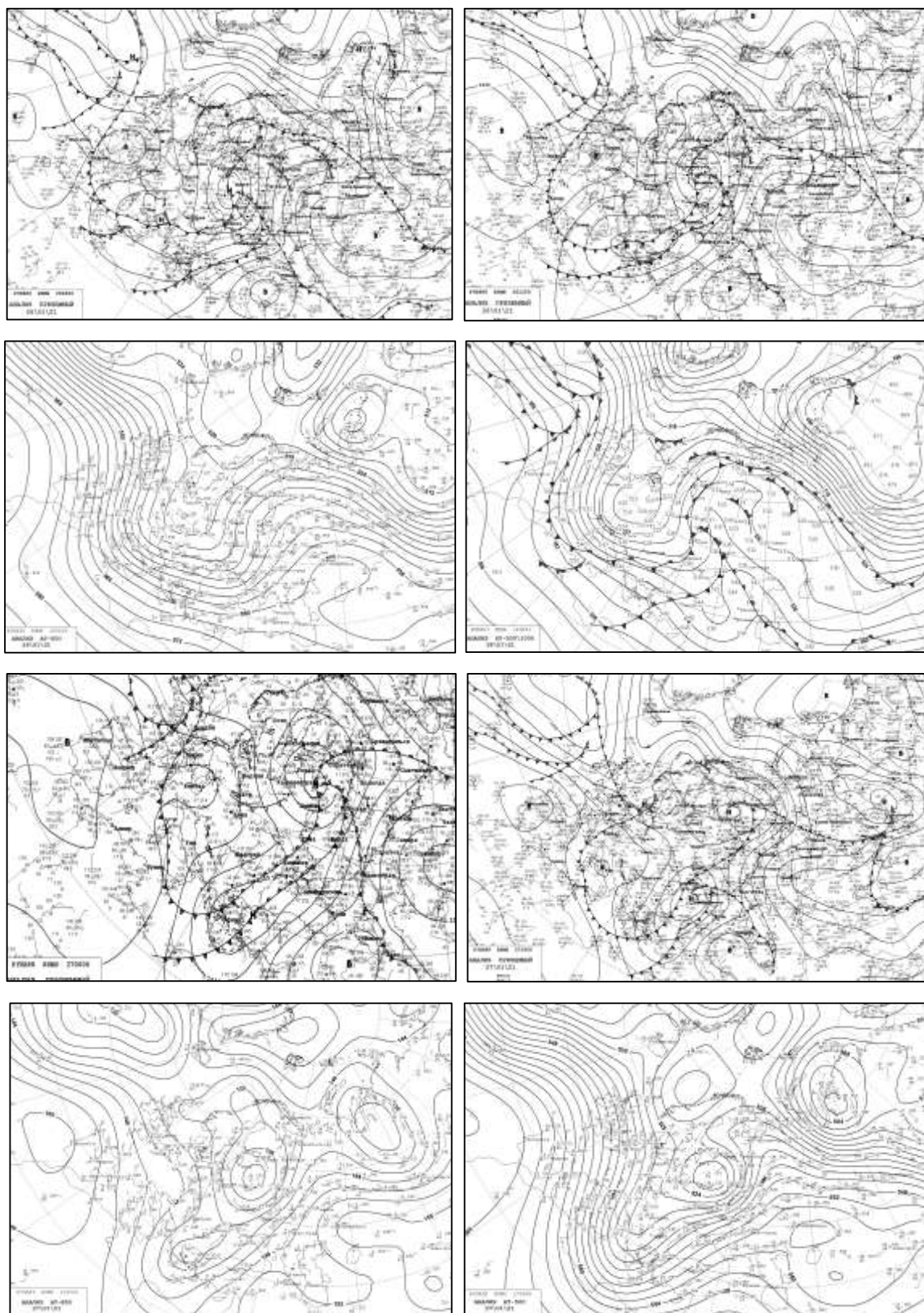


Рисунок 4.5 - Приземні та висотні карти погоди 26-27 січня 2021 р.

До 06 год. тиск у центрі циклону продовжує знижуватися до 997 гПа над Анкарою, а на 12 год. центр вихору вже охоплює переважну частину України та акваторію Чорного моря, мінімальний тиск 996,8 гПа. Зростають градієнти на двох теплих ділянках атмосферних фронтів; до 18 год. баричне поле зберігає структуру, при цьому арктична фронтальна система оклюдується в районі Дніпра, фронт оклюзії проходить по Херсонщині. Центр циклону поступово поширюється по висоті, і 27 січня вже виділяється на АТ-850 над Егейським морем. На рівні 500 гПа через Україну проходить струминна течія у передній частині висотної улоговини, швидкість вітру сягає $35 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ у Києві. За даними карти ВТ-500/1000 динамічно значима ділянка ВФЗ зі збільшеними градієнтами орієнтовна від Балкан на Харків, що узгоджується з положенням двох паралельних систем атмосферних фронтів на приземній карті. За винятком західних регіонів, територія країни знаходиться під впливом термічного гребеня.

На строк 00 год. 28 січня південний циклон ще охоплює простір України, фронтальна діяльність зберігається, а до 12 год. вихор поступово заповнюється біля поверхні землі при зміщенні фронтальних розділів на схід до кордонів країни.

У липні 2021 р. комплекс небезпечних явищ погоди конвективного походження відмічався 21-22 числа практично на всьому просторі України за винятком північного заходу. Складні погодні умови сформувалися на двох паралельних холодних ділянках фронтів у розмитому баричному полі біля поверхні землі – рис.4.6. У тропосфері висотні центри циклонів також не виділялися. Висотне баричне поле на рівні 500 гПа над Україною характеризувалося незначними градієнтами, динамічно значима ВФЗ відмічалася на півночі Атлантики та над Скандинавією і північчю Східноєвропейської рівнини. На карті АТ-300 над півднем Європи, Чорним морем та Україною в цілому переважають зональні потоки зі зростанням градієнтів. Так, через Балкани на Чорне море до Кавказу орієнтована струминна течія зі швидкостями до $40 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

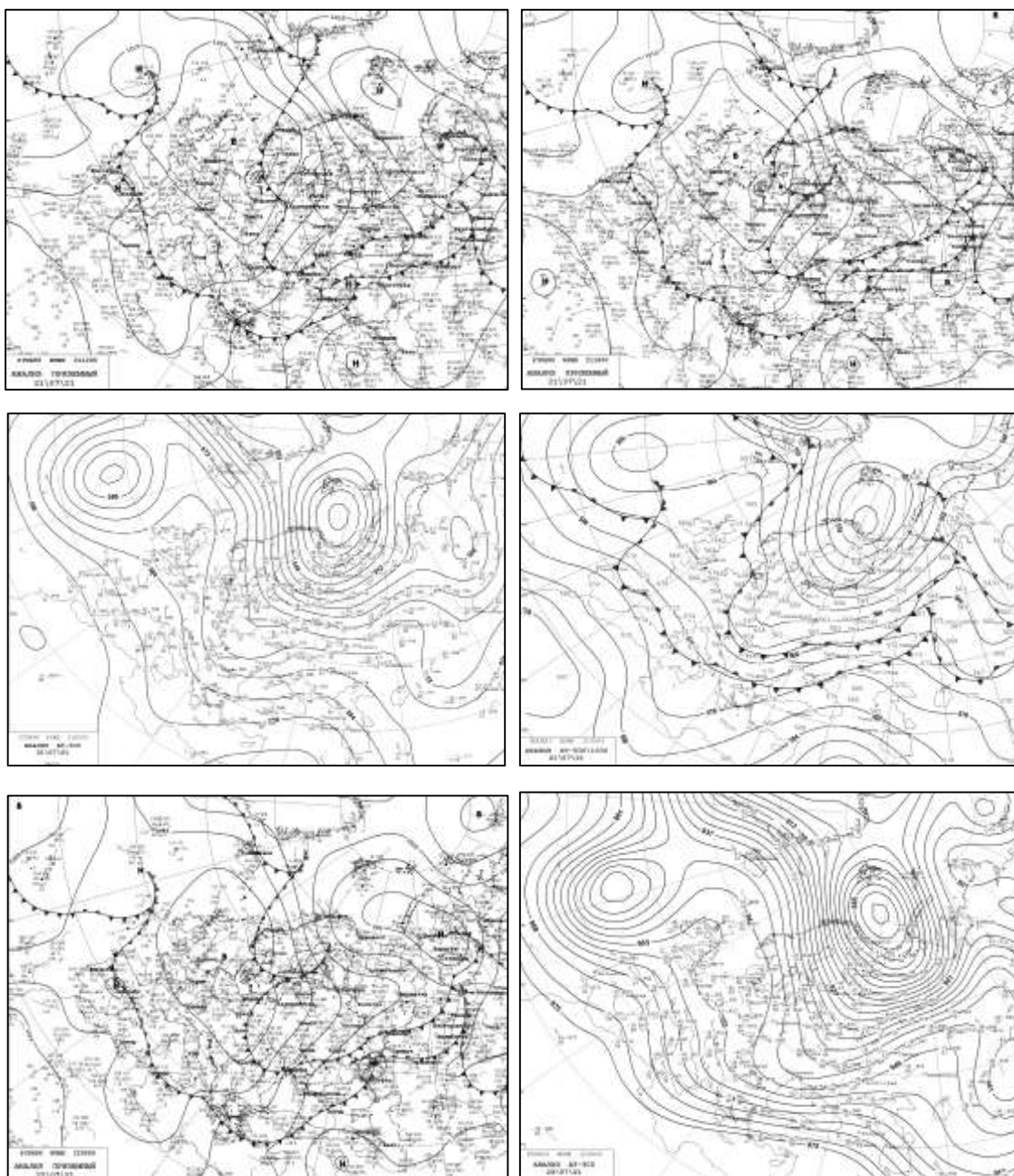


Рисунок 4.6 - Приземні та висотні карти погоди 21-22 липня 2021 р.

За даними карти VT-500/1000 над Східною Європою термічні градієнти збільшені, паралельні фронтальні системи - арктична та полярна зміщені далеко до півдня ($40-50^{\circ}$ півн.ш) внаслідок поширення потужного ядра холоду з Баренцового моря через Скандинавію на Центральну Європу. У приземному полі протягом доби зберігається розмите баричне поле по східній периферії антициклону з центром над Британією. На строк 00 год. вершини фронтальних

розділів відмічаються над Києвом та поблизу Кишиніва відповідно. До кінця доби полярна система оклюдується і зміщується за межі країни, а арктичний фронт з хвилями спричиняє погіршення погодних умов над Україною.

До нічних і ранкових строків 22 липня, коли відмічався пік негоди по окремих станціях країни, у приземному баричному полі холодний фронт арктичного розділу впливав на південні регіони, а теплий – на центральні та східні. Від строку 06 год. і далі вдень арктичний фронтальний розділ відтіснився на Чорне море внаслідок поширення на схід масштабного антициклону з центром над північчю Британії (максимум тиску 1025 гпа). У тропосфері територія України перебувала в області висотної термобаричної улоговини.

4.2 Термодинамічні параметри атмосферних фронтів

Як відомо, температурний контраст, тобто горизонтальний градієнт температури, є найважливішою характеристикою фронту. На основних фронтах контрасти по горизонталі особливо великі, на фронтах оклюзії значно менші, а на низьких приземних фронтах контрасти температури часто зовсім відсутні. Положення фронту аналізують за характеристиками поля вітру - при тривалому існуванні улоговини конвергенція потоків вітру ($div < 0$) в пограничному шарі атмосфери призводить до утворення на осі улоговини приземного фронту. У баричному полі, що створює дивергенцію потоків, фронт не може сформуватися.

В деяких досліджуваних випадках тип фронту та його положення визначити важко через складну структуру хмарності та активний розвиток конвекції. З цією метою проаналізовано знімки хмарності в інфрачервоному діапазоні (IR) з нанесенням ряду характеристик: системи ізоліній фронтального параметра - Thermal Front Parameter (TFP), при цьому максимальні значення в полі TFP (Blue Line) вказують на розташування лінії атмосферного фронту;

адвекції температури - Temperature Advection та дивергенції швидкості – Divergence (Convergence - Red Lines), на різних рівнях – рис.4.7-4.10, 4.12.

6-8 травня 2020 р. положення фронтів над Україною задовільно проявляються у полі параметру TFP – рис.4.7.

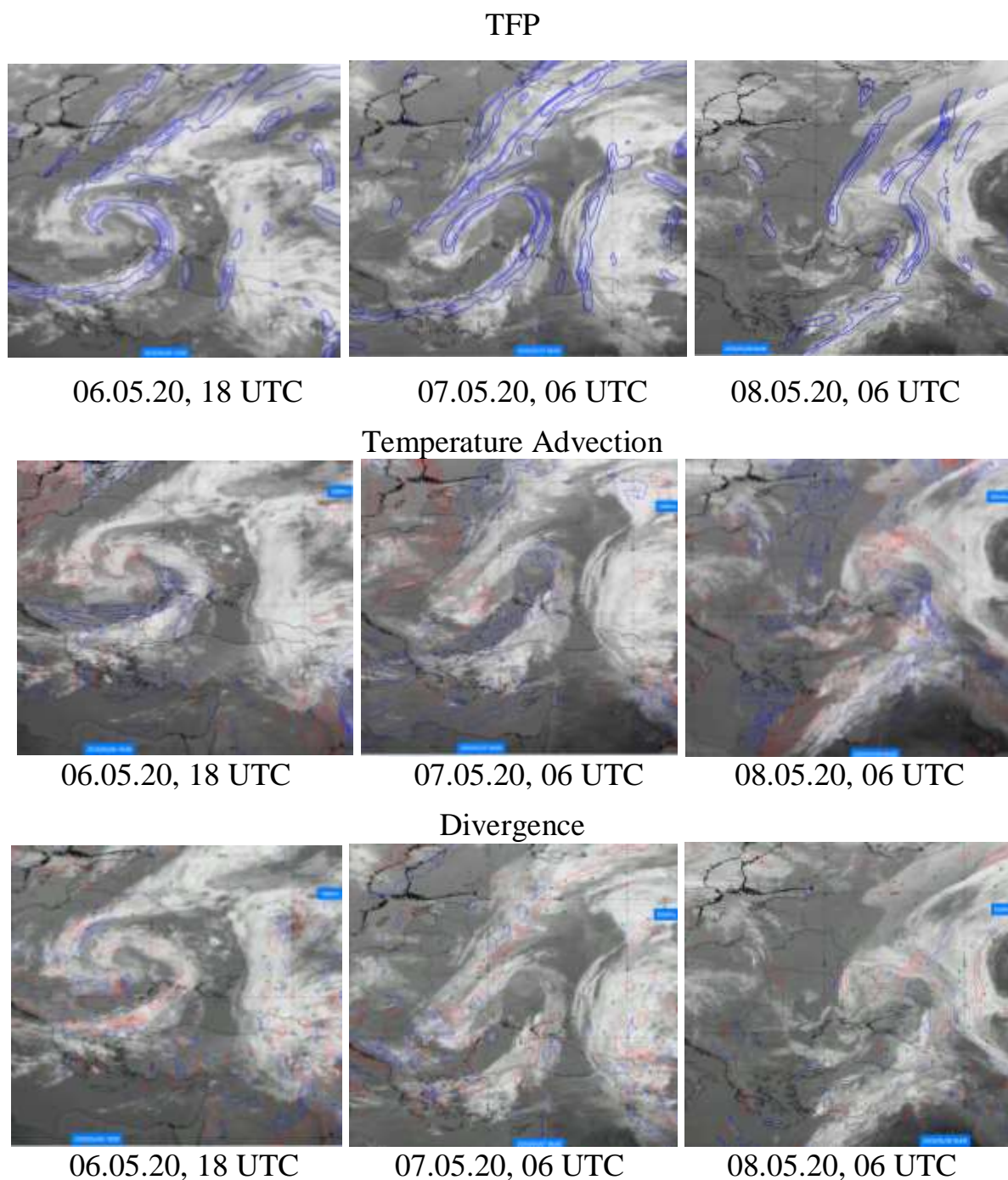


Рисунок 4.7 - Знімки хмарності (IR) з розподілом термічного фронтального параметру, адвекції температури та дивергенції 06-08.05.2020 р.

Адвекція температури на рівні АТ-850 виділяє осередки тепла на теплому фронті та біля точки оклюзії до 4°C ; осередки холоду найбільш на ХФ наприкінці доби 6 травня - над західною акваторією Чорного моря до -6°C . Слід зазначити, що при формуванні висотного циклону, адвективні показники зростали з висотою. Так, вище рівня 500 гПа 6 травня адвекція тепла охоплювала більшу частину України і складала до 14°C . Найбільша адвекція холоду спостерігалася на карті АТ-500 над південним заходом країни за ХФ – до -8°C .

На ранок 7 травня зберігаються градієнти у полі температури у середній та верхній тропосфері: на рівні 500 гПа адвекція тепла на ФО та адвекція холоду за ХФ відповідно $\pm 6^{\circ}\text{C}$. З висотою також зростає адвекція холоду у тилу циклону до -8°C на рівні 300 гПа. На 06 год. 8 травня адвекція температури у середній тропосфері слабка, а з висотою при заповненні циклону переважна частина України знаходиться в холодній повітряній масі, за винятком крайнього північного сходу, що підпадає під вплив ТФ та ФО при адвекції тепла.

Розподіл дивергенції швидкості на різних рівнях тропосфери є неоднорідним, що узгоджується з чергуванням зон з висхідними та низхідними вертикальними рухами при розривах хмарності на смугах фронтів. Так, посилена конвергенція потоків відмічалася на смузі ХФ за даними АТ-700 на 18 год 6 травня, зберігалася 7 числа протягом доби на ТФ та ФО, а вже на 8 травня вирізнялися лише окремі осередки конвергенції швидкості на різних рівнях тропосфери при поступовій дисипації хмарності.

В результаті, фронтальні розділи 6-8 травня характеризувалися значними температурними контрастами та висхідними потоками.

За період 28-31 травня поле параметру TFP задовільно виділяє положення фронтальних розділів лише в останні дні періоду - 30 та 31 травня, що може пояснюватися існуванням висотного потужного циклону і регенерації циклону біля поверхні землі - (рис.4.8).

28-29 травня переважає адвекція тепла практично у всій товщі тропосфери над Україною (до $6-8^{\circ}$ на різних рівнях), а 30 травня поширюється адвекція

холоду з південного сходу за ХФ – до $-8\dots-6^{\circ}\text{C}$ на рівні 850 гПа. На 00 год. 31 травня на погодні умови західних регіонів впливає ФО при найбільшій адвекції тепла до 10°C на карті АТ-850.

Розподіл дивергенції швидкості демонструє конвергентні області за картою АТ-850 гПа 28-29 травня на півночі та сході країни, а 30-31 числа – окремі осередки у полі найбільш потужної хмарності.

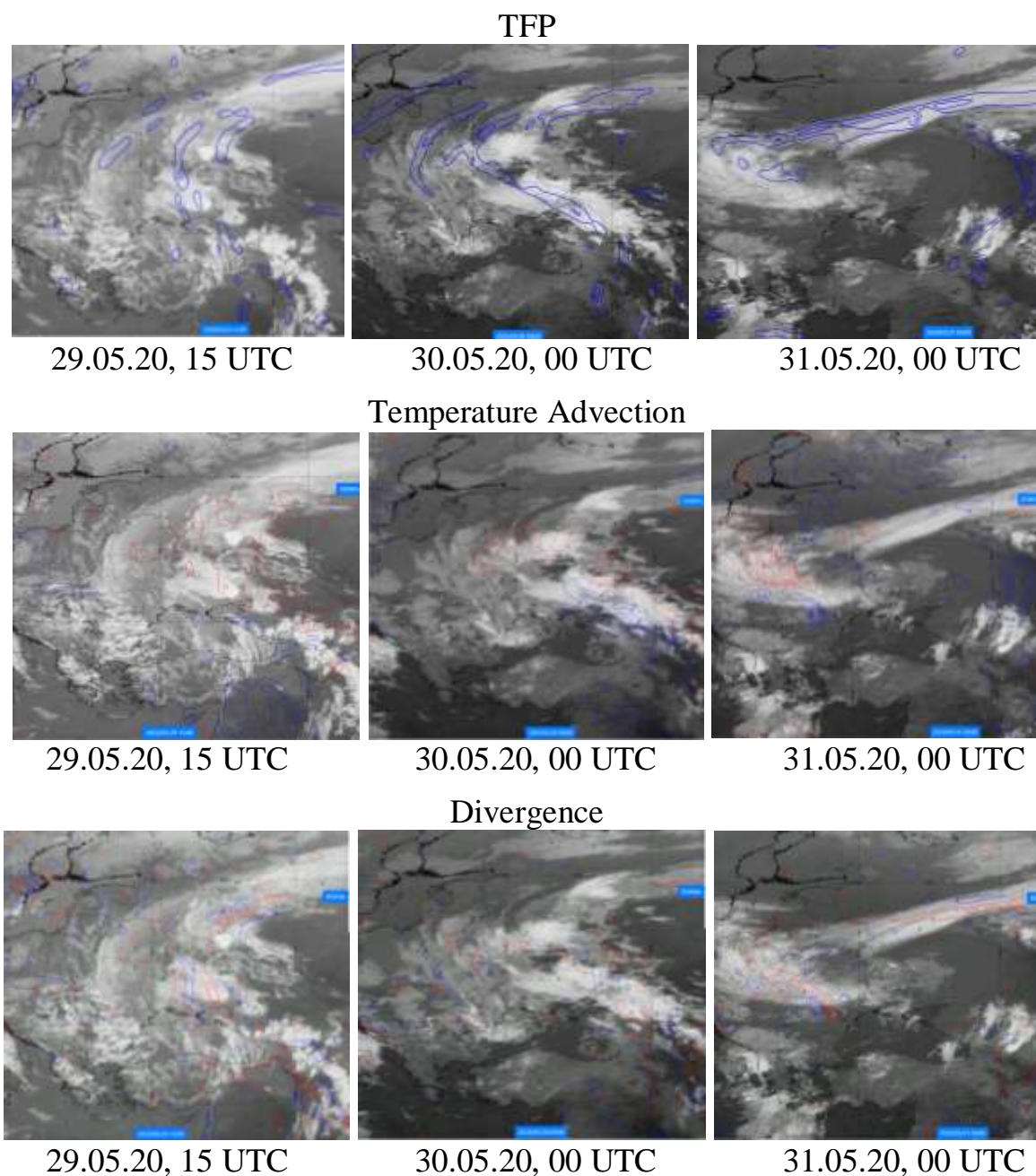


Рисунок 4.8 - Знімки хмарності (IR) з розподілом термічного фронтального параметру, адвекції температури та дивергенції 29-31.05.2020 р.

Показники фронтального термічного параметру TFP найбільш чітко виділяють проходження ділянок холодних фронтів 13-14 липня 2020 р. при формування висотного центру циклону та його оклюдуванні - рис.4.9.

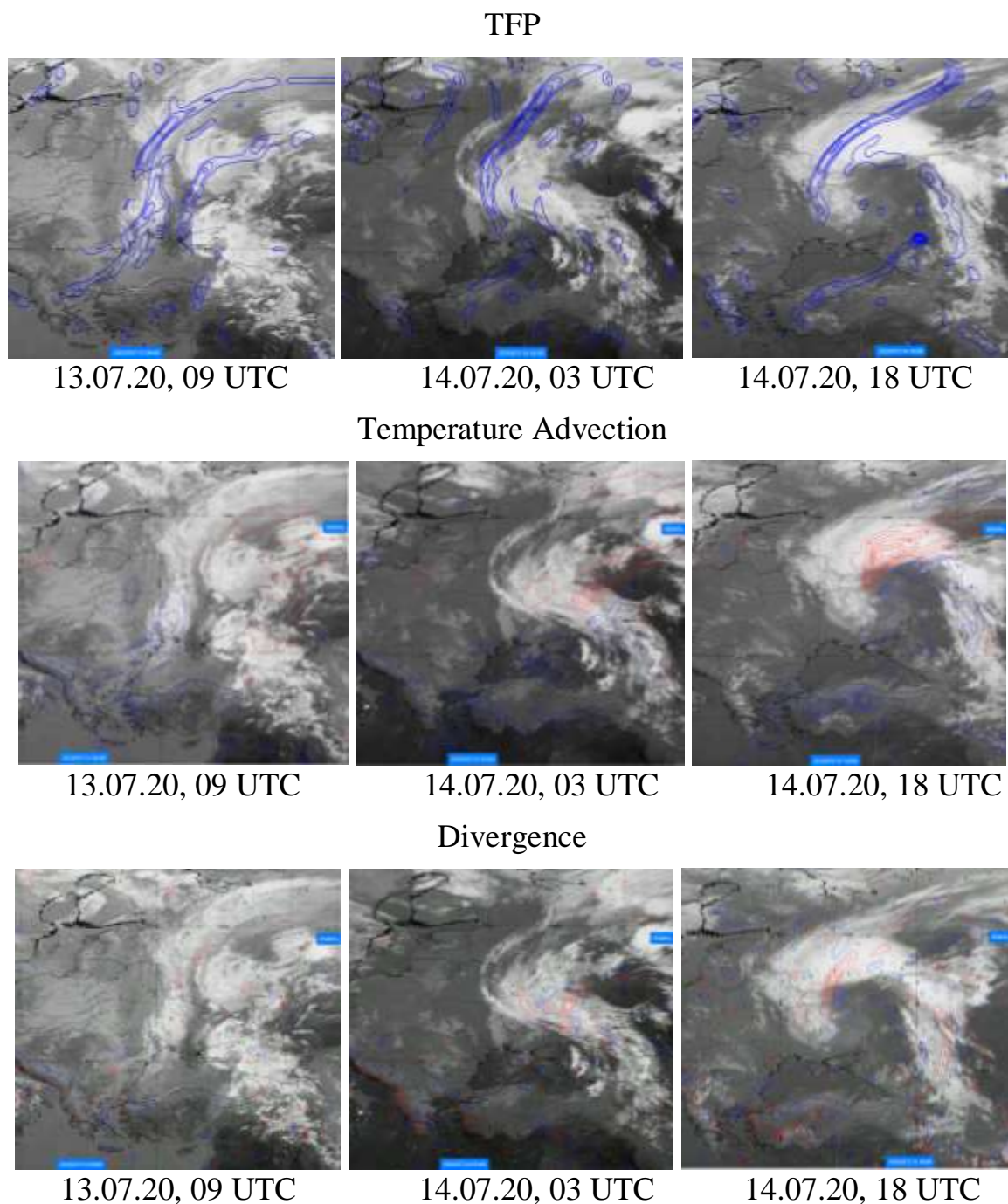


Рисунок 4.9 - Знімки хмарності (IR) з розподілом термічного фронтального параметру, адвекції температури та дивергенції 13-14.07.2020 р.

13 липня проходження ХФ через Україну вирізняється посиленою адвекцією холоду на рівні 850 гПа до -6°C , а наступної доби у системі ТФ та ФО формується область інтенсивної адвекції тепла до 8°C .

Конвергентні потоки 13 липня задовільно проявляються від рівня 700 гПа на ХФ. 14 липня на час формування стихійних злив на Харківщині інтенсивна конвергенція відзначається у шарі 850-700 гПа саме над сходом країни.

Більш складним є аналіз положення атмосферних фронтів 21-22 липня 2021 р., коли біля поверхні землі переважало малоградієнтне поле, й у тропосфері також була відсутня замкнена циркуляція над Україною.

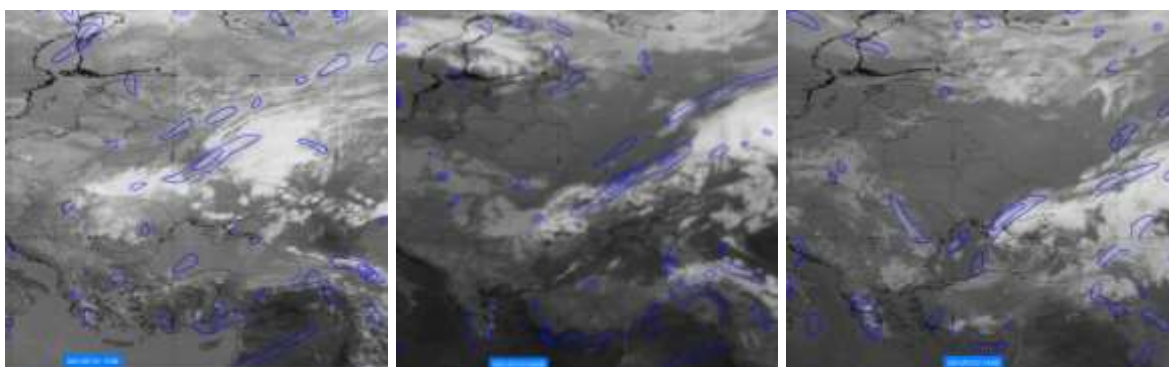
Синоптичний аналіз виділяє атмосферні fronti біля поверхні землі, що узгодиться з полями хмарності, проте показники фронтального термічного параметру TFP вказують на положення холодного фронту широтної орієнтації над Україною недосить чітко, особливо 21 липня – рис.4.10.

Адвективні зміни температури повітря 21 липня у нижній та середній тропосфері також невиразні. На рівні 925 гПа слабка адвекція тепла - на заході у масиві хмарності, на 850 – слабка адвекція холоду на півночі країни. Але у верхній тропосфері за даними АТ-300 на кінець доби 21 та початок 22 липня простежується фронтальна поверхня над Румунією з поступовим зміщенням до півдня України. Вирізняються два потужні осередки: адвекція холоду до -14°C над Румунією і Молдовою та адвекція тепла над півднем України та АР Крим до 12°C . До кінця доби 22 липня, при виникненні стихійних злив на південному сході країни, величина адвективних змін температури зберігається – у нижніх шарах слабка адвекція, а на рівні 300 гПа виразні контрасти зростання та падіння температури з обох боків фронту.

Таким чином, попередньо можна зробити висновок про існування верхнього фронту.

Показники дивергенції швидкості 21-22 липня ілюструють окремі осередки конвергентних потоків на різних рівнях, при цьому інтенсивні висхідні рухи не виділяються.

TFP

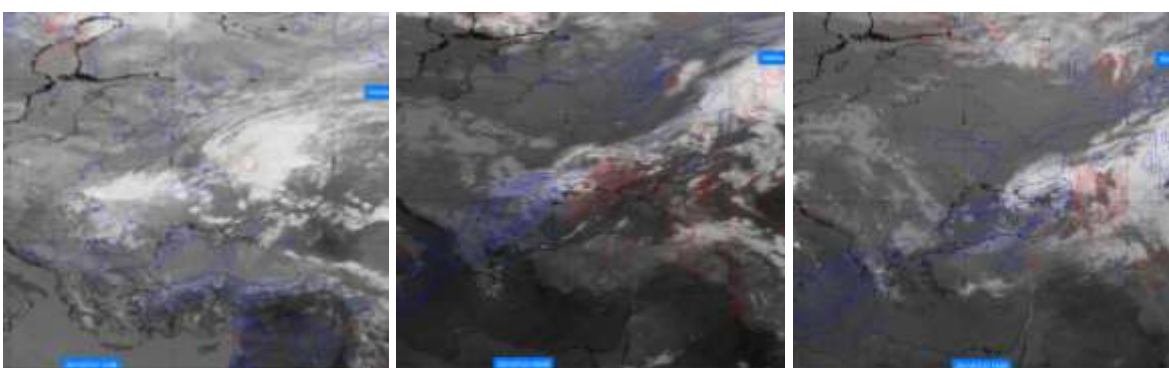


21.07.21, 12 UTC

22.07.21, 00 UTC

22.07.21, 18 UTC

Temperature Advection

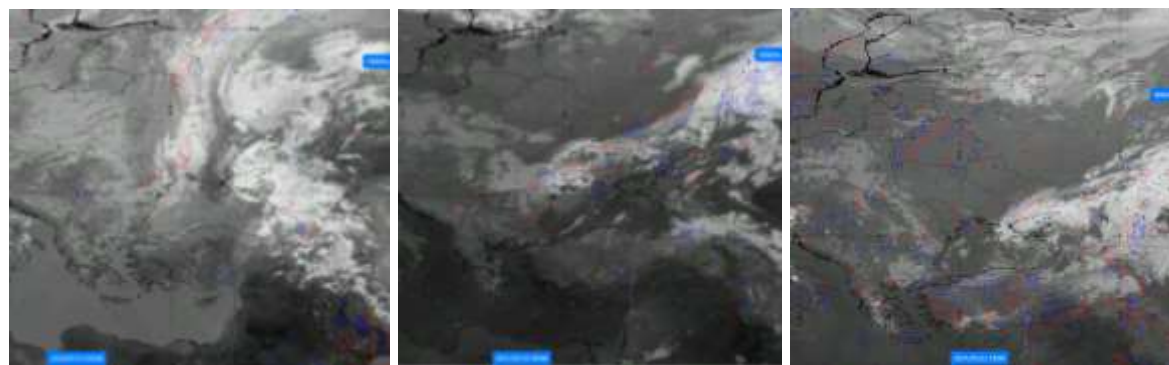


21.07.21, 09 UTC

22.07.21, 00 UTC

22.07.21, 18 UTC

Divergence



21.07.21, 09 UTC

22.07.21, 00 UTC

22.07.21, 18 UTC

Рисунок 4.10 - Знімки хмарності (IR) з розподілом термічного фронтального параметру, адвекції температури та дивергенції 21-22.07.2021 р.

Вирішальним при формування надзвичайних опадів 22 липні стала потужна конвекція на окремих ділянках ХФ. Для аналізу залучено деякі індекси нестійкості та дані радару - рис.4.11.

Розглянуто індекс нестійкості CAPE (Convective Available Potential Energy), це потенціальна енергія конвективної нестійкості, пов'язана з вертикальною швидкістю висхідних потоків. Більш високі значення енергії нестійкості вказують на інтенсивнішу конвекцію в хмарі, тобто на більш небезпечні погодні явища. Також проаналізовано індекс нестійкості Showalter Index (ΔT) - це різниця між фактичною температурою повітря 500 гПа (T_{500}) і температурою, якої набуває частка повітря, якщо вона сухоадіабатично підіймається з рівня 850 гПа до рівня конденсації, а потім вологоадіабатично до рівня 500 гПа (T_{a500}). Інші індекси нестійкості не показали значущих відміток.

У випадках розмитих баричних полів біля поверхні землі особливо важлива радіолокаційна інформація. Так, за даними Radar Europe у строк 00 год., на момент реєстрації стихійної зливи в Одесі, розвиток хмарності сягав по вертикалі 12-13 км, тобто сформувалася потужна хмарність до рівня тропопаузи і вище. Існує критичне значення показника $H_{\max} \geq 13$ км, яке виступає одним з параметрів розпізнавання зон активної конвекції (ЗАК).

Денні зливи рівня СМЯ III на півдні Запорізької області у масиві мультикоміркової хмарності узгодяться з розподілом індексів CAPE (значущі показники до 600) та Showalter Index (від'ємні відмітки).

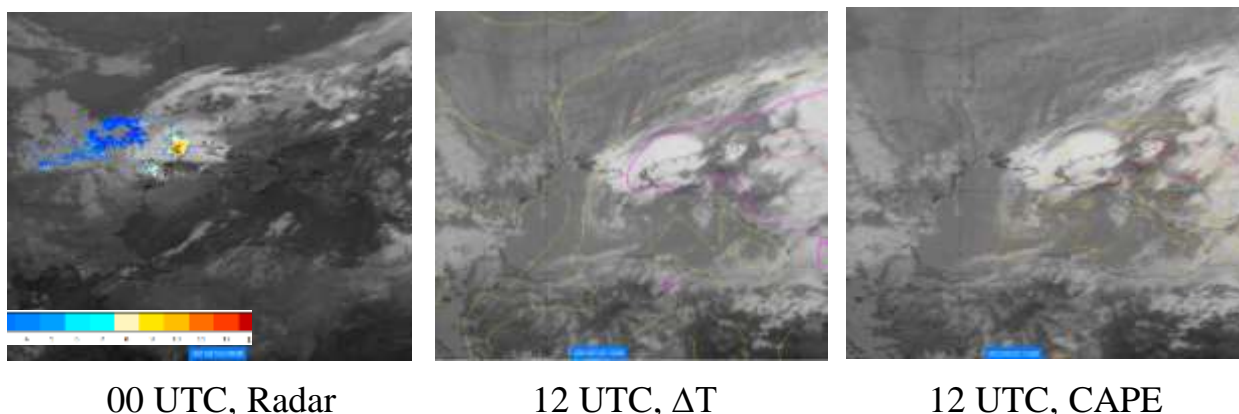


Рисунок 4.11 - Знімки хмарності (IR) з нанесенням H_{\max} , індексів нестійкості CAPE та Showalter Index (ΔT) 22.07.2021 р.

Утворення південного циклону 26-27 січня 2021 р. на хвилі фронту задовільно проявляється у полі фронтального параметру TFP – рис.4.12. Особливо чітко визначається ТФ у системі розшарованої хмарності значної ширини за типом «шапки».

Адвективні зміни та дивергенцію проаналізуємо в нижній тропосфері, оскільки південні циклони мають, як правило, слабкий розвиток по вертикалі.

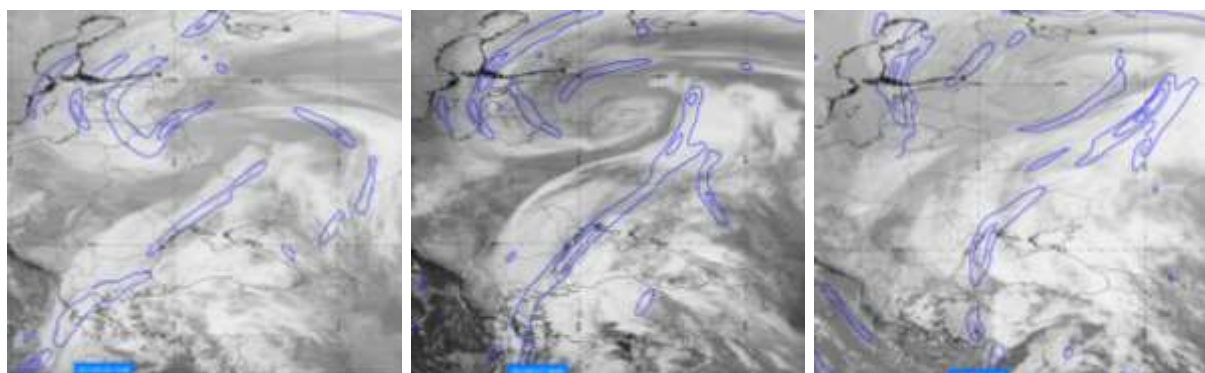
26 січня східні регіони охоплені адвекцією тепла на рівні 850 гПа, інша територія - адвекцією холоду при формуванні хвильового та молодого циклону. До кінця доби при виділенні теплого сектора циклону, в ньому зростає адвекція тепла до 4°C, також посилюється адвекція холоду на ХФ до -8°C над Туреччиною.

До 00 год. 27 січня адвекція тепла за ТФ зростає до 10°C на тому ж рівні 850 гПа та поширюється у середню тропосферу до 500 гПа (4°C). На строк 6 год. відбувається зростання градієнтів температури у циклонічній системі – адвекція тепла на ТФ поширюється з південного заходу на південний схід по території України і сягає 12°C, а адвекція холоду на ХФ охоплює крайнє південне узбережжя Чорного моря – до -14°C. До 12 год. 27 числа зберігається положення осередку адвекції тепла з відмітками до 14°C, що узгодиться з хмарною смугою ТФ. Адвекція холоду у тилу циклону при його незначному зміщенні на схід охоплює Балкани, південь Чорного моря та переважну частину Туреччини.

Таким чином, адвективні зміни температури повітря чітко ілюструють, що стихійні снігопади за цей період сформувалися на теплих ділянках фронтів.

Конвергенція повітряних потоків є найбільш інтенсивною 26 січня у нижніх шарах (925 гПа) протягом доби при виділенні інтенсивного осередку поблизу Босфору. Від початку доби 27 січня видовжена зона конвергенції у шарі 925-700 гПа, що відповідає положенню ТФ, орієнтована через Одещину на Харківщину. З 12 год. до кінця доби зони висхідних рухів у фронтальних смугах ще зберігаються, проте слабшають у зв'язку з початком заповнення циклона на ранок 28 січня.

TFP

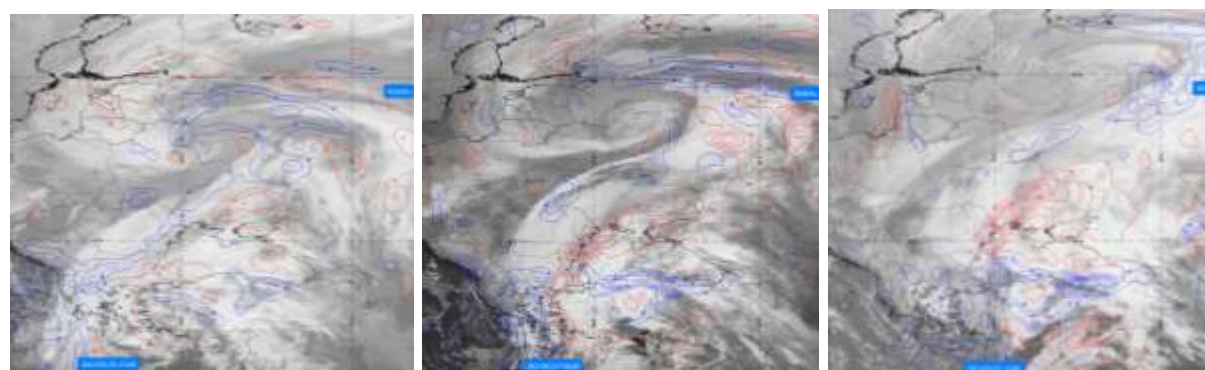


26.01.21, 15 UTC

27.01.21, 00 UTC

27.01.21, 12 UTC

Temperature Advection

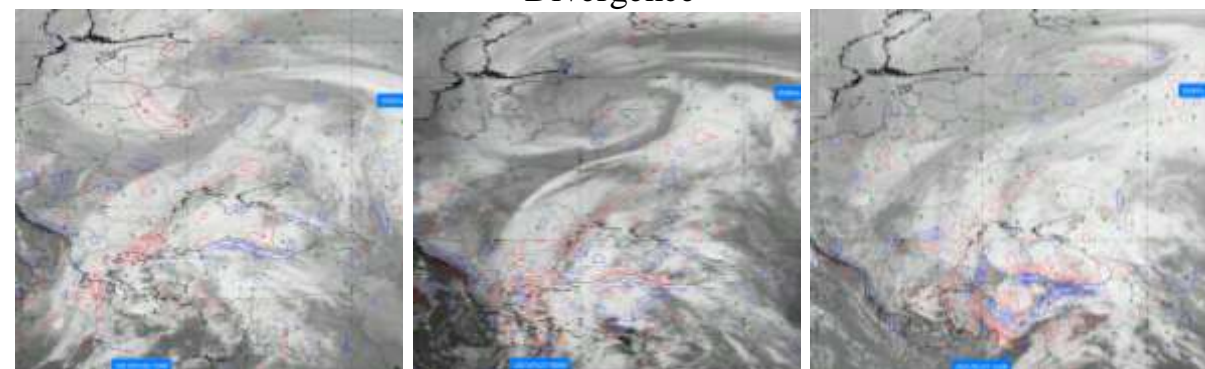


26.01.21, 15 UTC

27.01.21, 00 UTC

27.01.21, 12 UTC

Divergence



26.01.21, 15 UTC

27.01.21, 00 UTC

27.01.21, 12 UTC

Рисунок 4.12 - Знімки хмарності (IR) з розподілом термічного фронтального параметру, адвекції температури та дивергенції 26-27.01.2021 р.

4.3 Аналіз хмарності фронтальних розділів

Важливим етапом роботи є детальний аналіз хмарних систем, з якими були пов'язані небезпечні явища погоди у досліджуваних випадках. У якості вихідних даних виступили архіви супутникової інформації [18-19].

Кожна хмарна система є неповторною за своїми характеристиками, і цінність супутникової інформації полягає в тому, що тільки вона надає чітке уявлення про розміри, форму, структуру та інші особливості цієї системи.

Особливе значення супутникова інформація має в тепле півріччя, коли над континентом переважають малоградієнтні поля тиску та температури. За таких умов значна хмарність виникає переважно в області фронтальних хвиль, в яких існують умови для розвитку конвективних небезпечних явищ – значних злив, граду, грози, шквалів.

Як показав вищевикладений аналіз циркуляційних умов формування небезпечних явищ погоди, здебільшого це були холодні фронти (4 з 5 випадків). Динаміка атмосферних процесів на холодних фронтах, як правило, виражена більш активно, ніж на теплих. Це обумовлено тим, що адвекція холодного повітря в області фронту і за ним є причиною значного зростання градієнтів температури, створення умов для виникнення та поглиблення улоговин як біля поверхні землі так і в усьому шарі тропосфери. При цьому, фронтальні купчасто-дощові хмари звичайно являють собою не ізольовані хмари, а гряди, зосереджені уздовж лінії фронту, які часто є більш потужними, ніж внутрішньомасові.

Перший період дослідження - 05-09.05.2020 р. До аналізу залучалися знімки хмарності у видимому діапазоні (VIS) та композитні знімки RGB задля деталізації характеристик хмарності - рис.4.13-4.21.

Від 5 до 8 травня чітко прослідковується формування хмарності циклону від логарифмічної форми стадії молодого циклону 5 числа до розвиненого

циклону 6 числа, поступового оклюдування на кінець доби 6 травня та дисипації 7-8 травня.

5 травня над територією України сформувалася конвективна хмарність у денні строки з активним розвитком до 18 год. у вигляді скупчень та кластерів Сб лінійної структури у системі полярного фронту, а арктична фронтальна система наблизилася до західних та центральних регіонів країни. Смуга цього розділу ще має проясніти та розмиті межі, але кривизна ХФ чітко виражена.

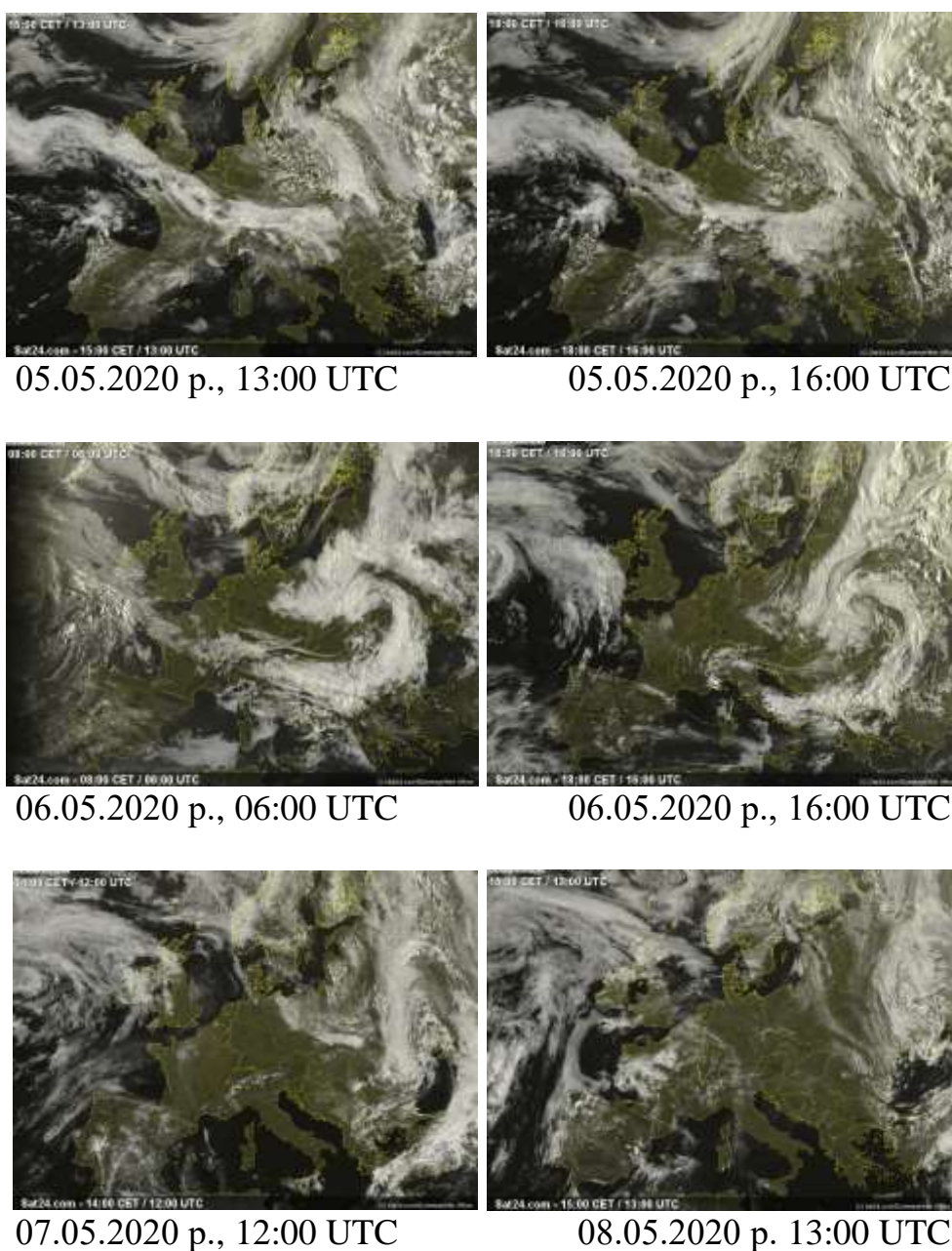


Рисунок 4.13 – Супутникові знімки хмарності Meteosat MSG VIS

6 травня виділяється хмарна спіраль розвиненого циклону, складність структури циклону полягає в розміщенні хмарної смуги теплового фронту зі значною антициклонічною кривизною у вигляді дуги. Протягом доби фронтальна хмарність ущільнюється, має яскраво-білі тони при високому альбедо купчастих потужних та купчасто-дощових хмар, які зображуються вкрапленнями зернистої текстури у суцільні хмарні смуги.

Формування висотного циклону 7 травня проявляється у полі хмарності залишковою потужною купчасто-дощовою хмарністю з просвітами здебільшого осередкової структури вздовж фронтальних розділів, зберігається смугова структура холодного фронту меридіональної протяжності від Туреччини через схід України. Також над центром країни формується ділянка потужної хмарності вторинного холодного фронту, особливого розвитку набуває купчасто-дощова хмарність у після полуденні години.

До 8 числа циклон оклюдований, переходить у стадію дисипації - вихрова хмарна система ізольована від фронтальної хмарності, при цьому спіралі чітко відділяються проміжками з проясненням. Значна хмарність зберігається в області оклюдування. Хмарна система займає Лівобережжя, складається здебільшого з конвективних осередків потужних хмар яскравого відтінку.

Потужність хмарності фронтальних розділів та особливості структури демонструють комбіновані (комполітні) знімки RGB В цьому випадку розглянуто комбіновані знімки «Мікрофізика 24 години» (24h Microphysics RGB) – рис.4.14.

Такі знімки дозволяють проводити цілодобовий аналіз хмар за відмінністю крижаних від водяних хмар та виявлення тонких перистих хмар. Виділяють задовільний колірний контраст між тонкими і щільними хмарами середнього рівня та між тонкими і щільними крижаними хмарами. Високі щільні крижані хмари мають червоний до багряного колір. Як показують супутникові знімки 5-8 травня, фронтальні смуги склалися саме з такої потужної хмарності значного вертикального розвитку зі зледенілими вершинами.

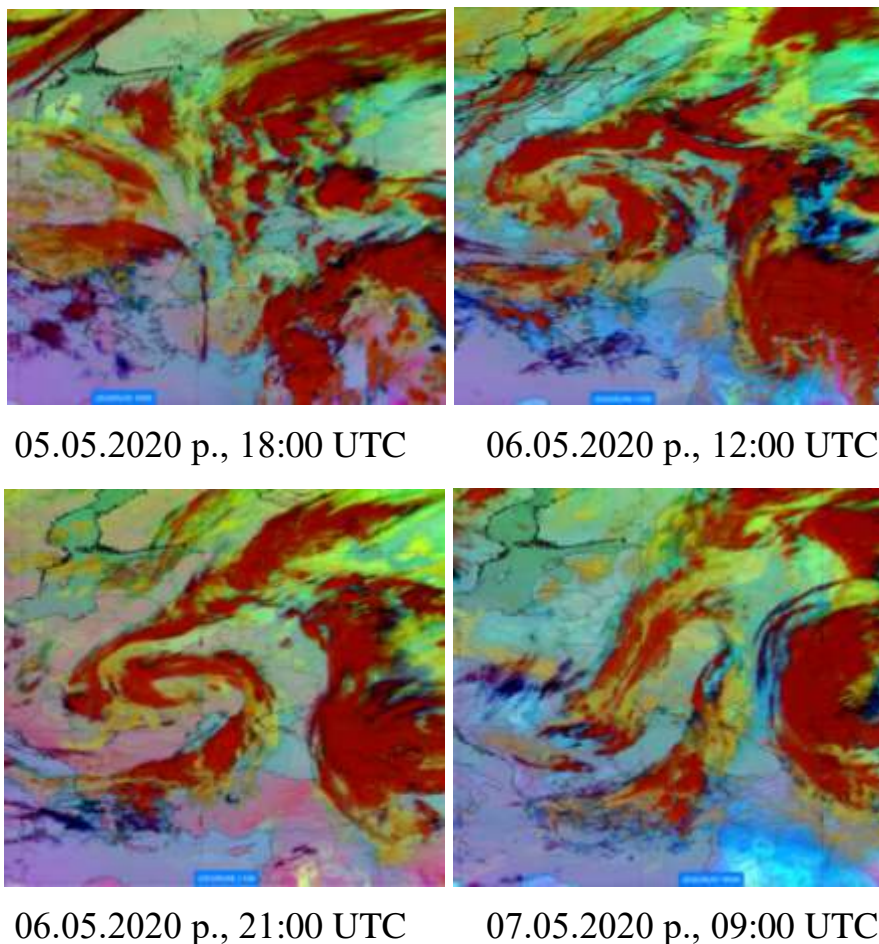


Рисунок 4.14 – Супутникові знімки хмарності MSG 24h Microphysics RGB

Розглянемо структурні особливості хмарності висотного циклону над територією України наприкінці травня 2020 р. (рис.4.15).

Видимий діапазон зображень вказує на формування потужної вихрової системи саме над територією України. Від 28 травня над простором країни переважає зерниста текстура потужної конвективної хмарності за типом скупчень та кластерів $Cu\ congesta$ та Cb хмар. Тон зображення цих хмар яскраво-білий, структура щільна з високим альбедо. Скупчення конвергують у лінійній структурі до деякого центру, який приймається за центральну частину висотного циклону. Смуга щільної хмарності, чітко виражена за знімками МШСЗ, відповідає теплому фронту.

На ранкові строки 29 числа хмарна система висотного циклону набуває характерних ознак фронтального циклону – досить щільна смуга ТФ білого

відтинку, спрямована на північний схід, межі розірвані з покриттям перистих тонких хмар волокнистої текстури. До 13 год. розвивається конвективна нестійкість та осередки купчастих та купчасто-подібних хмар, особливо щільні на південному сході країни. Вже на 16 год. біля точки оклюзії полярного фронту на сході України формується суперкомірка з чітким ядром правильної форми, яскраво-білого тону.



28.05.2020 р., 13:00 UTC



29.05.2020 р., 10:00 UTC



29.05.2020 р., 16:00 UTC



30.05.2020 р., 07:00 UTC



30.05.2020 р., 16:00 UTC



31.05.2020 р., 13:00 UTC

Рисунок 4.15 – Супутникові знімки хмарності Meteosat MSG VIS

До 18 год. 29 травня суперкоміркова хмара ще зростає у розмірах і зміщується на північний схід країни, а до 21 год. охоплює лише Сумщину.

Наступної доби при регенерації вихору біля поверхні землі та виділенні на ранок приземного центру, в полі хмарності спостерігаються смуги теплого та холодного фронту. Найбільша яскравість та потужність хмар відповідно біля вершини фронтального розділу, самі смуги досить нечіткі, межі розірвані, переважає волокниста текстура. З 13 год. відмічається наростання потужності хмарної системи, фронтальні смуги утворені щільною хмарністю яскраво-білого тону. Зазначимо, що у полі хмарності арктичну та полярну фронтальні систему відділити неможливо, це суцільний масив. До 16 год. над Україною переважає потужна конвективна хмарність як у фронтальній смузі, так і в області оклюдування, що виражена скупченнями С_b хмар.

На 31 число хмарний масив над Україною має складну структуру неправильної форми, що можна визначити як «загнутий» фронт оклюзії, - хмарна смуга такого ФО довга і широка; коли переміщення фронту припиняється, весь фронт або його окремі ділянки починають зворотній рух, причиною цього є входження тропосферної СТ струминної течії при адвекції холоду.

Деталізація потужності кластерів та суперкоміррки у фронтальній системі відмічається за комбінованими знімками «Денна мікрофізика» (Day Microphysics RGB) – рис.4.16.

Дуже важливе значення даного RGB у тому, що за ним можна простежити динаміку утворення особливо небезпечної конвективної хмарності, спостерігати фази та процеси розвитку конвекції (тобто початок зледеніння на вершинах хмар, еволюцію розміру часток і дисипацію з переважно великими кристалами льоду). Конвективні хмари вже на дуже ранній стадії розвитку зображуються у рожевому тоні, стаючи усе більш помаранчевими при розвитку. Перше зледеніння може бути виявлене за невеликими областями бузкового кольору, що стають усе темнішими в міру збільшення розмірів крижаних часток. Так, за знімками, найбільш потужна конвекція спостерігалася 29 травня на сході.

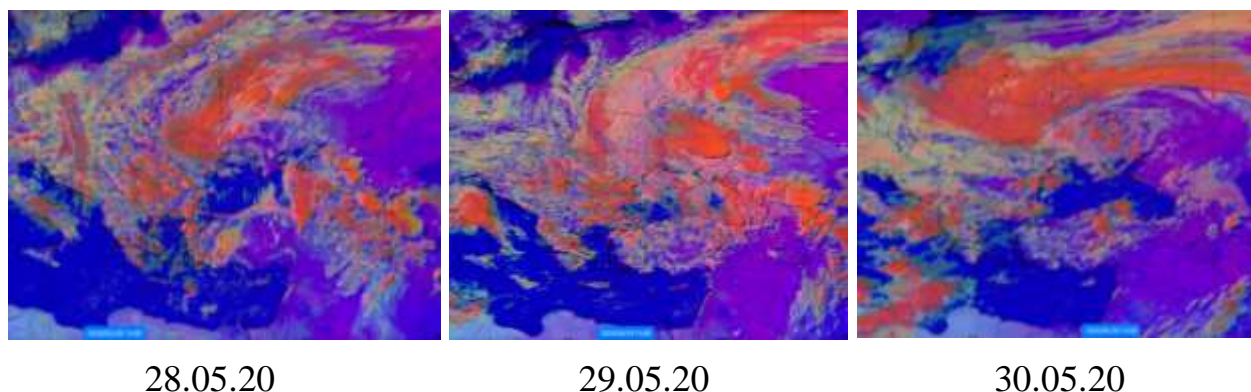


Рисунок 4.16 – Супутникові знімки хмарності MSG Day Microphysics RGB, 28-30.05.2020 р., 15:00 UTC

Надалі проаналізуємо хмарні системи 13-14.07.2020 р. – рис.4.17-4.18. Період характеризувався проходженням двох паралельних ділянок фронтів меридіональної орієнтації через територію України.

Видимий діапазон виділяє досить щільну, без просвітів смугу хмарності невираженої кривизни з розмитими межами у ранкові строки 13 липня. Структуру хмарності можна ідентифікувати як стаціонарний фронт, в даному випадку, активний. Для активних квазістаціонарних фронтів характерна широка хмарна смуга, всередині якої часто розвиваються хвильові збурення і виникає конвективна хмарність. Саме такий розвиток процесу простежується до 16 год. – у передфронтальній області смуги розвивається багатокміркова хмарність та окремі суперкомірки. Багатокміркові (мультикоміркові) Св хмари складаються одночасно з кількох осередків, кожен з яких у фіксований момент часу знаходиться на різній стадії розвитку. Причиною їхнього утворення є великомасштабна конвергенція в зоні атмосферних фронтів. Таким чином, найбільш потужна зона конвекції охоплює східні регіони країни.

На 14 липня у нічні та ранкові строки потужність циклонічної хмарності на сході країни ще зберігається, формується вихрова структура зі щільного масиву з розірваними межами. Вдень знову посилюється конвекція, проте основний небезпечний масив суперкомірки зміщується на північний схід за межі України.



13.07.2020 р., 07:00 UTC



13.07.2020 р., 16:00 UTC



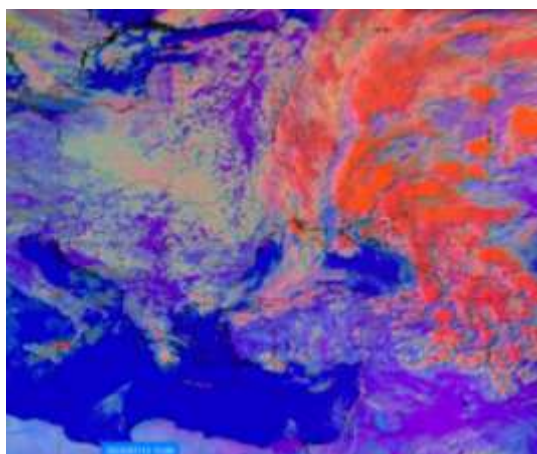
14.07.2020 р., 07:00 UTC



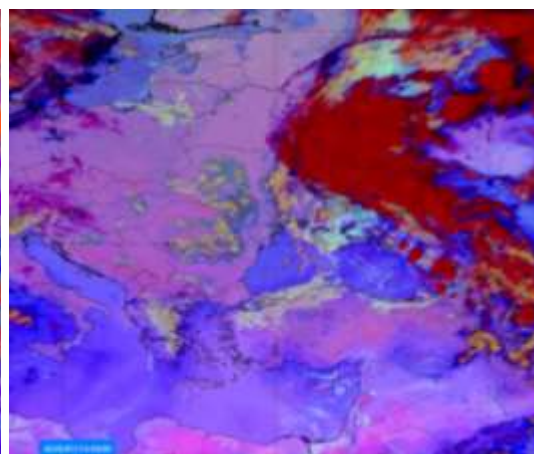
14.07.2020 р., 16:00 UTC

Рисунок 4.17 – Супутникові знімки хмарності Meteosat MSG VIS

Періоди найбільшої інтенсивності опадів на Лівобережжі відображаються на композитних знімках RGB вдень 13 липня та вночі 14 липня – рис.4.18.



13.07.20, 15:00 UTC Day Microphysics



14.07.20, 00:00 UTC Night Microphysics

Рисунок 4.18 – Супутникові знімки хмарності MSG RGB

13 липня супутниковий знімок RGB Day Microphysics виділяє потужну вихрову структуру циклону з лініями конвергенції на території України, потужність багатокоміркової та суперкоміркової хмарності простежується за яскраво-помаранчевими тонами.

За 14 число наведено знімок RGB «Нічна мікрофізика» (Night Microphysics), цей композит дозволяє відрізнити холодні вершини зледенілих, розвинених по вертикалі Сб хмар з дрібними кристалами льоду у жовтих тонах, а вершини з великими кристалами – у червоних (багряних). В особливо потужних купчастих хмарах дрібні кристали льоду можуть переноситися сильними висхідними течіями до вершини хмари, утворюючи куполи (Overshooting Tops), їх чітко видно на фоні навколишнього ковадла. Потужний масив хмарності виділяється у багряних тонах на півночі, північному сході та сході країни.

Наступний випадок припадає на зимовий період при формуванні південного циклону над Адріатикою та зміщенні його на територію України - 26-27.01.2021 р.

До аналізу залучалися супутникові знімки хмарності RGB та Enhanced IR, оскільки на знімках у видимому діапазоні світлий тон, що не відрізняється від хмар, має підстильна поверхня, вкрита снігом. Відомо, що альbedo снігу варіюється в значних межах залежно від водності шару, рихлості і т.п., проте при дешифруванні хмарності, коли підстильна поверхня покрита снігом та льодом виникають значні труднощі. На світлому засніженому фоні значно складніше розпізнавати хмарність, особливо з матовою текстурою і білим тоном. В основному хмарність над засніженою поверхнею не має такого вигляду, як над темним фоном поверхні без снігу, тому при існуванні снігового покриву в оперативних підрозділах гідрометеорологічної служби основним видом супутникової інформації є ПЧ-знімки.

Задля чіткого уявлення про потужність хмарної системи південного циклону та типи повітряних мас проаналізуємо вид композитних знімків

«Повітряні маси. Температура» (RGB Airmass) – рис.4.19. Цей вид зображень використовується для розрізнення полярних від тропічних повітряних мас та виявлення триваючого циклогенезу. Білими відтінками зображується щільні хмари значного вертикального розвитку.

Від початку зародження циклону на хвилі арктичного фронтального розділу у нічні строки 26 січня до оклюдування на кінець доби 27 числа, хмарний масив циклону виділявся неоднорідною структурою.

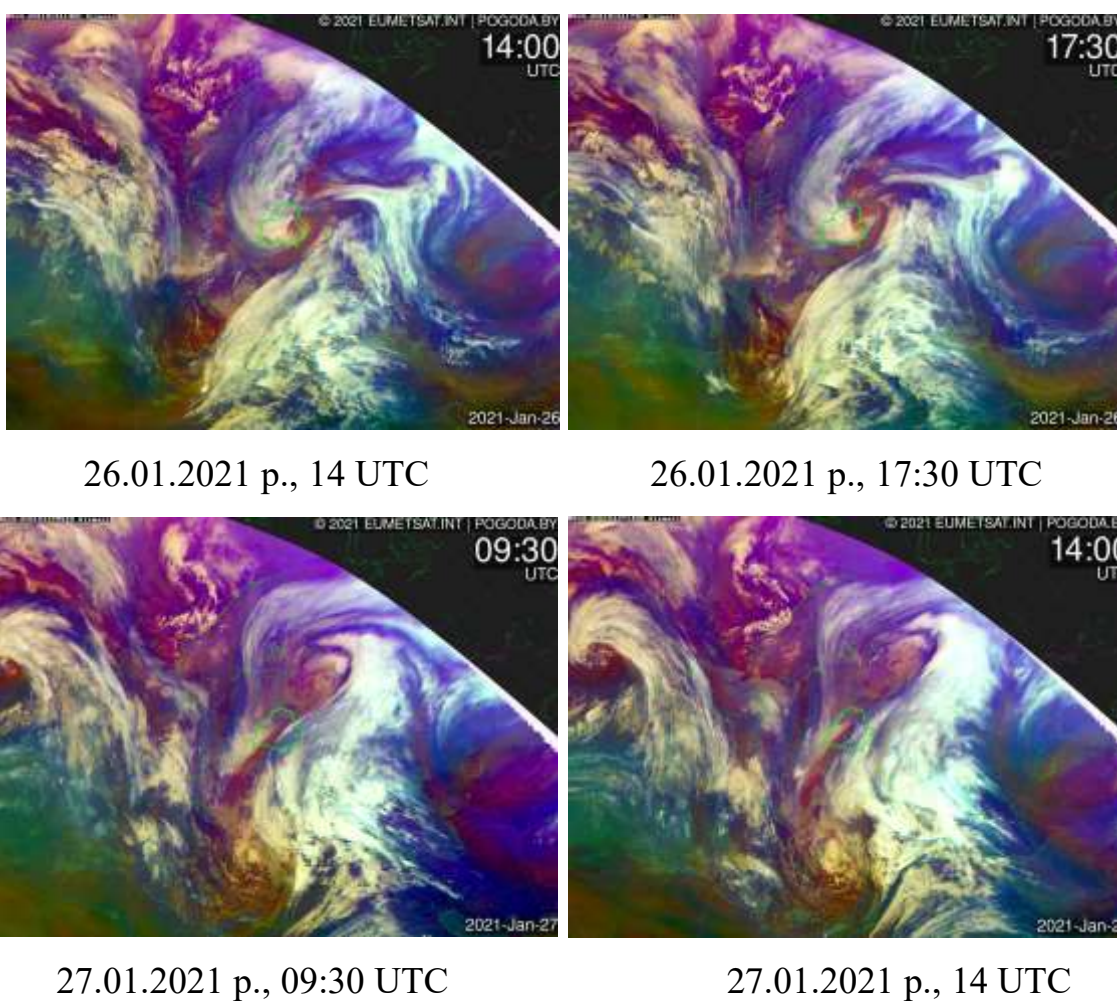


Рисунок 4.19 – Супутникові знімки хмарності MSG-4 RGB Airmass

Характерною хмарністю молодого циклону 26 січня є масив світлого тону з виметами перистої хмарності в напрямку потоків верхньої тропосфери. Виразну антициклонічну кривизну має смуга ТФ, при цьому ділянки теплих

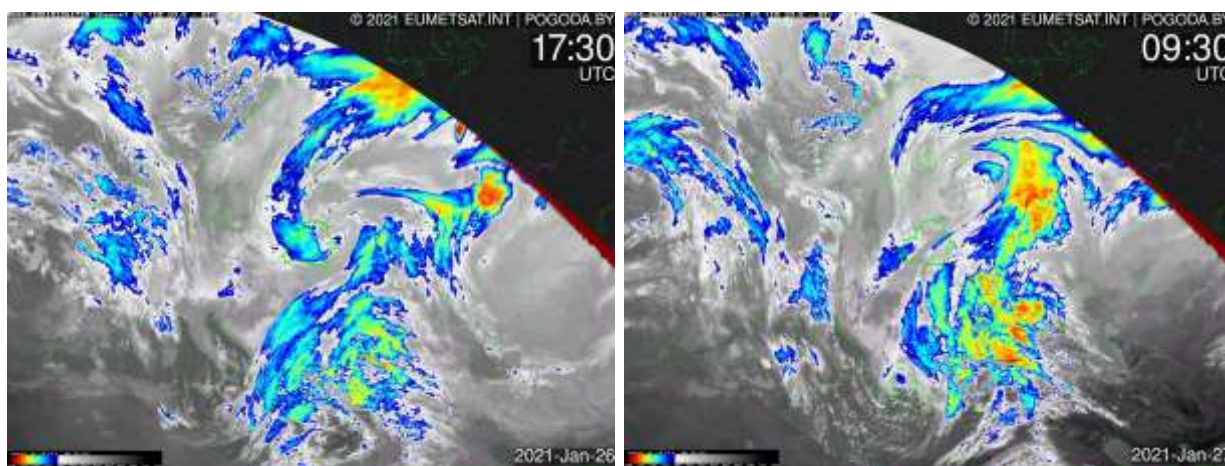
фронтів арктичної та полярної системи не відокремлюються, в результаті формується розшарований масив без чіткого виокремлення теплих секторів.

27 січня збільшується вихрова складова та потужність хмарності циклону.

Характеристику температури ВМХ у циклоні можна простежити за, так званими, посиленими інфрачервоними знімками (Enhanced IR) – рис.4.20.

Розширення чи посилення базових спектральних каналів використовуються для полегшення візуальної інтерпретації та розуміння зображень. Базові інфрачервоні зображення мають сіру шкалу, а розширені включають колірну гамму, яка підкреслює деякі особливості зображення (зазвичай дуже низькі температури).

На знімках чітко відображено вертикальну потужність хмарності південного циклону, що набуває відтінку від жовтого до червоного у центральній частині масиву. Такі відтінки характеризують температуру ВМХ та інтерпретуються за показниками яскравісної температури в K , в даному випадку, 200-210 K, тобто близько $-73..-63^{\circ}C$.



26.01.2021 р., 17:30 UTC

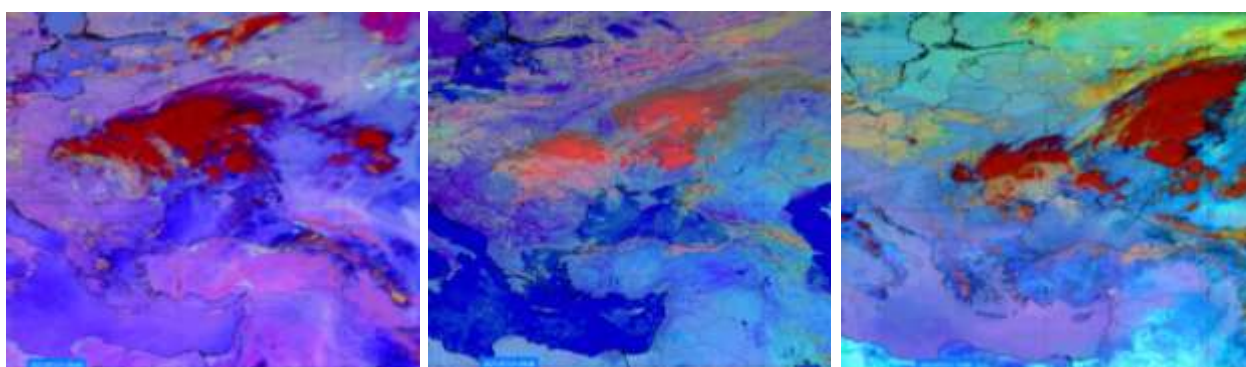
27.01.2021 р., 09:30 UTC

Рисунок 4.20 – Супутникові знімки хмарності MSG Enhanced IR

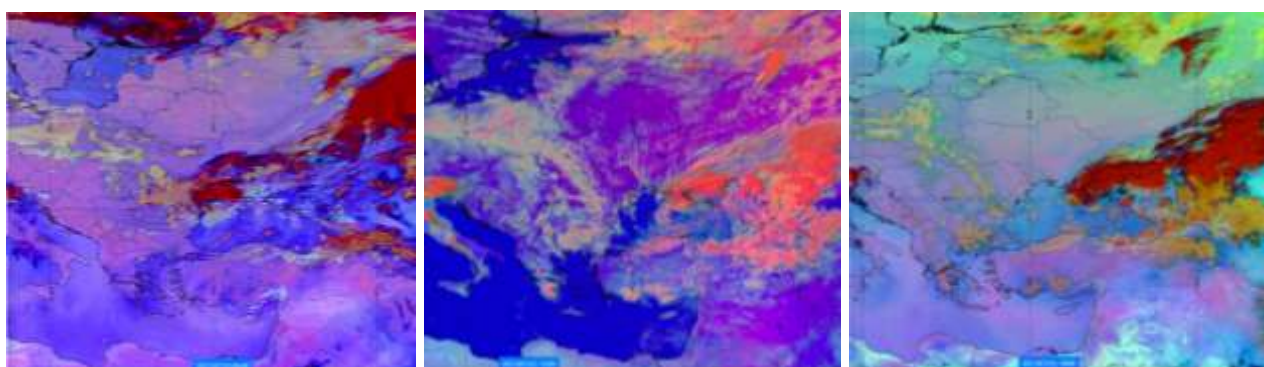
Останній випадок дослідження - формування стихійних злив на півдні України 21-22.07.2021 р.

Оскільки критичні суми опадів відмічалися як у нічні, так і денні строки, для аналізу взято композити RGB Night Microphysics, Day Microphysics, 24h Microphysics – рис.4.21.

Супутникові знімки вказують на смугу хмарності слабкої циклонічної кривизни зональної спрямованості. Зображення хмарності виділяє несучільну структуру значної ширини при злитті хмарності ділянок ХФ арктичної та полярної системи. При цьому на фронтах розвивається потужна конвекція з формуванням багатокоміркових та суперкоміркових хмар як вдень, так і вночі.



Night Microphysics 00:00 Microphysics Day 09:00 24h Microphysics 15:00
21.07.2021 р.



Night Microphysics 00:00 Microphysics Day 15:00 24h Microphysics 18:00
22.07.2021 р.

Рисунок 4.21 – Супутникові знімки хмарності MSG RGB, 26-27.07.2021 р.

4.4 Аналіз процесів опадоутворення

Охарактеризуємо розподіл кількості опадів та небезпечних явищ погоди фронтального походження за відібрані випадки. Для аналізу використано дані бюлетенів погоди та АРМсин: розподіл кількості опадів - денних, нічних, добових сум; карти та таблиці штормових явищ погоди, карти розподілу стихійних явищ та стиковані карти МРЛ.

Перший процес - 05-08 травня 2020 р.

Інтерес до цього випадку полягає в тому, що загалом по території України відмічалися небезпечні явища, характерні як для теплого, так і холодного періоду року. У центрі, на півночі, півдні та сході спостерігалася грозова діяльність, подекуди градові процеси, сильні дощі, посилення вітру, місцями зниження видимості у тумані. На відміну від цього, на заході України, що підпадала під вплив тилової частини улоговини при адвекції холоду, фіксувалося зниження видимості в тумані та випадіння снігу. Найбільше падіння температури повітря, як максимальної, так і мінімальної, на заході країни відмічалось 5-6 травня – нічні температури опустилися до 3-4°C, а денні - до 8...12°C. На противагу, на сході у ці дні мінімальна температура повітря наближалася до 10°C, а максимальна - до 20°C.

5 травня відмічався ряд небезпечних явища погоди, сформованих на холодному фронті - рис.4.22 (а)-(б). Град рівня НМЯ I (7 мм) реєструвався у Лубнах, також град відзначався у Конотопі, Семенівці, Прилуках та Вес.Подолі, що чітко прослідковується за даними карти МРЛ при розвитку потужних купчасто-дощових хмар з висотою ВМХ до 9-11 км - рис.4.22 (в). Грозова діяльність спостерігалася у центрі, на півночі, сході та півдні країни протягом доби. Найбільші суми опадів - рівня НМЯ I відмічені на станціях:

- Лубни, злива 36 мм, денні опади;
- Конотоп, злива 29 мм, денні опади;

- Прилуки, зливовий дощ 25 мм, денні опади;
- Бобринець, зливовий дощ 20 мм, денні опади;
- В. Олександрівка, зливовий дощ 14 мм нічні опади, 18 мм - денні опади;
- Ніжин, зливовий дощ 18 мм, денні опади;
- Кропивницький, зливовий дощ 15 мм, денні опади.

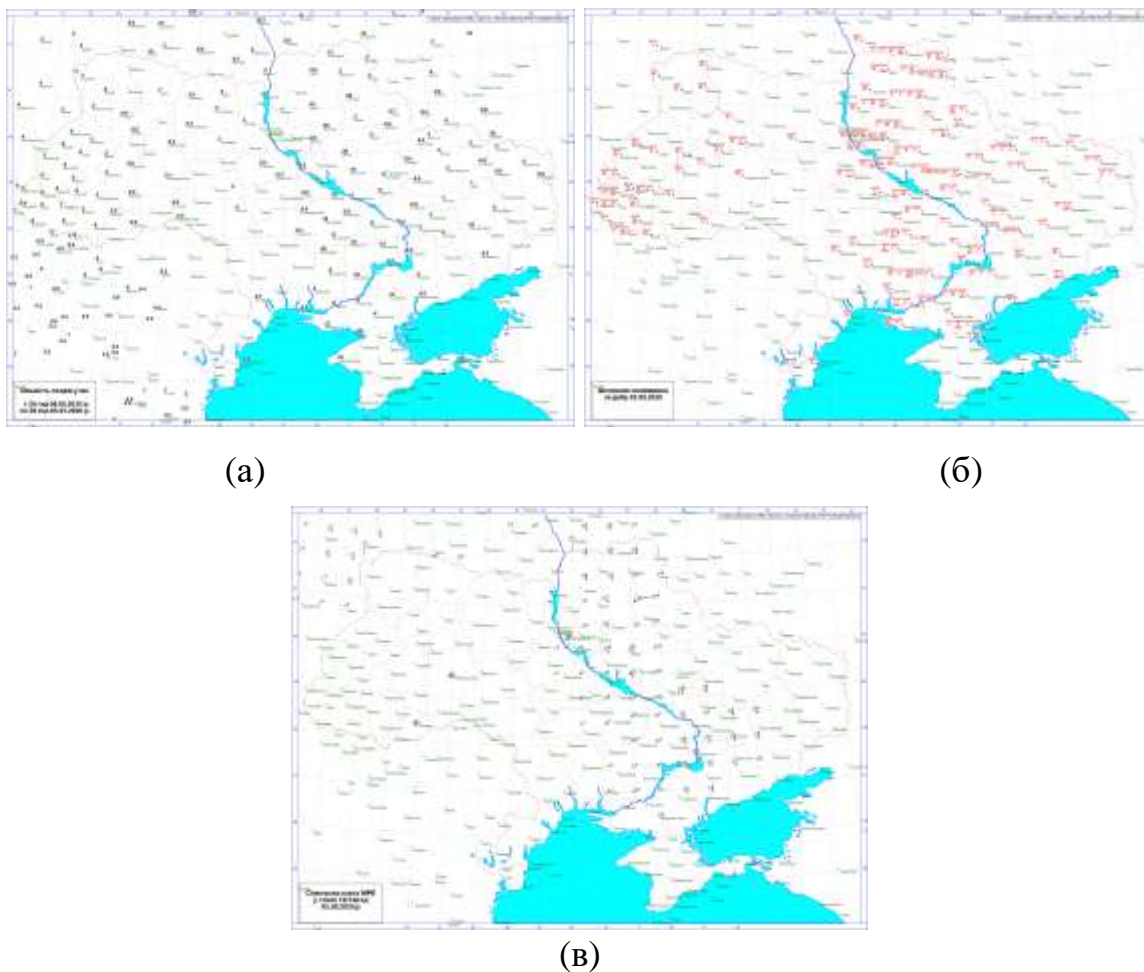


Рисунок 4.22 – Допоміжні карти погоди: (а) - карта добових опадів (мм); (б) - штормові оповіщення за добу; (в) - карта МРЛ, 12 год., 05.05.2020 р.

За наступні дні періоду – 6-8 травня 2020 р. розподіл небезпечних явищ погоди та кількості опадів представлено на рис.4.23.

Особливої уваги заслуговує розподіл НМЯ 6 травня. На півночі, півдні, сході та у центрі країни у системі холодного фронту арктичної системи

відмічалися грози, зливові дощі, посилення вітру, зниження видимості у тумані та опадах. Найбільші суми опадів (НМЯ I) зареєстровані вночі:

- Кобеляки, зливовий дощ 29 мм;
- Гадяч, зливовий дощ 23 мм;
- Долинська, зливовий дощ 21 мм;
- Ніжин, зливовий дощ 20 мм.

На погодні умови західної України здійснював вплив вторинний холодний фронт у другу половину доби. В результаті спостерігалися зливові дощі категорії НМЯ I, посилення вітру, а на Закарпатті та Івано-Франківщині – сніг.

Сильні дощі вночі відмічалися на Волині: Ковель 24 мм, Маневичі 21 мм, Свитязь 16 мм, Луцьк 15 мм.

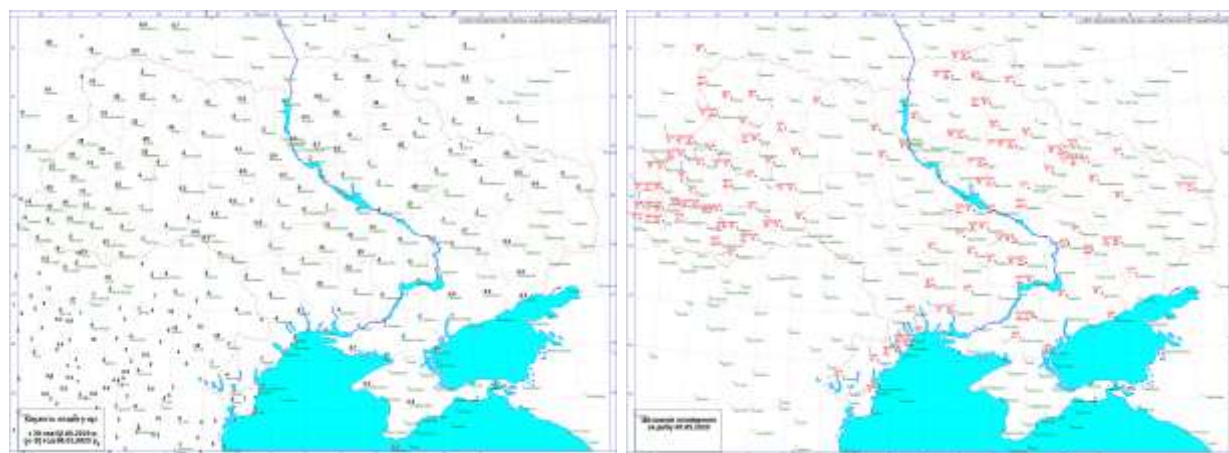
Вдень посилені рідкі опади спостерігалися на станціях:

- Бережани та Чернівці по 19 мм;
- Івано-Франківськ 15 мм;
- Турка та Славське по 16 мм.

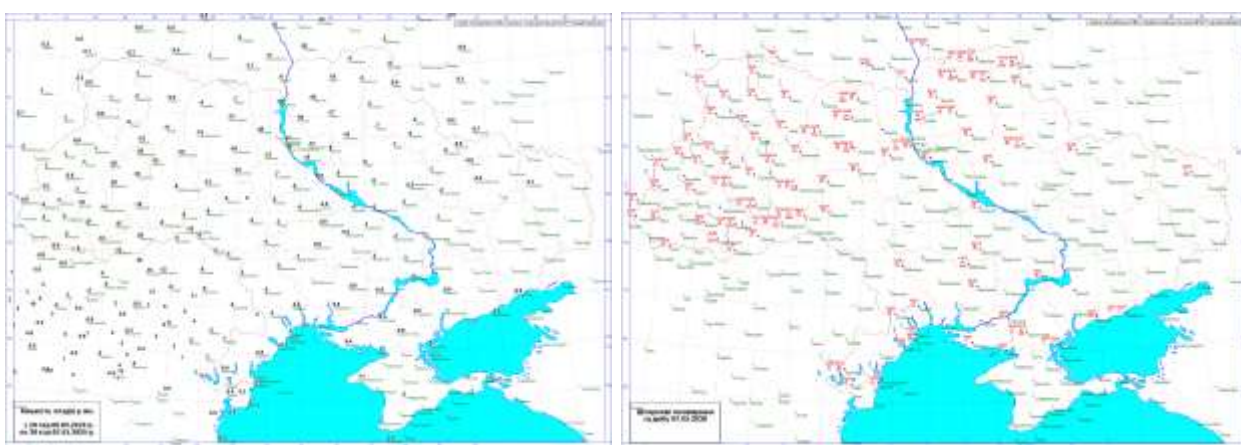
На високогірних станціях Пожежевська на 18:08 зафіксовано надзвичайний сніг СМЯ III категорії 120 мм за 9 год., а на ст. Плай – сніг НМЯ I 8 мм за 9 год., також сніг категорії НМЯ I відмічено на ст Н.Ворота (Закарпаття) 7 мм за 5 год.

До 7 травня небезпечні явища погоди зберігаються на півночі та заході країни у системі холодного фронту арктичного розділу та фронту оклюзії. На півдні на окремих станціях ще відмічаються грози та посилення вітру, опади слабкі. Найсильніші зливові дощі (НМЯ I) зареєстровано у Київській та Чернігівській області вночі:

- Тетерів 28 мм;
- Остер 25 мм;
- Київ (АП Антонов) 20 мм;
- Чорнобиль 18 мм;
- Ніжин 16 мм.



06.05.2020 р.



07.05.2020 р.



08.05.2020 р.

Рисунок 4.23 – Карти добових опадів (мм) та штормових оповіщень за добу 06-08.05.2020 р.

У західному регіоні зберігається вплив вторинного холодного фронту та фронту оклюзії. На ст. Пожежевська знову випав сніг - 16 мм за 12 год. (НМЯ І).

Найбільші суми нічних рідких опадів (НМЯ I) відмічені на станціях:

- Коломия та Чернівці по 27 мм;
- Бережани 23 мм за 6 год.;
- Яремче 21 мм за 9 год.;
- Кременець 20 мм;
- Тернопіль 19 мм.

За добу на 8 травня, на заході країни опади припиняються, а у залишковій хмарності циклону, що заповнився біля землі, подекуди спостерігаються небезпечні явища на сході країни. Місцями відмічаються грози, зливові дощі, град НМЯ I у Мелітополі (6 мм), також дрібніший град у Богодухові (5 мм) та Ізюмі (4 мм). Зливовий дощ (НМЯ I) спостерігався у Полтаві вдень – 17 мм та Слобожанському Харківської області – 23 мм.

Другий період формування комплексу небезпечних та стихійних явищ погоди припадає на кінець травня 2020 р.

28 травня добові суми опадів подекуди перевищували 50 мм, спостерігалися грози, подекуди град, посилення вітру, погіршення видимості в опадах. При цьому нічні опади та небезпечні явища погоди відмічались відповідно проходженню теплого фронту арктичної системи з південного заходу на північний схід (відповідно з Одещини на Харківщину). Денні опади посилювалися при русі арктичної фронтальної системи зворотню на захід та оклюдуванні полярної системи на сході України і рееструвалися вже у центрі, на півдні, півночі та північному сході країни – рис.4.24.

Нічні опади категорії СМЯ II рівня зафіксовані у Краснограді Харківської області - зливовий дощ 54 мм за 8 год. Посилені опади відмічались на станціях:

- Пришиб, зливовий дощ сильний 39 мм;
- Мелітополь, зливовий дощ 34 мм;
- Синельниково, дощ 33 мм;
- Харків, зливовий дощ 32 мм.

Опади рівня НМЯ I 16-27 мм також відмічалися на Одещині та станціях Запорізької, Дніпропетровської та Харківської областей.

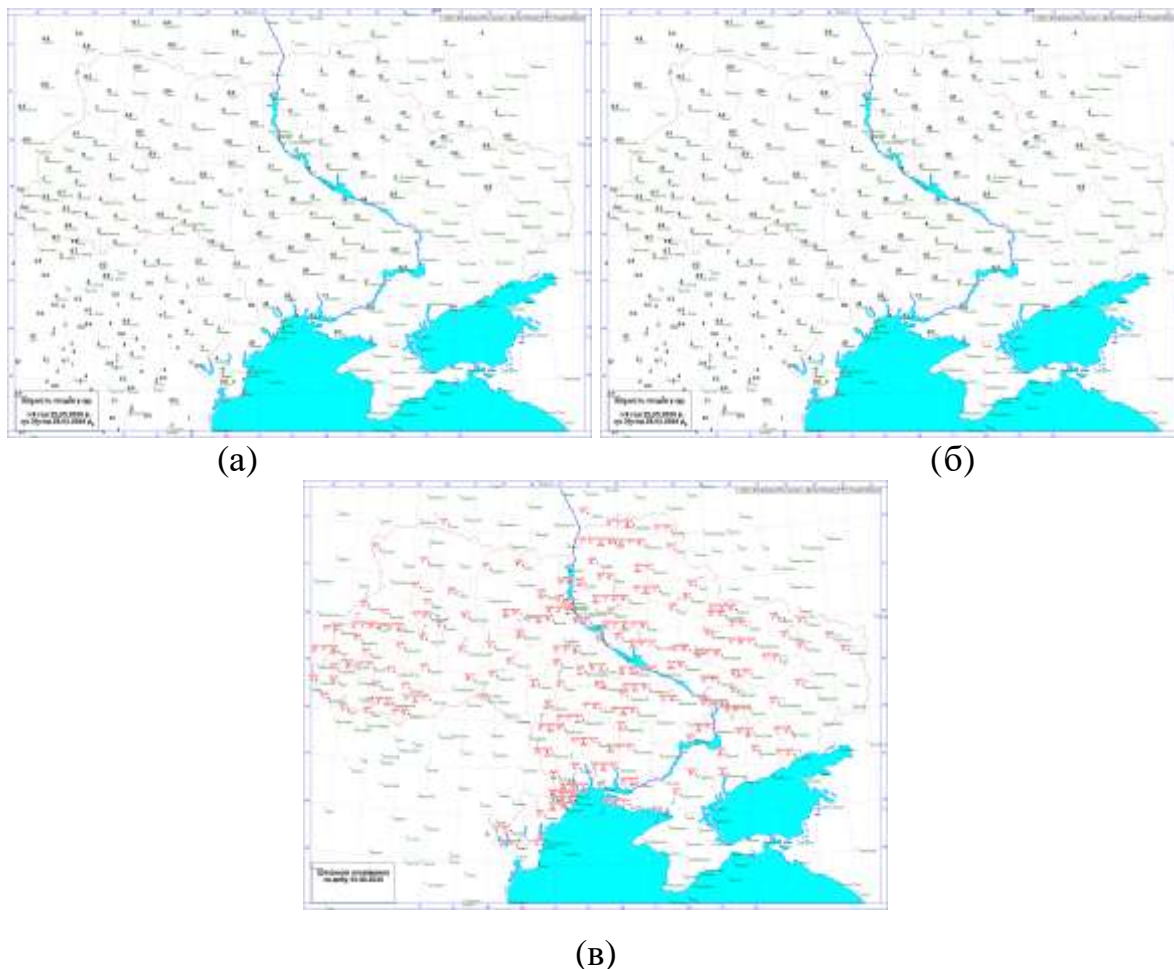


Рисунок 4.24 – Допоміжні карти погоди: (а)–(б) карти розподілу нічних та денних опадів (мм); (в) - штормові оповіщення за добу; 28.05.2020 р.

Максимальні суми денних опадів реєструвалися в Миколаївській, Одеській, Кіровоградській, Харківській, Чернігівській та Сумській областях:

- Роздільна, сильний зливовий дощ 43 мм;
- Прилуки, зливовий дощ 38 мм;
- Сербка, зливовий дощ 32 мм;
- Одеса, Любашівка та Богодухів - зливовий дощ 27 мм;
- Світловодськ та Конотоп - зливовий дощ 24 мм;
- Ніжин, зливовий дощ 23 мм.

При цьому у Полтавській області вдень зафіксовано СМЯ II рівня - сильні зливи у Лубнах та В.Подолі – 59 та 51 мм відповідно. Також в денні строки посилилася конвекція на заході країни, де спостерігалися грози і град діаметром 5 мм на ст. Пожежевська та у Чернівцях.

На 29 травня райони поширення сильних опадів дещо менші, на окремих станціях денні зливи на холодному фронті сягали критерію НМЯ I (рис.4.25):

- Маріуполь 36 мм;
- Сербка 32 мм;
- Красноармійськ 26 мм;
- Губиниха 23 мм;
- Полтава 20 мм;
- Лозова 18 мм;
- Гадяч 17 мм.

На ст. Пожежевська та Коломия відмічався град 7 мм, а у В.Бурлуках Харківської області – шквал $20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.



(a)

(б)

Рисунок 4.25 – Допоміжні карти погоди: (а) - карта добових опадів (мм); (б) - штормові оповіщення за добу; 29.05.2020 р.

Надалі опади знову посилюються вночі на 30 травня у системі холодного фронту і фронту оклюзії у центрі, на сході та північному сході країни – рис.4.26.

Найбільші суми нічних опадів відмічені на станціях:

- Коломак 42 мм;
- Золочів 33 мм;
- Харків 28 мм;
- Богодухів та Слобожанське - 26 мм;
- Баришівка 24 мм;
- В. Бурлук 23 мм;
- Конотоп 21 мм;
- Куп'янськ та Ромни – 16 мм.

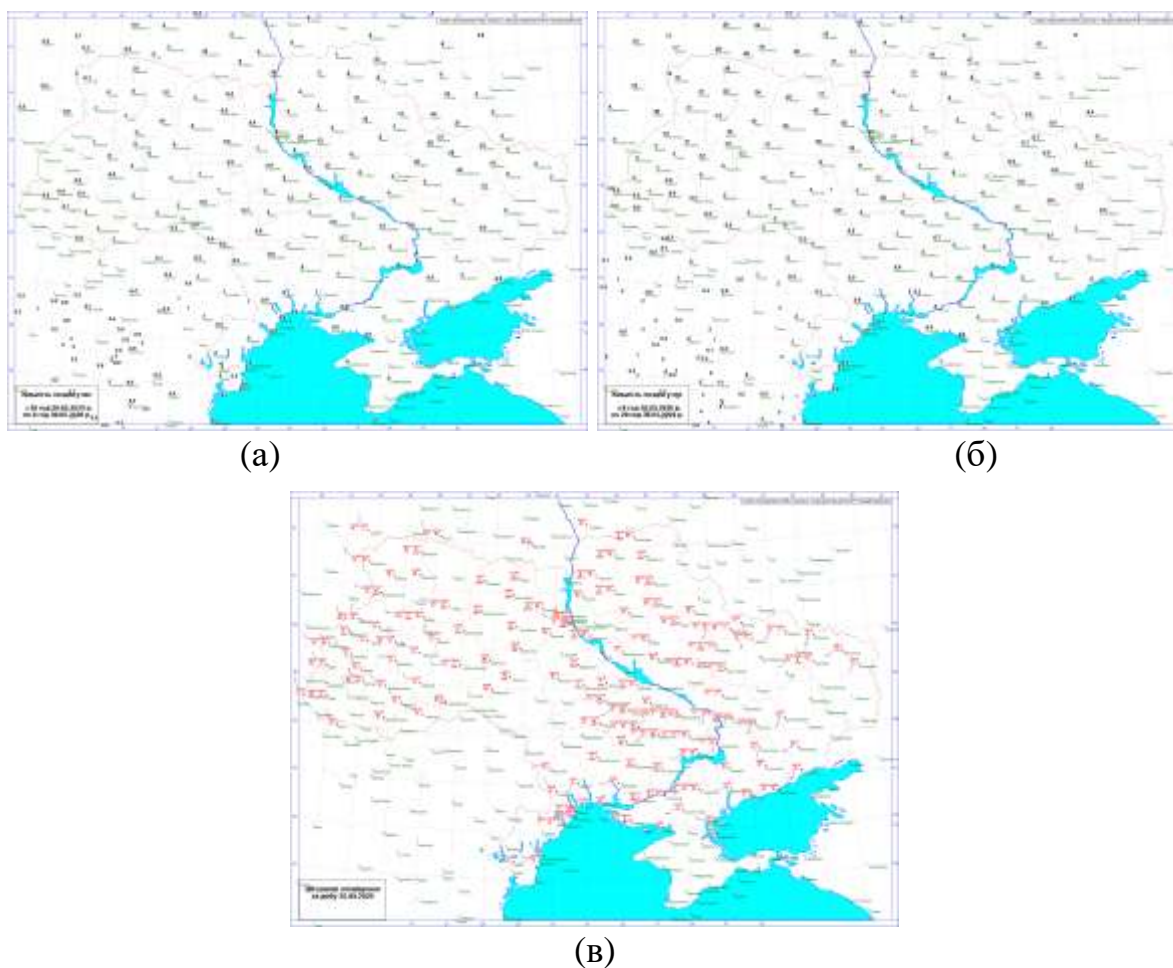


Рисунок 4.26 – Допоміжні карти погоди: (а)–б) карти розподілу нічних та денних опадів (мм); (в) - штормові оповіщення за добу; 30.05.2020 р.

Денні опади посилюються на півночі та північному заході країни. СМЯ II рівня реєструвалося на МС Тетерів - сильний дощ 52 мм за 10 год.

НМЯ I рівня відмічалось на станціях:

- Київ (АП Антонов), зливовий дощ 49 мм;
- Коростень, сильний дощ 42 мм;
- Житомир та Олевськ - сильний дощ 29 мм;
- Любешів, дощ 26 мм;
- Київ та Сарни, дощ 24 мм;
- Н.Волинський, сильний дощ 23 мм;
- Маневичі, дощ 22 мм;
- Чорнобиль та Звенигородка - дощ 20 мм;
- Дубно та Кременець - зливовий дощ 19 мм;
- АП Бориспіль, дощ 18 мм;
- Шепетівка, Ковель та Баришівка - дощ 17 мм;
- Свитязь, дощ 15 мм.

На нічні строки 31 травня арктичний фронт оклюдується над заходом України і саме в цьому регіоні зберігаються нічні посилені опади рівня НМЯ I:

- Пожежевська, дощ 27 мм (16 мм за 10 год.);
- Рахів, дощ 23 мм;
- Львів, дощ 22 мм;
- Чортків, дощ 21 мм;
- Хмельницький, К.Подільський, Н.Ушиця, Мостиска, Яворів – дощ 20 мм;
- Рава-Руська, Турка, Н.Студений, Жмеринка – дощ 19 мм;
- Тернопіль, Славське, Кам'янка - дощ 18 мм;
- Дрогобич та Плай - дощ 16 мм.

Вдень 31 травня конвективні процеси посилюються на сході – грозова діяльність, зливи, місцями град (Харків 5 мм, Лошкарівка 3 мм). Рівня НМЯ I сягають опади лише у В.Бурлуці Харківської області – зливовий дощ 17 мм, а град рівня НМЯ I фіксується у Нікополі - 8 мм та на ст. Пожежевська - 7 мм.

Наступний випадок для аналізу 13-14.07.2020 р.

Посилені опади на сході і місцями на півдні та у центрі країни виникли на холодних фронтах двох паралельних систем – арктичної та полярної.

13 липня зона активної конвекції сформувалася у після полуденні години на Лівобережжі, особливо на сході України, відмічалася посилена грозова діяльність та зливові дощі - рис.4.27.

Опади досягли категорії НМЯ I на станціях:

- Ізюм, денні опади злизовий дощ 36 мм;
- Сербка, денні опади злизовий дощ 32 мм;
- Лозова, денні опади злизовий дощ 29 мм;
- Запоріжжя та Пришиб - денні опади злизовий дощ 23 мм;
- Новопсков, денні опади злизовий дощ 22 мм;
- Чаплино, денні опади злизовий дощ 17 мм;
- Ніжин, нічні опади злизовий дощ 16 мм.



(а)

(б)

Рисунок 4.27 – Допоміжні карти погоди: (а) - карта добових опадів (мм); (б) - штормові оповіщення за добу; 13.07.2020 р.

За добу район найбільш складних погодних умов звужився і сконцентрувався на сході та північному сході України при поступовому

зміщенні арктичної ділянки холодного фронту в результаті руху циклону на північний схід.

Проаналізуємо розподіл нічних та денних сум опадів – рис.4.28.

Особливо сильними були нічні опади на Харківщині. Так, найвищої категорії СМЯ ІІІ зливи зафіксовані у Харкові на 06:00 – зливовий дощ 87 мм за 12 год. і Слобожанському (Комсомольськ) – 57 мм за 6 год на 00:00 та ще 57 мм за 3 год на 06:17. За повідомленнями Харківського центру з гідрометеорології така сума опадів у Харкові стала абсолютним добовим максимумом опадів не тільки для липня, а й в цілому для станції за весь період спостережень (минулий рекорд зафіксований у липні 1881 року і складав 83 мм).

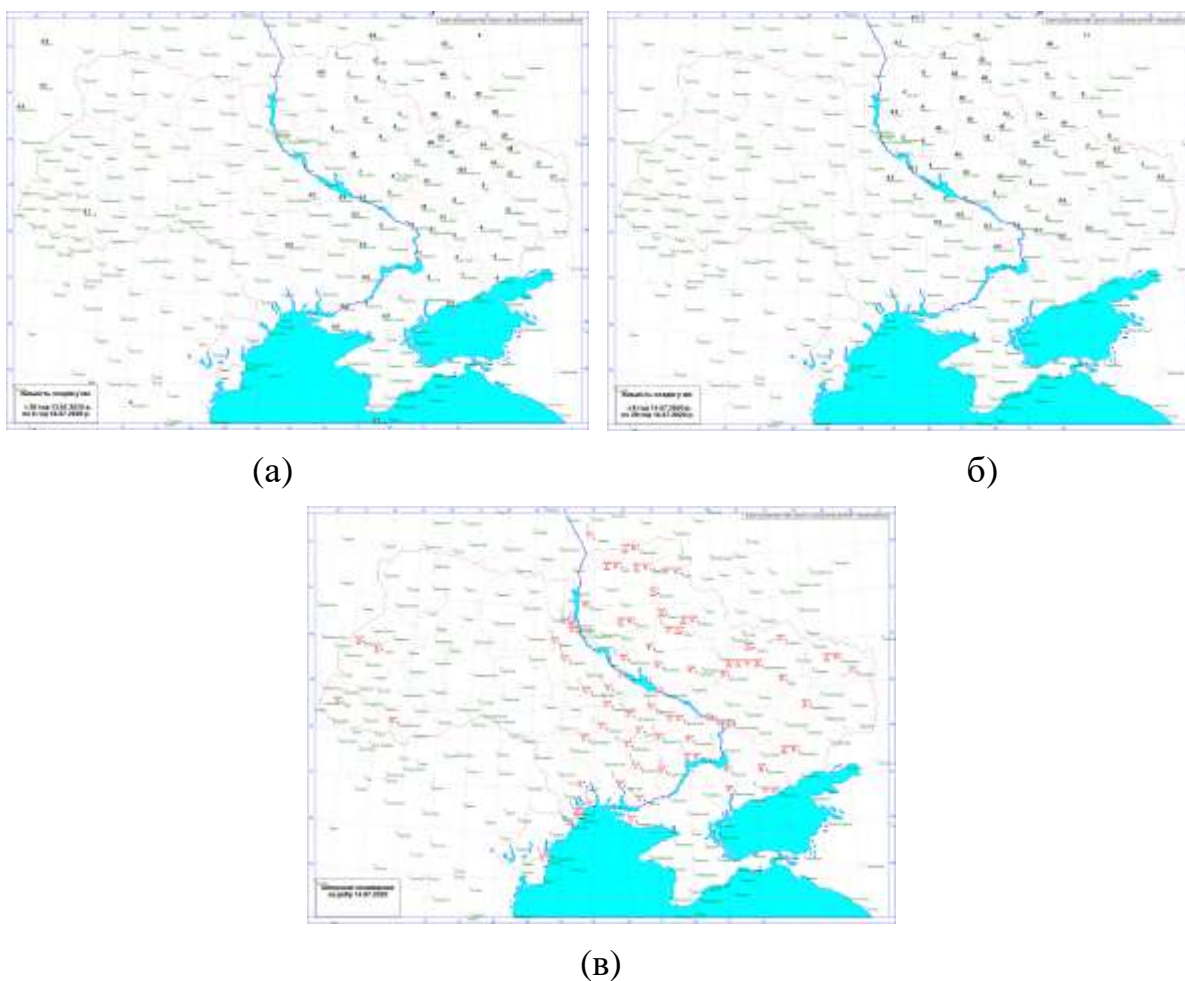


Рисунок 4.28 – Допоміжні карти погоди: (а)–(б) карти розподілу нічних та денних опадів (мм); (в) - штормові оповіщення за добу; 14.07.2020 р.

НМЯ I рівня зареєстровано на станціях:

- Богодухів, зливовий дощ 48 мм;
- Золочів, зливовий дощ 25 мм;
- Троїцьке, зливовий дощ 28 мм;
- Сватове, зливовий дощ 22 мм;
- Синельникове, зливовий дощ 21 мм;
- Куп'янськ та Лубни - зливовий дощ 16 мм;
- Красноград та Губиниха - зливовий дощ 15 мм.

Вдень зона посилених опадів дещо змістилася на північний схід.

Найбільші суми опадів НМЯ I спостерігалися на станціях:

- Суми, зливовий дощ 34 мм;
- Конотоп, зливовий дощ 29 мм;
- Прилуки, дощ 28 мм;
- Золочів, дощ 27 мм;
- Глухів, дощ 25 мм;
- Покошичі та Лубни - зливовий дощ 24 мм;
- Лебедин, Дружба та Богодухів - дощ 18 мм;
- Ромни, Гадяч та В.Поділ - зливовий дощ 16 мм;
- Семенівка, зливовий дощ 15 мм.

На Харківщині, Сумщині та у Запорізькій області відмічалось підтоплення доріг, вулиць, повалення дерев при поривах вітру.

В результаті зміщення ХФ через схід країни відмічалось суттєве падіння температури повітря, н-д, максимальна температура знизилася у Харкові від $29,5^{\circ}$ 13 липня до $18,8^{\circ}$ 14 липня, в Сумах – від $29,5^{\circ}$ 12 липня до 15° 14 липня.

Надалі розглянемо 2 випадки посилених опадів різної фази у 2021 р.

Погіршення погодних умов відмічалось у системі південного циклону на двох паралельних фронтальних розділах 26-27.01.2021 р. – рис.4.29.

За цей період у Кіровоградській області спостерігався сильний мокрий сніг (до 30 см), налипання мокрого снігу (II рівень небезпечності, помаранчевий). У

Черкаській, Полтавській, Сумській та Чернігівській областях значний мокрий сніг (до 15 см снігу), налипання мокрого снігу (І рівень небезпечності, жовтий); на дорогах ожеледиця. Через значні опади снігу у Львівській області обмежували рух великогабаритного транспорту, а у Рівненській - припиняли повністю. По Черкаській області випало 9-23 мм (найбільше у Звенигородці) опадів у вигляді мокрого снігу, снігу та дощу, на МС Чигирин та Черкаси фіксували крижаний дощ. Вночі 26 січня внаслідок ускладнення погодних умов (мокрый сніг, дощ та пориви вітру) через спрацювання автоматичної системи захисту ЛЕП знеструмлено 269 населених пунктів у 12 областях. На ранок 27 січня в Україні через негоду було знеструмлено 117 населених пунктів у 5 областях.

Нагадаємо, що НМЯ І рівня безпеки для твердих опадів (значний сніг) - це 7-19 мм за ≤ 12 год.

26 січня значний сніг відмічався на північному заході, півночі та місцями у центрі. Найбільші суми нічних твердих опадів зареєстровані на станціях:

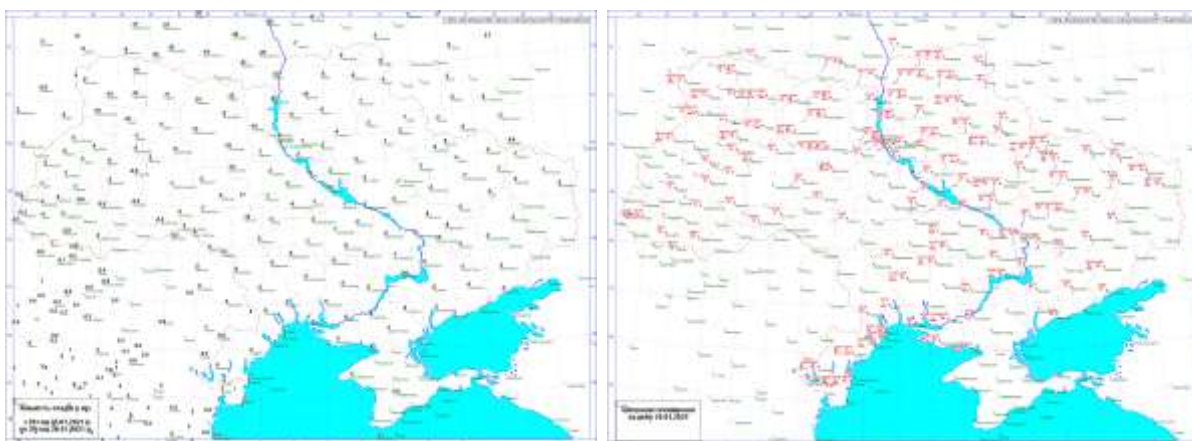
- Тетерів, сніг 16 мм;
- Білопілля, сніг 12 мм;
- Житомир, Гайсин - сніг 10 мм;
- Чернігів, Олевськ, Н.Волинський - сніг, зливовий сніг 9 мм;
- Овруч, Чорнобиль, Сербка, Луцьк, В.Волинський - сніг 8 мм;
- Сарни, Жмеринка, Свितязь, Ковель - сніг 7 мм.

На півночі, північному заході, Одещині та Закарпатті відмічалася ожеледь та складні відкладення, з максимальним діаметром на ст. Плай – 38 мм на 00:05 та 45 мм на 13:27.

При повороті вітру до північного та північно-західного на 27 січня відмічалися ожеледь, налипання мокрого снігу, туман, місцями пориви північного вітру 15-20 м·с⁻¹, на дорогах ожеледиця. Сильні хуртовини відмічалися у смузі відповідно проходженню двох паралельних ділянок теплих фронтів арктичної та полярної системи з південного заходу від Одещини на північний схід до Харківщини.

Найбільші нічні суми твердих опадів зафіксовані на станціях:

- Вилково 24 мм, СМЯ II;
- Одеса 16 мм;
- В.Бурлук 14 мм;
- Ізмаїл, Чорноморськ, Слобожанське - 13 мм;
- Б.Дністровський, Очаків, Херсон, Лозова - 12 мм;
- Харків, Запоріжжя – 11 мм.
- Синельникове, Губиниха – 10 мм.



26.01.2021 р.



27.01.2021 р.

Рисунок 4.29 – Карти добових опадів (мм) та штормових оповічень за добу 26-27.01.2021 р.

Вдень 27 січня сніг посилювався в Одеській, Миколаївській, Кіровоградській та Полтавській областях, на ряді станцій відмічався значний сніг 7-19 мм. Зареєстровано надзвичайний сніг СМЯ ІІІ рівня у Вилково - 36 мм та Одеса ГМЦ ЧАМ - 32 мм.

СМЯ ІІ рівня відмічалось на станціях:

- Сарата 29 мм за 6 год.;
- Вознесенськ 25 мм;
- Б.Дністровський 23 мм;
- Первомайськ 21 мм.

Таким чином, в результаті сильних снігопадів на 28 січня по території України встановився сніговий покрив, що сягав максимальних позначок нетипово саме на півдні та місцями у центрі країни – рис.4.30.



Рисунок 4.30 – Висота снігового покриву на 08 год. 28.01.2021 р.

Останній випадок дослідження - 21-22.07.2021 р.

За цей період реєструвалися зливи рівня СМЯ ІІ та СМЯ ІІІ.

Вночі 21 липня через західні регіони країни зміщувався холодний фронт, а через північні області – тепла ділянка фронтальної арктичної системи.

Найсильніші зливи відмічалися на станціях (рис.4.31):

- Лошкарівка 60 мм за 6 год;
- Н.Ушиця 45 мм;
- Миронівка 30 мм;
- Хмельницький, Новодністров, Дніпро – по 29 мм;
- Яготин 27 мм;
- Ніжин 25 мм;
- Хмільник 22 мм;
- К.Подільськ – 21 мм;
- Черкаси, Комісарівка – по 20 мм.

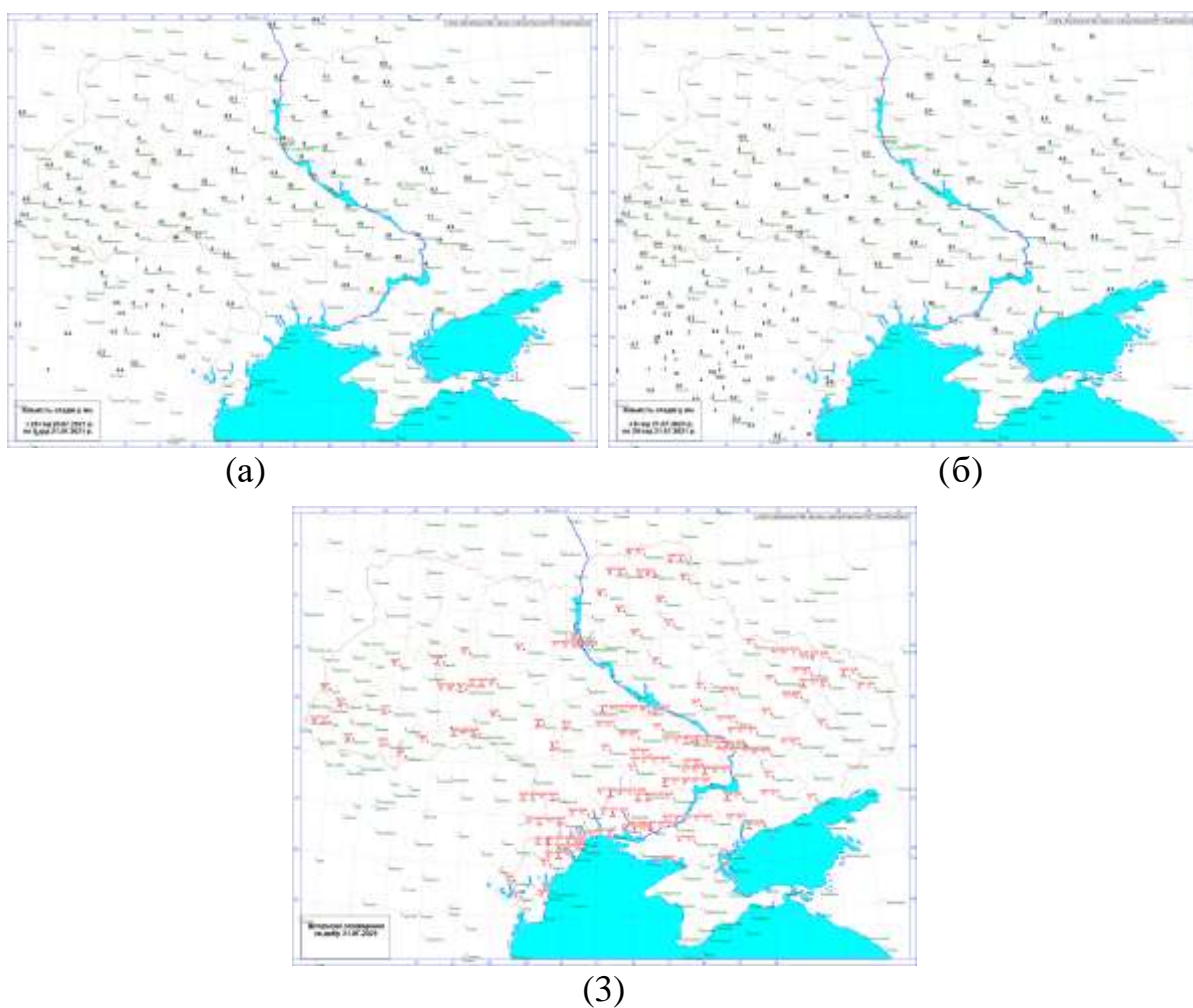


Рисунок 4.31 – Допоміжні карти погоди: (а)–(б) карти розподілу нічних та денних опадів (мм); (в) - штормові оповіщення за добу; 21.07.2021 р.

На ряді станцій також спостерігалися опади рівня НМЯ I (7-19 мм).

Вдень 21 числа опади посилювалися у центральній та частково південній Україні, відмічалася активна грозова діяльність, град та посилення вітру при проходженні фронтів. Так, сильний шквал СМЯ II рівня зареєстровано на Луганщині у Сватово $25 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ та НМЯ I у Троїцькому $20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Зливи СМЯ II рівня зафіксовані на станціях:

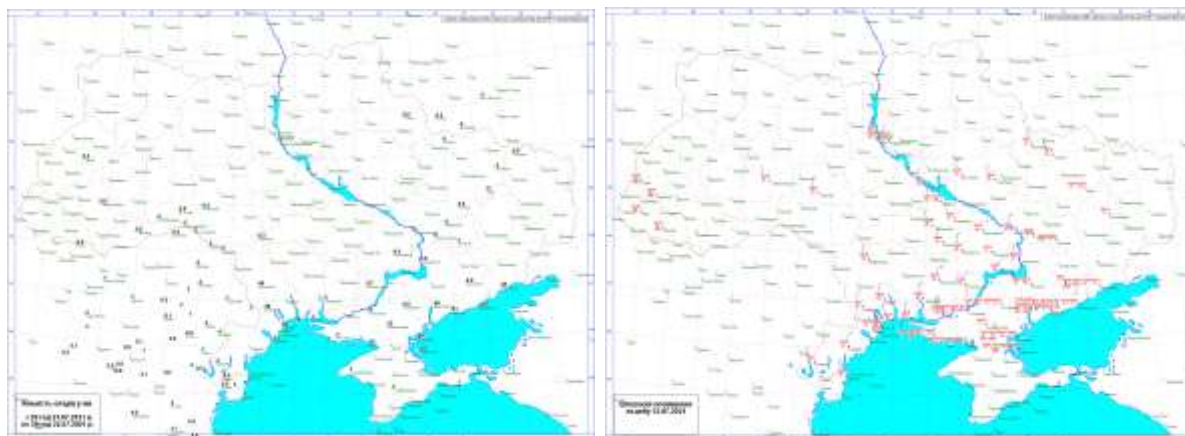
- Затишшя – 51 мм за 2 год;
- Умань та В.Олександрівка - по 49 мм;
- Хмільник 43 мм;
- Н.Ушиця 33 мм;
- Гайсин та Каховка - по 30 мм;
- Хмельницький 23 мм;
- Миколаїв та Павлоград - по 22 мм;
- Вінниця 20 мм.

22 липня над півднем України відмічалися сильні опади у ряді пунктів, що мали руйнівний вплив – рис.4.32.

Вранці 22 липня внаслідок поривів вітру, дощу, грози знеструмлено 99 населених пунктів у восьми областях. Внаслідок поривчастого, подекуди шквального вітру та сильного дощу та внаслідок падіння дерев двоє людей загинули та ще 7 осіб було травмовано.

Так, спостерігалися зливи СМЯ II та III рівня небезпеки:

- Бердянськ, денні опади 126 мм за 5 год.;
- Ботієво, денні опади 91 мм;
- Одеса ГМЦ ЧАМ, нічні опади 60 мм за 12 год., з них – 52 мм за 2 год.;
- Генічеськ, денні опади зливовий дощ 54 мм за 6 год.;
- Мелітополь, денні опади зливовий дощ 55 мм за 4 год.;
- Затишшя, нічні опади 54 мм;
- Роздільна, нічні опади 48 мм.



(a)

(б)

Рисунок 4.32 – Допоміжні карти погоди: (а) - карта добових опадів (мм); (б) - штормові оповіщення за добу; 22.07.2021 р.

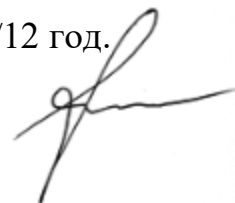
Повсюдно у південному регіоні відмічалось посилення вітру та грозова діяльність. Зливи спричинили значні руйнування та пошкодження інфраструктури міст, підтоплення будинків, руйнування доріг, ліній електромереж, повалення дерев тощо. Крім того, через зливу в аеропорту Одеса кілька літаків не змогли приземлитися.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження посилених фронтальних опадів на території України в різні сезони 2020-2021 рр. можна зробити наступні висновки:

1. У теплий період року небезпечні та стихійні опади виникли на ділянках холодних фронтів (4 випадки), тверді опади у січні 2021 р. сформувалися на двох паралельних ділянках теплих фронтів.
2. Висотні баричні поля в усіх 5 випадках вказують на існування струминної тропосферної течії над Східною Європою. Максимальна швидкість вітру на осі СТ над Україною спостерігалася за період 28-31 травня 2020 р. у південних потоках до $50 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.
3. Сильні опади у теплий період виникли в малоградієнтних баричних полях біля поверхні землі. Синоптичні процеси у трьох випадках характеризуються типом з висотними ізольованими циклонами «відсічення», які були малорухомі й тривалий час визначали комплекс несприятливих погодних умов на Україні. При значному прогріві підстильної поверхні й посиленій адвекції холоду на висотах виникли умови для розвитку зон активної конвекції (ЗАК).
4. Стихійні снігопади 26-27 січня 2021 р. сформувалися у системі південного циклону, що утворився над Адріатичним морем.
5. У всіх 5-ти випадках відмічалася однотипна структура висотного термобаричного поля - взаємодія висотного циклону (улоговини) над Східною Європою зі квазістаціонарним гребенем над Східноєвропейською рівниною та Уралом. Територія України знаходилася у перехідній зоні підвищених градієнтів між висотним циклоном (улоговиною) та висотним гребенем - «штормова зона».
6. Аналіз термічного фронтального параметру TFP задовільно визначає положення фронтальних розділів у 4-х випадках.

7. Фронтальні розділи характеризувалися чітким розподілом адвективних змін температури у всіх випадках, але на різних рівнях тропосфери.
8. Дослідження дивергенції швидкості виділило конвергентні області, що узгоджуються з зонами найбільш потужної хмарності.
9. Аналіз композитних знімків хмарності RGB показав, що небезпечні та стихійні опади у теплий період виникли у масивах потужної хмарності скупчень та кластерів С_b на фронтальних смугах. Стихійні снігопади у січні 2021 р. виникли за умов значного вертикального розвитку хмарності південного циклону.
10. Складна структура хмарності холодного фронту 21-22 липня 2021 р. зі слабкою адвекцією температури повітря у нижній та середній тропосфері і посиленій адвекції тепла та холоду на півдні країни за даними АТ-300 вказала на існування верхнього фронту, на ділянках якого сформувалася суперкомірка на строк 00 год. та мультикоміркова хмарність у після полуденні години 22 липня.
11. За досліджені періоди зареєстровано опади категорії НМЯ I, СМЯ II та СМЯ III, з них найбільші суми на станціях:
 - 06.05.20 р. Пожежевська надзвичайний сніг 120 мм/9 год.;
 - 28.05.20 р. Красноград зливовий дощ 54 мм/8 год., Лубни 59 мм/12 год., В.Поділ 51 мм/12 год.;
 - 30.05.20 р. Тетерів сильний дощ 52 мм/10 год.;
 - 14.07.20 р. СМЯ III зливовий дощ Харків 87 мм/12 год., Слобожанське 57 мм/6 год. вночі та 57 мм/3 год. вдень;
 - 27.01.21 р. надзвичайний сніг Вилково 36 мм/12 год. та Одеса ГМЦ ЧАМ 32 мм/12 год.;
 - 21.07.21 р. Лошкарівка злива 60 мм/ 6 год; Затишшя – 51 мм/2 год;
 - 22.07.21 р. Бердянськ, злива 126 мм/5 год.; Ботієво 91 мм/12 год.; Одеса ГМЦ ЧАМ злива 52 мм/2 год.; Генічеськ зливовий дощ 54 мм/6 год.; Мелітополь зливовий дощ 55 мм/4 год.; Затишшя злива 54 мм/12 год.



СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Балабух В.О. Мінливість дуже сильних дощів і сильних злив в Україні. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2008. Вип.257. С.61-72.
2. Балабух В.О. Траєкторії циклонів, що зумовлюють небезпечну і стихійну кількість опадів в Україні у теплий період року. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2004. Вип.253. С.103-119.
3. Заболоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М. Небезпечно сильні опади в Україні та можливі причини їх утворення. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2006. Вип. 255. С.25-41.
4. Заболоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М. Просторовий розподіл хмарності на атмосферних фронтах різного типу в Україні. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2008. Вип.257. С.73-83.
5. Івус Г.П., Хоменко Г.В. Результати чисельного моделювання фронтогенезу і сильних опадів. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. Вип.11. С.86-92.
6. Клімат України / під ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. Київ. Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.
7. Кульбіда М.І., Олійник З.Я., Паламарчук Л.В., Галицька Є.І. Аналіз режиму опадів на території України за десятиріччя 2002-2011 рр. *Фізична географія та геоморфологія*. 2013. Вип.1 (69). С.127-138.
8. 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.
9. Мартазинова В.Ф., Щеглов А.А. Характер екстремальних осадков начала ХХІ столетия на территории Украины. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. Вип.22. С.36-45.

10. Паламарчук Л.В., Сокур К.С., Заболоцька Т.М. Динаміка інтенсивності опадів та мезоструктурні особливості їх полів у теплий період року на рівнинній частині території України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. Вип.4(55). С.95-111.
11. Пірнач Г.М. Чисельне моделювання хмар та опадів у системах атмосферних фронтів. УкрНДГМІ. Київ: Ніка-Центр, 2008. 295 с.
12. Практикум з синоптичної метеорології: навчальний посібник / Од. держ. еколог. ун-т; за ред. Г.П. Івус, С.М. Іванової. Одеса: ТЕС, 2004. 419 с.
13. Семёнова И.Г., Ивус Г.П. Использование термического фронтального параметра для моделирования бароклинных зон в процессах циклогенеза. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2011. Вип. 261. С.56-71.
14. Семенова І.Г., Нажмудінова О.М. Регіональна синоптика: підручник. ОДЕКУ. Одеса: ТЕС, 2019. 212 с.
15. Татарчук О.Г., Тимофєєв В.Є. Сильні зливи на території України на рубежі ХХ–ХХІ століть. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Географія. 2017. Вип.1(66)/2(67). С.89–93.
16. Шакина Н.П., Калугина Г.Ю., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Субъективный и объективный анализ атмосферных фронтов. Объективное выделение зон фронтов. *Метеорология, климатология и гидрология*. 1998. Вып.8. С.5–15.
17. Шакина Н.П., Калугина Г.Ю., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Субъективный и объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности. *Метеорология, климатология и гидрология*. 2000. Вып.7. С.5-16.
18. <http://212.232.25.232/ng-maps/>
19. <http://www.woksat.info/wos.html>
20. <http://www.zamg.ac.at/docu/Manual/SatManu/main.htm?/docu/Manual/SatManu/Basic/Parameters/>
21. <https://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/vrl/tutorials/satmanu-eumetsat/satmanu/basic/parameters/ftp.htm>