

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Гідрометеорологічний інститут
Кафедра метеорології та кліматології

Бакалаврська кваліфікаційна робота

на тему: Умови виникнення смерчів над Одещиною
влітку 2018 року

Виконав студент 3 року навчання
групи МСГ-23а
спеціальності 103 «Науки про Землю»
Масловський Євген Олександрович

Керівник к. геогр.н., доц.
Семергей-Чумаченко Аліна Борисівна

Рецензент д. геогр.н., проф.
Ляшенко Галина Віталіївна

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет _____ Гідрометеорологічний інститут _____
Кафедра _____ метеорології та кліматології _____
Рівень вищої освіти бакалавр _____
Спеціальність _____ 103 «Науки про Землю» _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
Хохлов В.М.
“26” квітня 2019 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Масловському Євгену Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Умови виникнення смерчів над Одещиною влітку 2018 року

керівник роботи _____ к.геогр.н., доц. Семергей-Чумаченко Аліна Борисівна
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти 07 грудня 2018 року № 343-С

2. Строк подання студентом роботи 17 травня 2019 року

3. Вихідні дані до роботи 1. Дані бази даних Європейської лабораторії сильних штормів (European Severe Storms Laboratory ESSL). 2. Синоптичні карти. 3. Супутникові знімки 4. Дані радіозондування над Одесою. 5. Дані моделі GFS

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд літературних джерел за темою дослідження. 2. Характеристика умов формування смерчів над Україною. 3. Визначення річного та добового ходу смерчеутворення. 4. Систематизація синоптичних чинників напередодні виникнення смерчів над Одещиною. 5. Аналіз основних індексів конвекції напередодні смерчу. 6. Розрахунок індексів конвекції та визначення готовності атмосфери до виникнення вихорів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень.) Рис. 1.1–1.3 – ілюстрації щодо умов утворення смерчів з літературних джерел. Рис. 2.1-2.3 – повторюваність, сезонний хід та інтенсивність смерчів над Україною, Рис. 2.4–2.14– умови смерчеутворення над Одеською областю влітку 2018 р. Рис. 3.1-3.12 – результати розрахунків індексів конвекції для випадків виникнення смерчів 17 червня та 3 липня 2018р.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 26 квітня 2019 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1.	<i>Вивчення літературних джерел за темою дослідження</i>	з 29 квітня 2019 р.	95	відмінно
2.	<i>Збір та попередня обробка вихідної інформації, складання бази даних до дослідження</i>	квітень 2019 р.	95	відмінно
3.	<i>Визначення особливостей річного та добового ходу смерчеутворення над Північно-Західним Причорномор'ям</i>	квітень 2019 р.	95	відмінно
4.	<i>Систематизація синоптичних чинників напередодні виникнення смерчів над Північно-Західним Причорномор'ям.</i>	квітень 2019 р.	95	відмінно
5.	<i>Аналіз основних індексів конвекції напередодні смерчу.</i>	травень 2019 р.	95	відмінно
6.	Рубіжна атестація	13.05.2019	95	відмінно
7.	<i>Розрахунок індексів конвекції та готовності атмосфери до виникнення вихорів 26 липня 2017 р</i>	травень 2019 р.	95	відмінно
8.	<i>Підведення підсумків та підготовка рукопису до друку</i>	15 травня 2019 р.	95	відмінно
9.	<i>Оформлення бакалаврської роботи.</i>	16 травня 2019 р.	95	відмінно
10.	<i>Підготовка комп'ютерної презентації та доповіді до захисту бакалаврської роботи.</i>	червень 2019	95	відмінно
11.	<i>Попередній захист бакалаврської роботи.</i>	червень 2019	95	відмінно
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		95	відмінно

Студент

_____ Масловський Є. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Семергей-Чумаченко А.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Причини утворення смерчів.....	5
1.1 Загальні відомості про смерчі.....	5
1.2 Гіпотези щодо механізму виникнення смерчу.....	9
2 Виникнення смерчів над Україною у 2018 р.....	13
2.1 Повторюваність та географічний розподіл смерчів над Україною	13
2.2 Синоптичні умови виникнення смерчів.	17
2.3 Аналіз синоптичних та метеорологічних умов виникнення смерчів над Одеською областю влітку 2018 р.	19
3 Термодинамічні умови утворення смерчів.....	31
3.1 Індекси нестійкості атмосфери та її готовності до розвитку суперосередків.....	31
3.2. Аналіз індексів нестійкості атмосфери напередодні смерчів над Одеською областю 17 червня та 3 липня 2018 р.	40
Висновки	48
Перелік посилань.....	49

ВСТУП

Смерч спричинює величезні катастрофічні руйнування внаслідок досить значної сили вітрового натиску і великої різниці тиску між ним і навколишнім середовищем. За останні роки внаслідок кліматичних змін смерчі все частіше з'являються над Україною, що визначає актуальність теми дослідження.

Мета кваліфікаційної роботи – характеристика циркуляційних процесів та термодинамічного стану тропосфери над південним заходом України, які сприяли утворенню смерчів на території Одеської області 17 червня та 3 липня 2018 р.

Об'єкт дослідження: смерчі на території Одеської області у 2018 р.

Предмет дослідження – характеристики стану атмосфери при виникненні смерчів над Північно-Західним Причорномор'ям.

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

Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку посилань.

У вступі формулюються мета та завдання роботи.

Перший розділ містить в собі загальну інформацію про смерчі, його вплив життя суспільства.

Другий розділ присвячений аналізу режиму утворення смерчів над Україною, складається з визначення повторюваності, річного та добового ходу смерчеутворення над Одеською областю у 2018 р., виявлення макроциркуляційних процесів формування смерчів над регіоном та аналізу синоптичних ситуацій 17 червня та 3 липня 2018 р.

У третьому розділі оцінюється готовність атмосфери напередодні смерчу до розвитку небезпечної конвекції через аналіз індексів нестійкості.

У висновках представлені результати виконаної роботи.

Перелік посилань складається з 21 літературних джерел.

Робота виконана на кафедрі метеорології та кліматології ОДЕКУ під керівництвом к.геогр.н., доц. Семергей-Чумаченко А.Б. у рамках науково-дослідної роботи «Прогнозування небезпечних метеорологічних явищ над південними районами України» (2015-2019 рр.) ДР № 0115U006532).

1 ПРИЧИНИ УТВОРЕННЯ СМЕРЧІВ

1.1 Загальні відомості про смерчі

Смерч – це явище, що є стрімким воронкоподібним вихором заввишки до 1,5 км, який витягується від купчасто-дощової хмари (материнської) до поверхні води або землі, має вигляд темного хмарного стовпа з приблизно вертикальною (що вигинається) віссю. При досягненні хоботом смерчу землі, його діаметр змінюється до розмірів від 50 до 500м. Смерчова хмара у верхній своїй частині, яка безпосередньо прилягає до купчасто-дощової хмари, найбільш розширена й продовжується вниз до землі порівняно вузьким циліндром [1]. Нижня частина смерчової хмари здебільшого оточується загрозливим стовпом пилу чи уламків предметів, які зриваються з землі й розкидаються в різні боки відцентровою силою вихрового руху.



Рис. 1.1. Приклади утворення смерчу [10]

Бувають випадки, коли з однієї материнської хмари можуть вирости вниз кілька хоботів. Над водною поверхнею лійка складається з бризок й нагадує шнуроподібний каскад величезних мас води. Пиллові та піщані смерчі, які спостерігаються переважно в пустелях, відрізняються від смерчів помірних широт тим, що вони часто не пов'язані з купчасто-дощовими хмарами. Смерчі можуть спостерігатись всюди, окрім полярних областей. Смерч володіє ураганною швидкістю вітру більше 33 м/с. Швидкість руху повітря в середині смерчу становить близько 200 м/с. Швидкість пересування торнадо над поверхнею землі не на стільки велика як швидкість самого торнадо і сягає 30-

60км/год. Приблизно через 30 кілометрів від місця утворення смерч втрачає свою руйнівну силу [1-4].

Енергія типового смерчу радіусом 1 км і середньою швидкістю 70 м/с, по оцінках С.А.Арсеньєва, А.Ю.Губаря і В.Н.Миколаївського [8, 10], дорівнює енергії еталонної атомної бомби в 20 кілотонн тротилу, подібній першій атомній бомбі. Форма смерчів може бути різноманітною – колона, конус, келих, бочка, бичеподібна мотузка, пісковий годинник, роги «диявола» і т.п., але найчастіше смерчі мають форму обертового хобота, труби або лійки, що звисає з материнської хмари. Обертання смерчу відбувається проти годинникової стрілки, як і в циклонах північної півкулі Землі, але за дуже малих розмірів вихору може здійснюватись і за годинниковою стрілкою. Вітри в смерчі сильно конвертують у напрямку до середини, результатом чого є сильний висхідний рух повітря. Всередині лійки є безхмарна порожнина, у якій опускається струмінь повітря, що обертається. Іноді цей струмінь ударяється об земну поверхню. Лійка смерчу важить іноді до півмільйона тон. Тиск всередині смерчу від'ємний, і відрізняється з зовнішнім більше ніж 100-200 гПа, а горизонтальний баричний градієнт може сягати 10 гПа/100м, що більше ніж у сотню разів перевищує максимально можливий горизонтальний баричний градієнт тропічного циклону. Через різницю тиску в середині хобота смерчу і ззовні нього створюється «ефект насосу», що призводить до всмоктування навколишнього повітря, води, предметів, людей, тварин, всередину воронки.

Всі предмети які потрапляють в хобот розриваються на шматки. Але, були випадки коли тварини чи речі, які потрапляли в середину смерчу залишалися майже не ушкодженими. Так, наприклад, під час смерчу в США кури які потрапили в пастку залишилися живими після проходження торнадо, та вже без пір'я. Або ж, випадок коли на місці знищеного будинку залишалася неушкодженою шафа з посудом. Отже, в певній зоні хобота смерчу існує мертва зона, яка не настільки від'ємного значення тиску, як в основній його частині [8, 10].

В табл. 1.1. представлені результати статистичної обробки параметрів вихорів. За цією таблицею, мінімальне значення висоти видимої частини складає 10-100 м, з максимумом – 1,5-2,0 км. Діаметр смерчів біля землі від 1-10 м до 1,5-2,0 км, існують найменше протягом 1-10 хв., найдовше – протягом

5 год. Смерчі можуть пройти шлях від 10-100 м. до 500 км. та нести руйнування площею від 10-100 м². до 400 км², при цьому підняти в повітря предмети масою до 300 тонн. Швидкість переміщення смерчу сягає від 20 до 150 км/год.

Таблиця 1.1 - Орієнтовні параметри смерчів [10]

Вимірювана величина	Мінімальне значення	Максимальне значення
Висота видимої частини	10-100 м	1,5-2,0 км
Діаметр біля землі	1-10 м	1,5-2,0 км
Діаметр біля хмари	1 км	1,5-2,0 км
Лінійна швидкість стінок	20-30 м/с	100-300 м/с
Товщина стінок	3 м	-
Пікова потужність	30 ГВт	-
Тривалість існування	1-10 хв.	5:00 год.
Шлях	10-100 м	500 км
Площа руйнування	10-100 м ²	400 км ²
Максимальна маса піднятих предметів	-	300 т
Швидкість переміщення	20 км/год.	150 км/год.
Тиск всередині смерчу	< 0,4-0,5 атм	-

У 1973 р. Метеорологічна служба США прийняла в якості офіційної наступну шкалу інтенсивності смерчів, яка була розроблена у 1971 р. японським ученим Теодором Фуджита (Fujita scale або F-scale) [3]. Вся шкала складається з тринадцяти категорій: від F0 до F12 (табл. 1.2). При цьому, проміжок F0-F1 відповідає 11 і 12-му балу Бофорової шкали швидкості вітрів (32 м / с, ураган) [11].

На Землі велику частину складають смерчі F0 та F1, більш високі категорії велика рідкість. Категорії, вище F5, Фуджита ввів в якості теоретичних. Тому, максимальна категорія, що привласнюється смерчам – це F5, навіть якщо швидкість вітру буде перевищувати 512 км/год.

Таблиця 1.2 – Шкала Т. Фуджита [11]

Категорія	V		P, %	Характеристика руйнувань	
	м/с	км/год			
F0	18-33	64-116	38,9	Штормовий смерч. Обламає гілки дерев, вивіски, пошкоджує вишки, димові труби і стовпи	
F1	33-50	117-180	35,6	Помірний смерч. Зносить дахи і пересуває машини.	
F2	50-70	181-253	19,4	Значний смерч. Розбиваються вікна, вивертаються дерева, ламаються пересувні будинки.	
F3	70-93	254-332	4,9	Сильний смерч. Перекидає вагони і локомотиви, піднімає в повітря машини, більшість дерев виринає з коренем, руйнує стіни будинків.	
F4	93-117	333-418	1,1	Руйнівний смерч. Легкі будинки цілком піднімає в повітря, міцніші руйнує частково або повністю, машини переносить на величезні відстані.	
F5	117- 143	419-512	< 0,1	Неймовірний смерч. Далеко переносить міцні будівлі, зриваючи їх з фундаменту і відриває асфальт. Доценту руйнує населені пункти.	
F6—F12	> 143	> 512	<0,001	Апокаліптичний.	

Теоретично швидкість вітру смерчу з інтенсивністю F12 дорівнює швидкості звуку, тобто 1000 км/год. Смерчі такої швидкості досі не фіксувалися. Руйнування від торнадо категорії F6 і більш високих категорій в загалом не відрізняють від тих, які наніс би F5, так як більшість руйнувань нанесе периферія вихорю, ще до того, як вітер сили F6 дійде до території руйнувань [4, 11].

1.2 Гіпотези щодо механізму виникнення смерчу

Щодо фізичних та синоптичних процесів утворення смерчів, то чисельні дослідження виявили, що виникнення смерчів пов'язане з локальною неоднорідністю атмосфери, зіткненні неоднорідних за вологістю та температурою повітряних мас, теплих і холодних шарів повітря та сильному боковому вітрі під час грозової погоди. Отже утворенню смерчу сприяють такі основні чинники:

- різність температур повітря та значний баричний градієнт, тобто підвищена бароклінічність.

- утворення циклонів, тобто завихореність потоків повітря.

Смерч часто виникає при сходженні двох різних за температурою повітряних мас, теплої і холодної. Або, при знаходженні грозових хмар над певною територією. Процес утворення смерчу в цьому випадку полягає в зміні холодного повітря на тепле, а теплого на холодне. Грозові хмари приносять з собою холодне повітря, яке починає опускатися вниз до земної поверхні. На зміну холодному повітрю починає підійматися тепле. Така нестійка система утворюється при з'єднанні холодного і теплого атмосферних фронтів. Ці рухи повітряних мас призводять до обертального руху повітря. Швидкість цього руху зростає і смерч починає набувати свій вигляд. З плином часу формується вихор максимальної потужності. В середині смерчу повітря рухається вгору (рис. 1.2.).

Баричний градієнт – це наслідок усіх сил атмосферного тиску, які діють на одиницю об'єму. Однак у метеорології цю силу відносять не до одиниці об'єму, а до одиниці маси і називають силою баричного градієнта, позначаючи буквою «G» [1, 7].

По суті це перепад атмосферного тиску на певній місцевості. Зазвичай атмосферний тиск змінюється зі зміною висоти. Ми ж, розглядаємо випадок зміни атмосферного тиску на приблизно однакових висотах відносно рівня моря. Таку зміну можна зустріти при проходженні грозового фронту, або при неоднорідному прогріванні повітря. У випадку неоднорідного прогрівання повітря, повітряні маси мають різну температуру, а отже і різну густину. Оскільки густина повітря на певних територіях різна, отже, і різний атмосферний тиск. При проходженні грозового фронту утворюється закручування повітря. А при неоднорідності атмосферного тиску виникає вітер з дуже великими швидкостями, який при проходженні певної відстані починає підійматися вгору. Поєднання такого руху повітря і атмосферних закручувань, які вже утворилися, призводить до подальшого розвитку і підтримки смерчу. Через різницю атмосферного тиску і температури повітря смерч не згасає, і навіть може посилюватись. Лише при вирівнюванні цих факторів смерч починає звужуватися, а згодом і зовсім зникає.

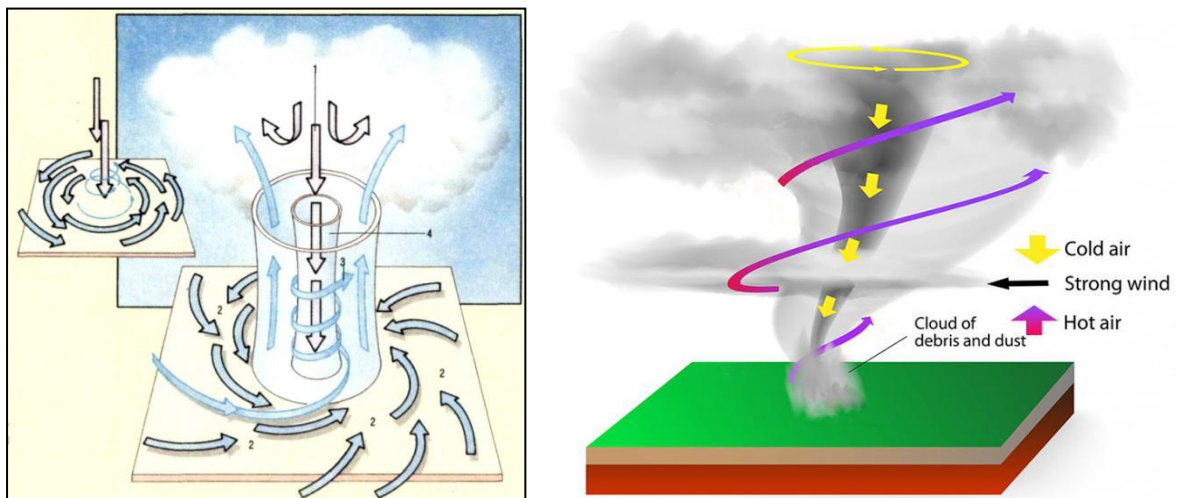


Рис. 1.2. Схема утворення смерчу [10, 12]

Також, спостерігалися випадки, коли смерчі утворювались в суперосередках, тобто у потужних конвективних комірках (моно осередках). Процес його утворення і будова сильно відрізняється від звичайних купчасто-дощових хмар. Тому це явище представляє великий інтерес для вчених. Інтерес полягає в тому, що звичайна моноосередок при певних умовах перетворюється на своєрідного «монстра», який може існувати близько 4-5 годин практично не змінюючись, будучи квазістаціонарним і генерувати всі

небезпечні явища погоди. Діаметр суперосередку може досягати 50 км і більше, а його висота часто перевищує 10 км. Швидкість висхідних потоків всередині суперосередку досягає 50 м / с і навіть більше. В результаті, часто утворюється град, діаметром 10 см і більше.

Основними факторами, необхідними для утворення суперосередку є зрушення вітру (зміна швидкості і напрямку вітру з висотою в шарі 0-6 км), наявність на низьких рівнях струминної течії і сильна нестабільність в атмосфері, коли спостерігається «вибухова конвекція». Спочатку хмара має характеристики моноосередкові з прямими висхідними потоками теплого і вологого повітря, але потім на деякій висоті спостерігається зрушення вітру і (або) струминна течія, яка починає закручувати по спіралі висхідний потік і трохи його нахилає від вертикальної осі. На першому малюнку червоною тонкою стрілкою показаний зсув вітру (струминна течія), широкою стрілкою - висхідний потік. В результаті його зіткнення із струминною течією, він починає закручуватися по спіралі в горизонтальній площині. Потім висхідний потік, обертаючись по спіралі, поступово з горизонтального перетворюється в більш вертикальний. Це можна спостерігати на другому малюнку. В кінцевому підсумку висхідний потік набуває майже вертикальну вісь. При цьому обертання триває, і воно настільки потужне, що в підсумку пробиває ковадло, утворюючи над ним купол - піднесену верхівку. Поява цього куполу свідчить про потужні висхідні потоки, які здатні пробити інверсійний шар. Ця колона, що обертається, є «серцем» суперосередку і називається мезоциклон. Його діаметр може складати від 2 до 10 км. Висока верхівка якраз свідчить про наявність мезоциклону [4, 12].

Велика тривалість життя і стабільність суперосередку пов'язана з наступним. Завдяки мезоциклону випадання опадів відбувається трохи в стороні від висхідного потоку, а отже і низхідні потоки також спостерігаються в стороні (в основному по обидва боки від мезоциклону). В такому випадку обидва потоку (низхідний і висхідний) співіснують між собою - є друзями: опускаючись вниз, перший витісняє тепле повітря вгору, а не блокує його доступ в осередок, тим самим ще більше посилюючи висхідний потік. А чим потужніший висхідний потік, тим сильніше і опади, які викликають ще більші низхідні потоки, які все сильніше витісняють приземне повітря вгору. І якщо осередок уподібнити колесу, виходить, що опади в такій ситуації, як би, це

колесо розкручують. Саме в результаті цього суперосередок здатний існувати протягом багатьох годин, розростаючись за цей час на десятки кілометрів в ширину і довжину, породжуючи великий град, сильні зливи і часто торнадо. В цей час біля поверхні землі з'являється 3 мініфронта: 2 холодних в районі низхідних потоків, і теплий в районі висхідних (рис. 1.3.).

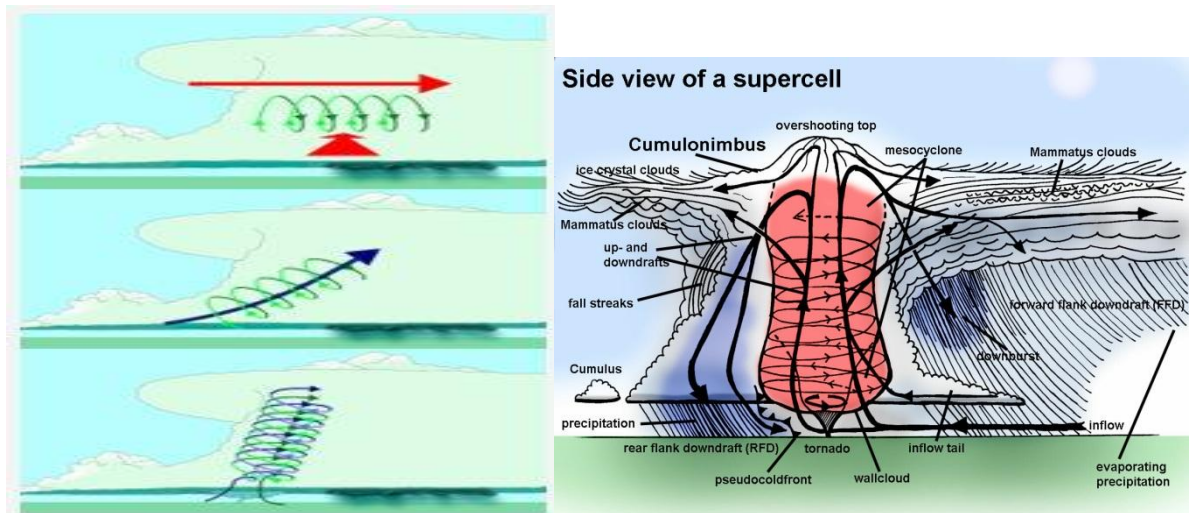


Рис. 1.3. Схема утворення та структура суперосередку [12]

Тобто з'являється невеликий циклон, «зародком» якого якраз і є той самий мезоциклон. Як було сказано вище, смерчі виникають не тільки в суперосередку, але і в звичайних моно- і мультікомірках. Однак існує головна відмінність: у суперосередку опади і торнадо спостерігаються одночасно, а в моно- і мультікомірках - спочатку смерч, а потім опади, причому в тому районі, де спостерігався смерч. Це пов'язано з відсутністю явного зсуву в просторі верхньої «кристалогенної» частини хмари, і нижньої в яку втікає тепле повітря.

Крім того, в суперосередку зазвичай над вершиною є струминна течія, яка виносить витіснене повітря геть від хмари, в результаті чого спостерігається дуже витягнуте ковадло (рис. 1.3.), тоді як у звичайному осередку витіснене теплим холодне повітря опускається по краях і тим самим додатково блокує «живлення». Тому смерчі в таких осередках короткочасні, слабкі, і рідко бувають на стадії більшою ніж воронка (funnel cloud).

2 ВИНИКНЕННЯ СМЕРЧІВ НАД УКРАЇНОЮ У 2018 Р.

2.1 Повторюваність та географічний розподіл смерчів над Україною

Щодо смерчів над територією України, то робити записи про них почали ще в давні часи. У стародавніх літописах відмічається, що в ті часи смерчі відбувалися 2-3 рази на століття. [2].

На території України з 1961 по 1990 рр. [6] зареєстровано 68 смерчів понад 30 пунктами України. Територіально смерчі локалізуються у вигляді трьох зон: одна проходить у напрямі Одеса-Харків і охоплює Запорізьку і Донецьку області (рис.2.1); друга простягається від Одеси до північних кордонів; третя виділяється на північному заході. Траєкторії скупчення смерчів розміщуються нерівномірно, окремими ділянками і відповідають положенню проходження фронтальних зон.

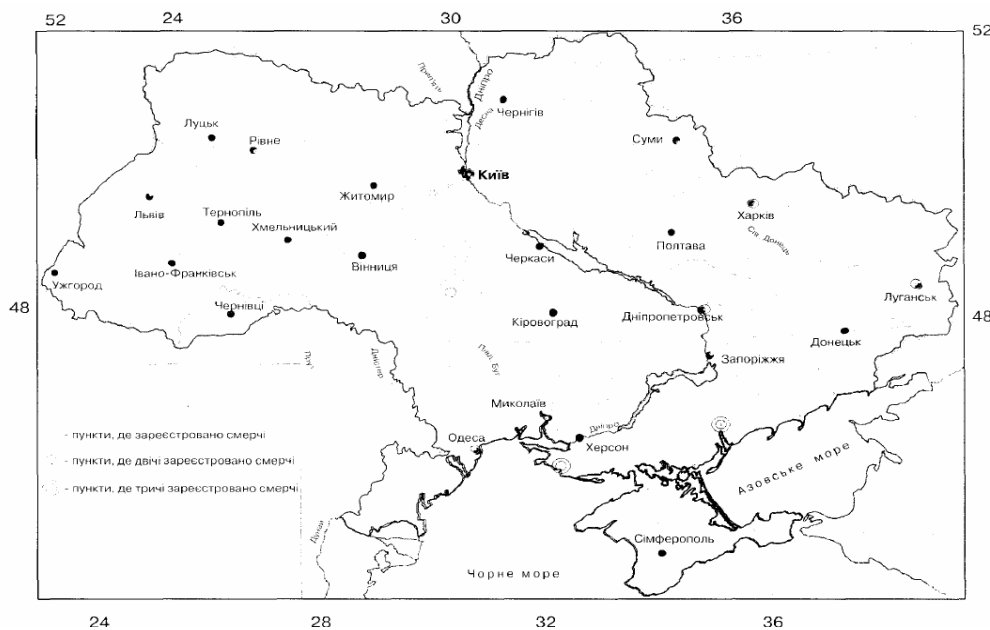


Рис. 2.1. Розподіл смерчів над Україною, 1961-1990 рр. [6]

Характер циркуляційних процесів і фізико-географічних особливостей України зумовлюють утворення смерчів у будь-якому її регіоні з 65 %-вою ймовірністю. Здебільшого вони спостерігаються у теплий період року. Найчастіше (34 %) смерчі бувають у червні-липні, менша повторюваність їх у

серпні (13 %), травні (12 %). У вересні-жовтні вони відмічаються переважно на півдні (Одеська, Херсонська області, Крим) і їх повторюваність у ці місяці становить 3-4 %.

До району з найбільшою повторюваністю (1 раз за 5 років) смерченебезпечних ситуацій слід віднести південь (Одеська, Запорізька, Миколаївська, Херсонська області). Дещо менша ймовірність (1 раз за 7 років) характерна для Київської, Волинської областей і Криму. На території Львівської, Черкаської і Донецької областей ймовірність виникнення смерчу дорівнює 10 % (1 раз за 10 років).

На території більшості областей (Чернігівська, Сумська, Рівненська, Житомирська, Хмельницька, Полтавська, Харківська, Тернопільська, Луганська, Вінницька, Івано-Франківська, Дніпропетровська, Чернівецька) смерчі спостерігаються 1 раз за 20 років (20 % ймовірність). У Кіровоградській та Закарпатській областях за розглянутий період, смерчі не зафіксовані [9].

В якості джерел вихідної інформації для дослідження використовувалися дані метеорологічних спостережень над станціями України (АРМСин) та інтерактивна база даних сайту Європейської лабораторії сильних штормів (European Severe Storms Laboratory ESSL) [14], всі випадки на вказаному ресурсі мали статус QC1, тобто були підтверджені фото- та відеоматеріалами, але не були зафіксовані на метеорологічних станціях (QC2).

Отже, за останні 20 років (1.01.1999-15.05.2019 рр.) зареєстровано 305 випадків (рис. 2.2) виникнення смерчів. Найбільш характерні вони для степової зони та центрального Полісся. Найчастіше це – південна частина України. В основному смерчі спостерігаються в теплий період року – з травня по вересень. В період з січня по травень 2019 р. над Україною вже було зафіксовано 7 явищ смерчів - п'ять з них спостерігалися в першу половину травня, а два – в квітні.

Згідно даним [14], на території України у 2018 р. включаючи півострів Крим, в 2018 р. спостерігалось 14 смерчів (табл. 2.1), більшість яких формувалася в південній частині країни (рис 2.2): АР Крим, Запорізька та Одеська області.

Також, було виявлено по одному смерчу в центральній частині України (Вінницька область) та на півночі держави (Житомирська область).

Переважно вихори спостерігалися на узбережжі Чорного та Азовського морів (10 та 2 випадки, відповідно), а також Каховського водосховища (один випадок) внаслідок розриву властивостей підстильної поверхні на межі суші та моря.

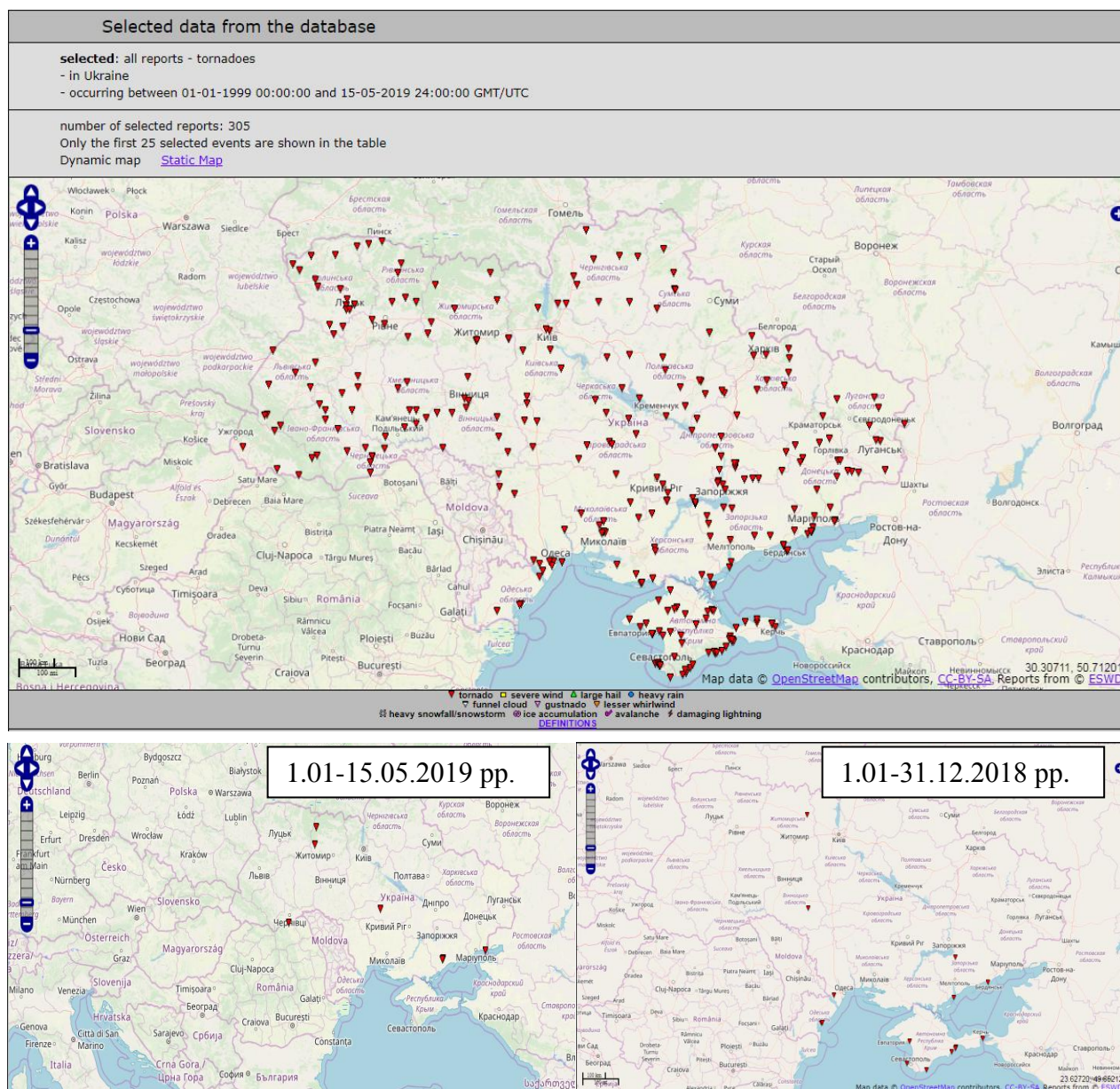


Рис. 2.2. Смерчі над територією України

Щодо сезонного ходу смерчеутворення, то як видно з рис. 2.3 та табл. 2.1, що протягом 2018 р. на території України всі смерчі спостерігаються лише в теплий період року: влітку (травень, червень) та на початку осені (вересень). Саме в цей час спостерігається достатній прогрів температури ґрунту та води. Після спаду високих позитивних температур тенденція ходу смерчеутворення

різко знижується до нуля, і крайньою датою виникнення смерчу є 11 вересня 2018 р. у Вінницької області.

Таблиця 2.1 - Дані про смерчі над територією України за 2018 рік.

№ п/п	Дата	Час, UTC	Населений пункт	Координати	
				φ, пн.ш.	λ, сх.д
1	11. 09. 2018	15:00	Ладижин Вінницька область	48.64	29.27
2	06. 09. 2018	17:00	Феодосія, АРК	45.05	35.45
3	06. 09. 2018	17:00	Феодосія, АРК	45.03	35.42
4	06. 09. 2018	06:00	Коктебель, АРК	44.93	35.28
5	25. 07. 2018	09:00	Ялта, АРК	44.45	34.22
6	19. 07. 2018	15:00	Широке, Запорізька область	47.40	35.42
7	16. 07. 2018	10:30	Бердянськ, Запорізька область	46.75	36.79
8	03. 07. 2018	13:00	Теплодар, Одеська область	46.43	30.34
9	02. 07. 2018	06:30	Кирилівка, Запорізька область	46.37	35.37
10	30. 06. 2018	09:00	Севастополь, АРК	44.62	33.41
11	28. 06. 2018	23:30	Діброва, Житомирська область	50.91	29.22
12	25. 06. 2018	04:00	Керч, АРК	45.30	36.56
13	17. 06. 2018	11:00	Приморське, Одеська область	45.70	29.83
14	13. 05. 2018	12:00	Олянка, АРК	45.22	33.51

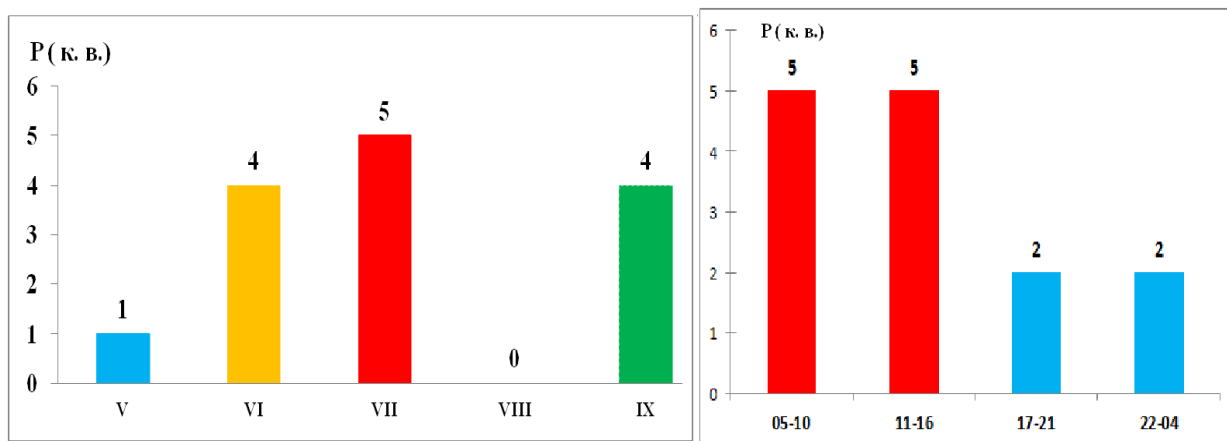


Рис. 2.3. Річний та добовий хід виникнення смерчів над Україною у 2018 р.

Найчастіше смерчі спостерігаються у ранкові та денні години (10 випадків або 70 %), вночі було лише два вихорі над АРК та Житомирською областю. Ввечері (від 17 до 21 год.) смерчі виникали двічі 4 рази над Кримським півостровом.

Отже, над Україною у 2018 р. смерчі частіше виникали у першій половині доби червня та липня, тобто режим їх утворення суттєво не відрізнявся від режиму, який спостерігався в попередні роки [5-9].

2.2 Синоптичні умови виникнення смерчів.

З [2-5, 7-10] відомо, що утворенню смерченебезпечної хмарності, сприяє перегрів повітря у приземному шарі на невеликих площах порівняно з навколишнім простором. В [2-4] виділяють п'ять метеорологічних та синоптичних ознак, які сприяють утворенню смерчів:

1. Наявність динамічного фактора, який забезпечує підйом теплого та вологого повітря нижньої тропосфери вгору, що має місце у зонах хвилеутворення, циклонах, на атмосферних фронтах та на розділах повітряних мас з різною вологістю.

2. Велика конвективна нестійкість в атмосфері, яка характеризується вертикальними градієнтами температури, значно більшими волого-адіабатичних.

3. Сильні, з великим вертикальним зсувом, південно-західні вітри у середній та верхній тропосфері (наявність потужної струминної течії) та існування у приграничному шарі атмосфери струминної течії нижніх рівнів, які мають південно-східний та південний напрямок.

4. Потік з півдня та південного-сходу вологого повітря в шарі земля-1000 м. та сухого повітря з заходу та південного-заходу в шарі 1000-2000 м.

5. Наявність затримуючого шару вище приграничного шару, внаслідок чого утворення потужних купчасто-дощових хмар відбувається «вибуховим» способом.

Аналіз можливості формування смерчу проводиться за тими ж вихідними матеріалами, які необхідні для оцінки розвитку систем глибокої конвекції і виникнення мезовихорів.

Смерчі утворюються в зонах активної конвекції в циклонах, що поглиблюються, на холодних фронтах, що загострюються, перед ними і під великими тропосферними депресіями. Приклад найтипівшої синоптичної ситуації, при якій утворюється смерч, представлений на рис. 2.4. Вузькі зони добре вираженої конвергенції в граничному шарі атмосфери і значне подовжнє завихрення (на порядок вище навколишніх районів) в дуже нестійкій атмосфері свідчить про можливість виникнення смерчу.

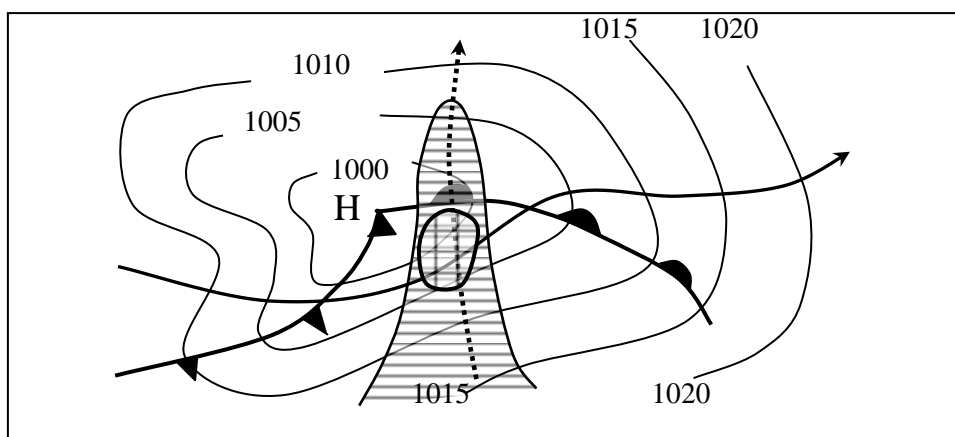




Рис. 2.4. Синоптична ситуація, сприятлива для утворення смерчу [4]:

- - струминна течія нижніх рівнів;
- ⋯→ - струминна течія верхньої тропосфери;
-  - «язик» вологого повітря;
-  - район найбільш вірогідного утворення смерчів.

З аналізу описів шквалів та смерчів, що проводилися в УкрГМЦ, виявлено ряд додаткових ознак, які характерні для синоптичних ситуацій при яких спостерігались смерчі на території України [13, 16]:

1. Атмосферний тиск на поверхні землі 995-1000 гПа; падіння тиску у теплому повітрі та ріст у холодному – 3-5 гПа/3 год.
2. Контрасти температур у фронтальній зоні біля земної поверхні перевищує 8-10 °С/300 км, а в шарі 500-1000 гПа -18-20 дам/1000 км.
3. Сходимість ізогіпсів вздовж потоку в середній тропосфері.
4. Перед виникненням смерчів у денні години часто спостерігаються високі температури повітря, які переважно досягають 25-30 °С.
5. Найчастіше смерчі виникають при:

- 5.1. переміщенні через територію України циклонів з південного заходу та півдня;
- 5.2. розташуванні осі висотної улоговини на АТ-500 на схід від меридіану 10° сх.д.,
- 5.3. розміщенні над Скандинавією циклонів, які простежуються до висоти 5-9 км;
- 5.4. південно-західній та південній орієнтації ВФЗ, та навіть наявності аномально орієнтованої південно-східної ВФЗ.

6. Верхня межа хмарності за даними МРЛ 9-13 км. та може досягти 15-17 км, перевищуючи нижню межу тропопаузи. Нижня межа хмарності найчастіше фіксується висотою 200-300 м.

7. Вологонасиченість повітря біля поверхні землі 10-15 г/кг.

8. Наявність струминної течії нижніх рівнів, що орієнтована перпендикулярно атмосферному фронту.

9. У більшості випадків на знімках штучних супутників землі (ШСЗ) з деякою завчасністю можна виявити осередок яскравої та щільної хмарності з викидами перистої хмарності у напрямку повітряного потоку в середній тропосфері в середній тропосфері та наявність струминної течії з холодної сторони, що вказує на відділення хмарного осередку від фронтальної хмарності та може бути ознакою формування самостійного мезоциклону з власною циркуляцією. Найчастіше хмарні осередки мають форму коми або підкови та дуже швидко збільшуються.

2.3 Аналіз синоптичних та метеорологічних умов виникнення смерчів над Одеською областю влітку 2018 р.

На території Одеської області за 2018 рік спостерігалось два смерчі. Перше явище було зафіксовано 17 червня 2018 року, о 11 годині ранку, поблизу села Приморське (рис. 2.5). Згідно з даними Європейської бази даних про шторми [14] смерч утворився на поверхні води, спостерігалось утворення смерченебезпечної хмарності, також явище супроводжувалося зливовим дощем і загальна його тривалість становила 30 хвилин.



Рис. 2.5. Смерч поблизу с. Приморське, Одеській області.
17 червня 2018 р., 11.00 [13]

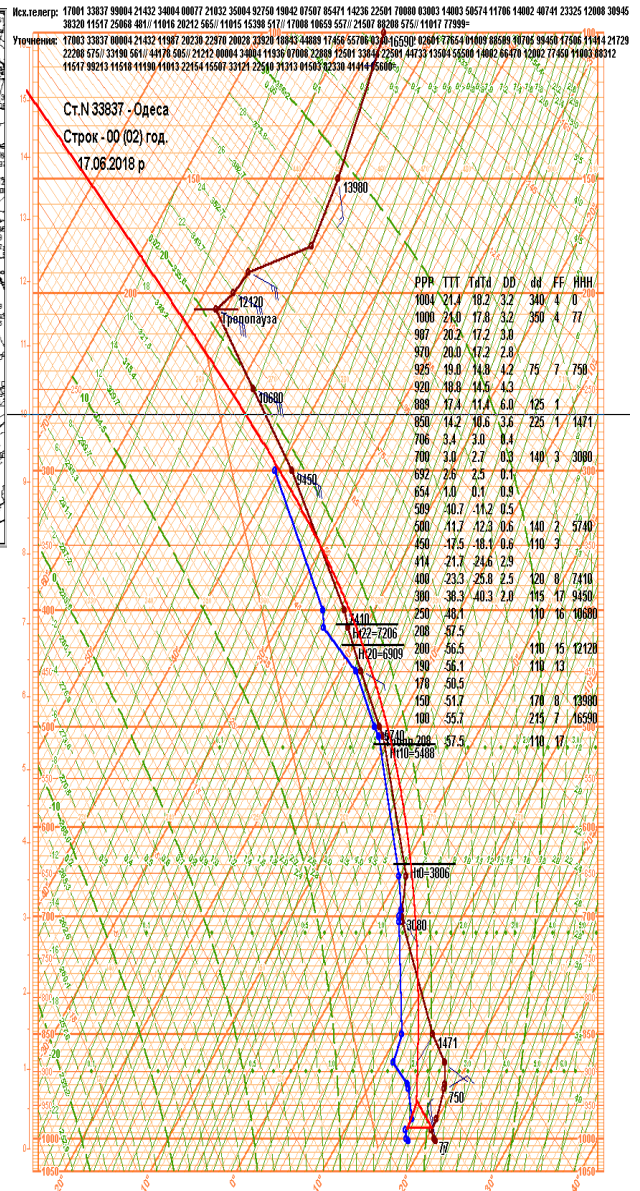
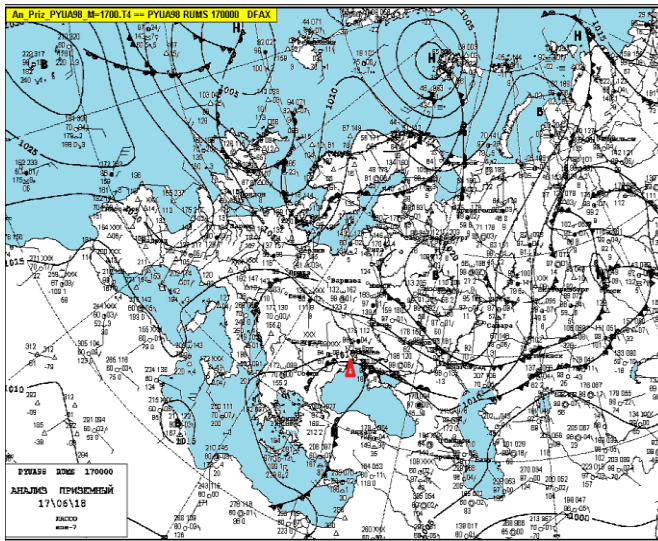
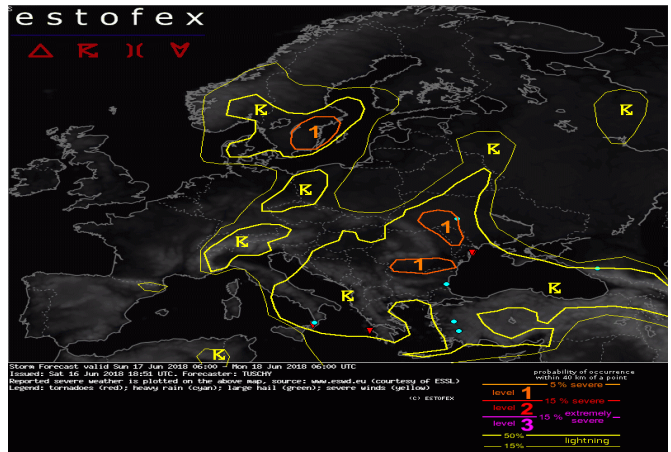
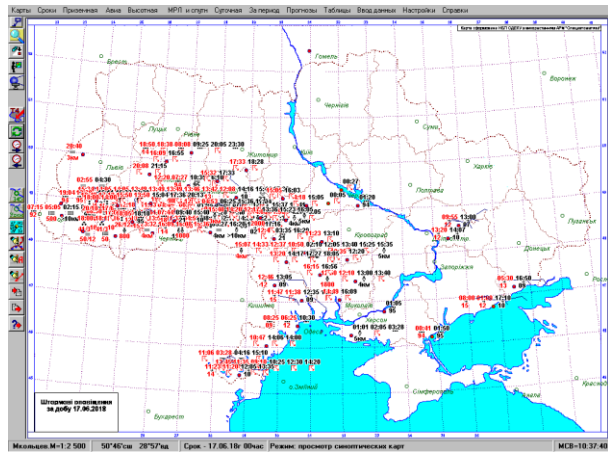
У другій половині доби 17 червня 2018 р. (рис. 2.6) над південним заходом України спостерігалася активна грозова діяльність через проходження оклюдованої ділянки полярного фронту, яка у 00 UTC розміщувалася над півднем України з точкою оклюзії в районі Кримського перешийка.

Південь України у 00 UTC знаходився під впливом обширної баричної улоговини над Туреччиною, атмосферний тиск над Одещиною коливався від 1009 до 1012 гПа.

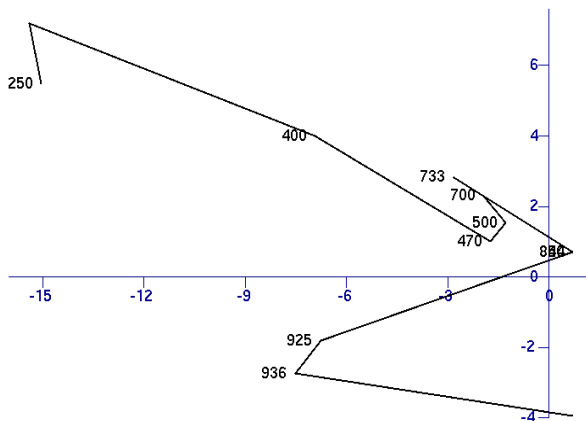
Якщо проаналізувати готовність атмосфери до розвитку конвекції за даними радіозонду над Одесою (00 UTC), то можна помітити нестійку стратифікацію атмосфери у шарі від 2,4 до 8,5 км та поворот вітру від північно-західного біля землі до південно-східного на висоті 1,2 км, тобто годограф вказує на можливість розвитку завихореності.

Ресурс [15] прогнозував високу імовірність розвитку небезпечних конвективних явищ через утворення зростаючих хмарних кластерів над Молдовою та півднем Румунії, а над та півднем Одещини передбачав можливість виникнення граду або смерчів.

У наступні 12 годин спостерігалася утворення ліній конвергенції над Чорним морем (рис. 2.7) у межах висотної улоговини на рівні 500 гПа, яка простягалася від Скандинавії до Балканського півострова та Чорного моря, та поглиблювалася з утворенням замкненого центру над центром України.



33837 UKOO Odessa



00Z 17 Jun 2018

University of Wyoming

Рис. 2.6. Карта штормових оповіщень над Україною за добу та карта прогнозу небезпечних явищ на 17 червня 2018 р., приземний аналіз, радіозонд та годограф над Одесою за 00 UTC

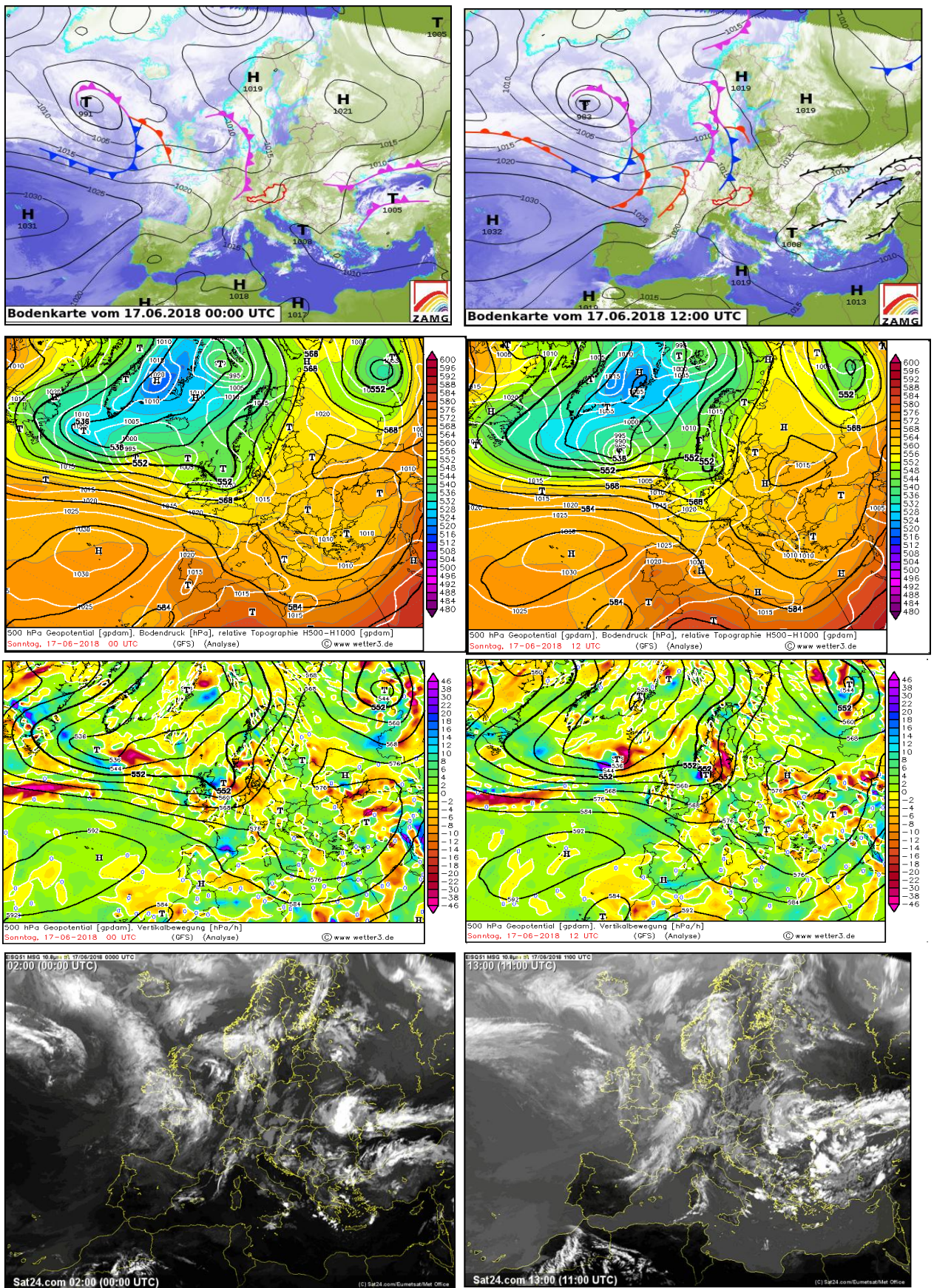


Рис. 2.7. Приземний аналіз [21], ВТ 500/100, АТ-500, карта вертикальних рухів [20] та хмарність за 00 та 12 UTC 17.06.2018 р.

В межах вказаної відносно холодної баричної улоговини спостерігалися в 00 UTC окремі осередки висхідних рухів, один з яких чітко виявлявся Молдовою та Чорноморським узбережжям півдня Одещини та Кримським перешийком (точка оклюзії), які посилюлися у полудень.

Решта території України знаходиться під дією гребеню антициклону, який спостерігається над Європейською територією Росії. Ця область підвищення тиску пов'язана з впливом Азорського антициклону на територію Європи, та на її периферії спостерігається загострення фронтального розділу.

На супутникових знімках за 00 та 11 UTC над півднем України наявна купчасто-дощова хмарність, яка зростає впродовж першої половини доби. На карті хмарності за даний строк спостерігається розвиток потужної купчасто-дощової хмарності і збільшення її в розмірах. Вона розташована чітко над територією виникнення смерчу.

Щодо індексу нестійкості CAPE (рис. 2.8), то найбільших значень він досягає над територію Чорного моря (1600 Дж/кг), та над центральною Україною (1800 Дж/кг). В районі виникнення смерчу індекс CAPE не перевищує значення 600 Дж/кг, що відповідає слабким зливовим опадам.

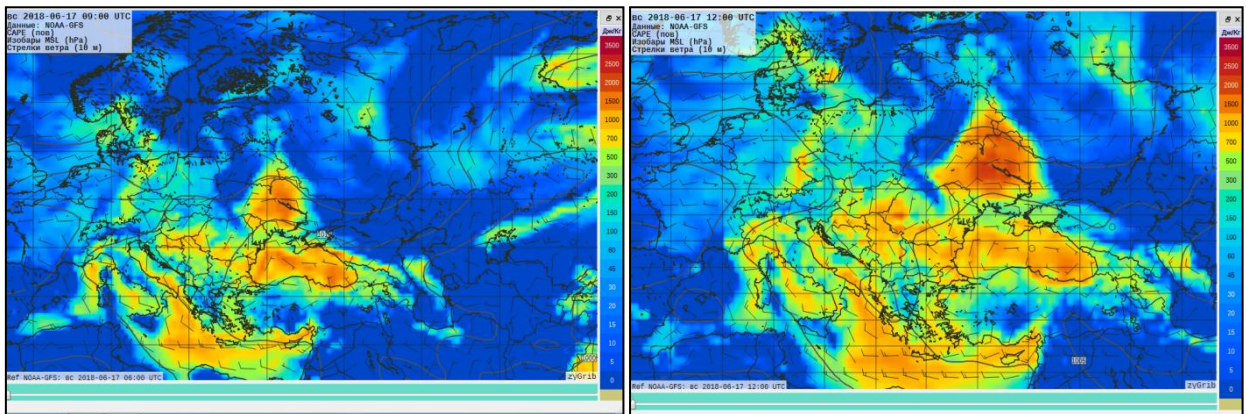


Рис. 2.8. Розподіл індексу CAPE за 09 та 12 UTC 17.06.2018 р.

Аналізуючи карти за 12:00 UTC, можна сказати, що приземний тиск в момент виникнення смерчу становить 1010 гПа. Також спостерігається ріст атмосферного тиску на 2 гПа/3 год. Температура повітря перед виникненням смерчу становила 21°C.

Щодо індексу CAPE, то найбільші його значення за 14:00 UTC над територією Чорного моря змістились більш південніше та досягають

1700 Дж/кг. В той час як над центральною Україною положення індексу не змінилось, збільшився радіус його поширення та інтенсивність - 2300 Дж/кг.

Використовуючи архів продуктів наукастингу з ресурсу [18] можна відстежити розвиток та властивості хмарності напередодні смерчу з дискретністю за часом 15 хв (рис. 2.9).

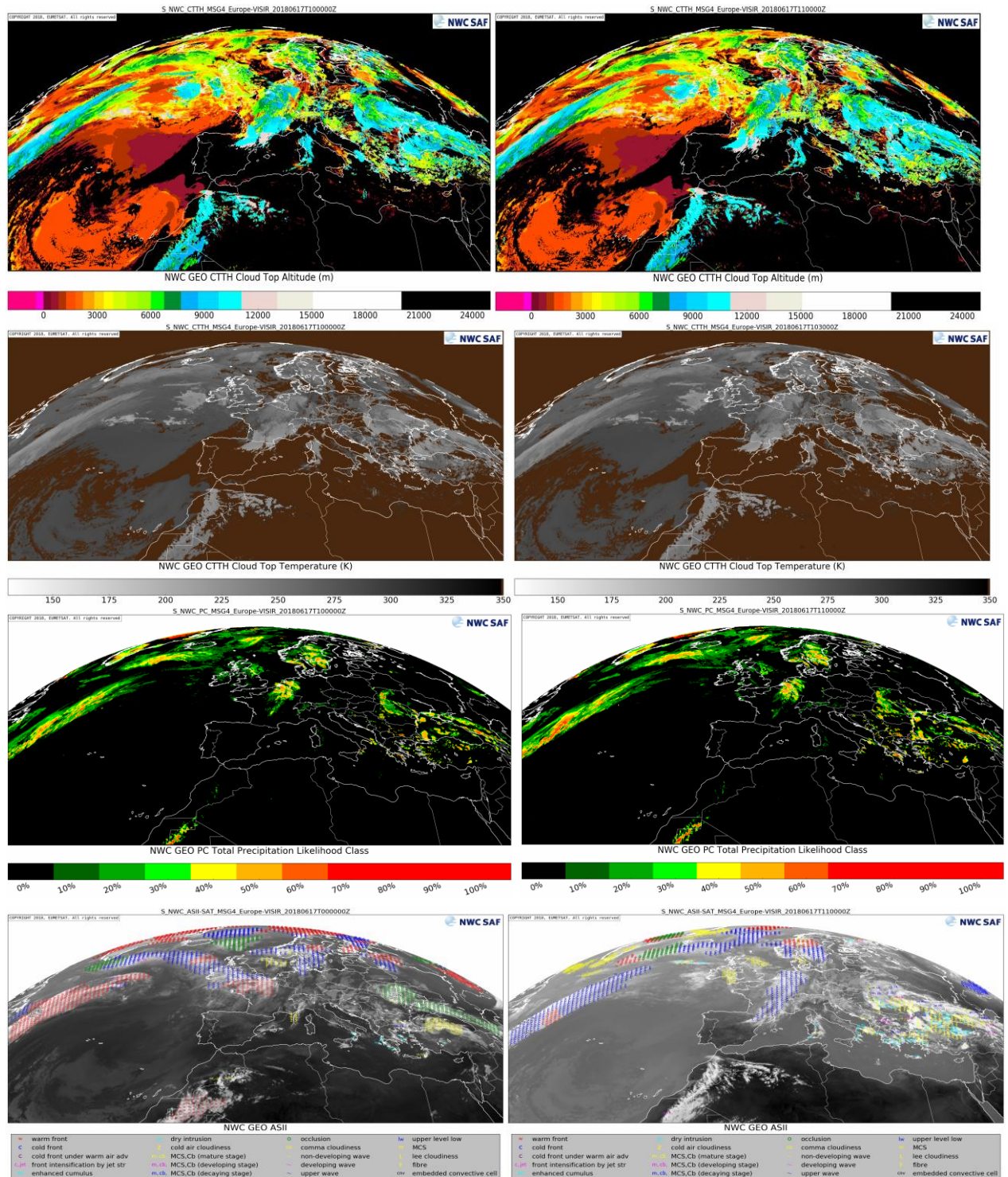


Рис. 2.9. Карти висоти та температури (СТТН) верхньої межі хмарності, характеру опадів з хмарності (TPLC) та інтерпретації хмарності за 10 та 11 годин 17.06.2018 р.

Так, вже в 10 годин за місцевим часом конвективна хмарність над півднем України досягала 9-10 км, та впродовж наступної години зростала та утворився окремих хмарний осередок у місце майбутнього смерчу. Температура верхньої межі цього утворення знизилася до 200 К або $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$, отже склалися умови для розвитку небезпечних конвективних явищ (град, смерч та ін.). Цей об'єкт добре визначається на карті хмар, з яких спостерігаються опади, у вигляді скупчення хмар з 3-4 осередками з 90 % імовірністю опадів.

Автоматична інтерпретація хмарності (продукт ASII NWP) підтверджує наявність фронту оклюзії над півднем України в 10 годин місцевого часу та утворення мезомасштабних купчасто-дощових хмар та хмар холодної повітряної маси в 10.30-11.00.

Отже, смерч 17 червня 2018 р. утворився в термічно нестійкої повітряної масі через розвиток та збереження з 9 до 12 годин мезомасштабного конвективного комплексу біля узбережжя півдня Одеської області.

Інший смерч був зафіксований 03 липня 2018 року, о 13 годині, поблизу міста Теплодар. Згідно з даними Європейської бази даних про шторми (ESWD) [19] смерч утворився на суші (рис. 2.10.), спостерігалось утворення смерченебезпечної хмарності, також явище супроводжувалося слабким або помірним дощем.



Рис. 2.10. Смерч поблизу м. Теплодар 03 липня 2018 року [22].

Напрямок руху цього шторму – західний, південно-західний, східний північно-східний. В цьому випадку спостерігається утворення воронкоподібних хмар (funnel cloud). У другі половині доби 3 липня 2018 р. (рис. 2.11) над північною Одеської області спостерігалися зливові опади та гроза у 12.30-13.00.

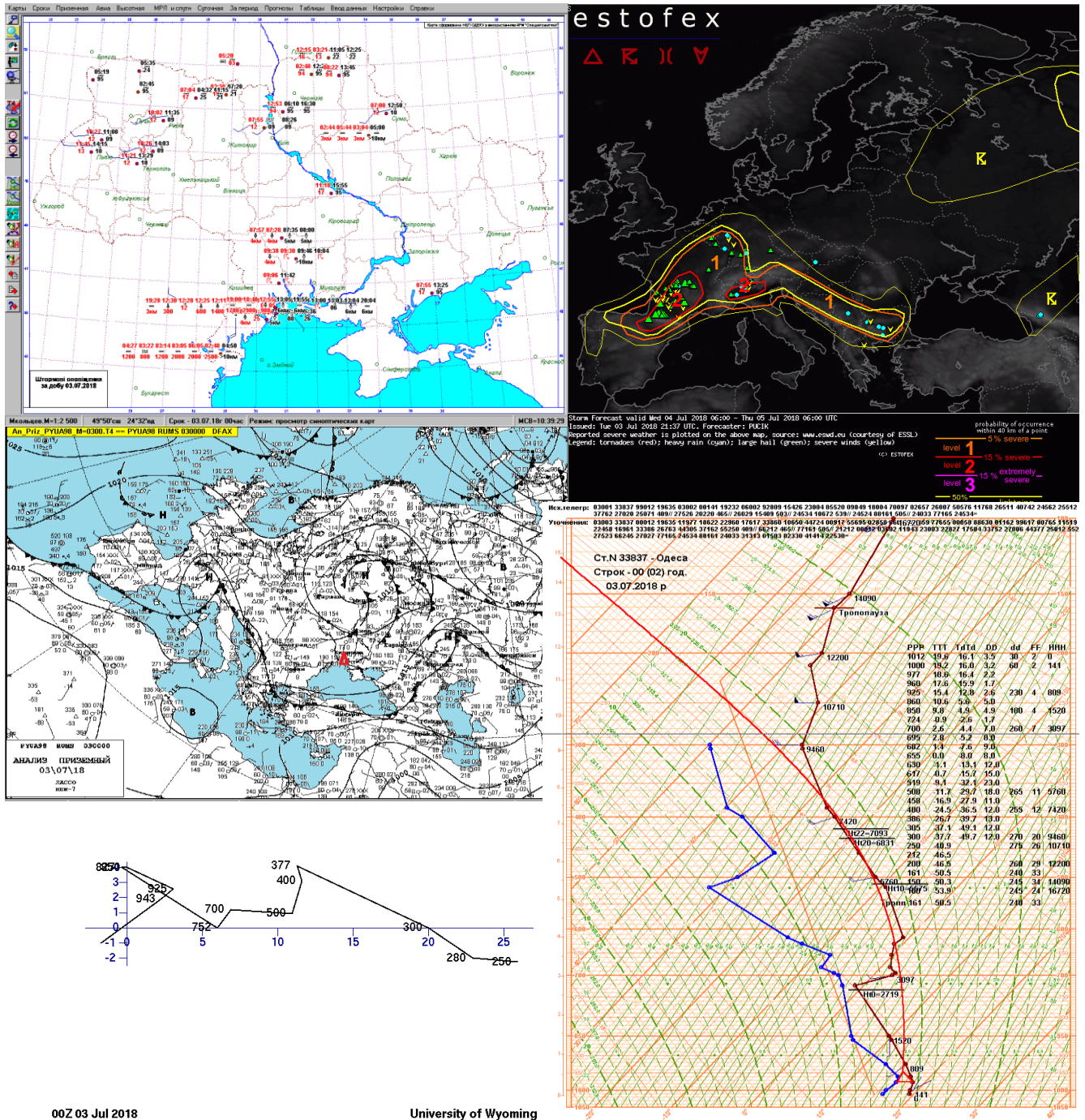


Рис. 2.11. Карта штормових оповіщень над Україною за добу та карта прогнозу небезпечних явищ на 3 липня 2018 р., приземний аналіз, радіозонд та годограф над Одесою за 00 UTC

Приземний аналіз у 00 UTC не виявляв проходження фронтальних розділів над Одеською областю, погодні умови якою визначалися тиловою частиною циклону з центром над територією Білорусі та Європейською частиною Росії з мінімальним тиском в 1010 гПа. Холодні ділянки арктичного фронту розмивалися над центральними районами України, а полярний фронт розташовувався на південному узбережжі Чорного моря.

Південь України у 00 UTC знаходився під впливом обширної баричної улоговини, а атмосферний тиск над Одещиною коливався від 1014 до 1016гПа.

За даними радіозонду над Одесою (00 UTC), можна також виявити нестійку стратифікацію атмосфери у шарі від 600 м до 3,5 км та поворот вітру від північно-східного біля землі до південно-західного на висоті 700 км, тобто зсув вітру сильніше ніж у першому випадку, але годограф не вказує на можливість розвитку завихореності.

Ресурс [18] не прогнозував імовірність розвитку небезпечних конвективних явищ півднем Одещини, лише визначив можливість їх вдовж лінії полярного фронту та над центром циклону над ЄТР.

Аналізуючи приземний аналіз за 12:00 UTC (рис. 2.12) утворення лінії конвергенції над Молдовою та посилення хмарності. Згідно з висотною картою АТ 500 територія України перебуває в зоні дії баричної улоговини з висотним холодним центром над північними районами України, який зберігав своє розташування.

В межах вказаної холодної баричної улоговини спостерігалось в 00 та 12 UTC утворення смуг висхідних та низхідних вертикальних рухів. Так, в 00 UTC над районом виникнення смерчу була смуга висхідних потоків, а вже в 12 UTC там розташовувалася пара вертикальних рухів протилежного знаку, тобто могли скластися умови для розвитку вихорю з горизонтальною віссю.

Аналіз супутникових знімків наявність купчастої та купчасто-дощової хмарності, але хмарний осередок, що спостерігався в 04 UTC (6 годин) у момент близький до виникнення смерчу, трансформувалася у дещо меншу хмару та хмарну смугу.

За 03 липня 2018 р. о 11:00 UTC індекс CAPE на територію України слабо виражений майже над усією країною з максимальним значенням 100 Дж/кг (рис. 2.13).

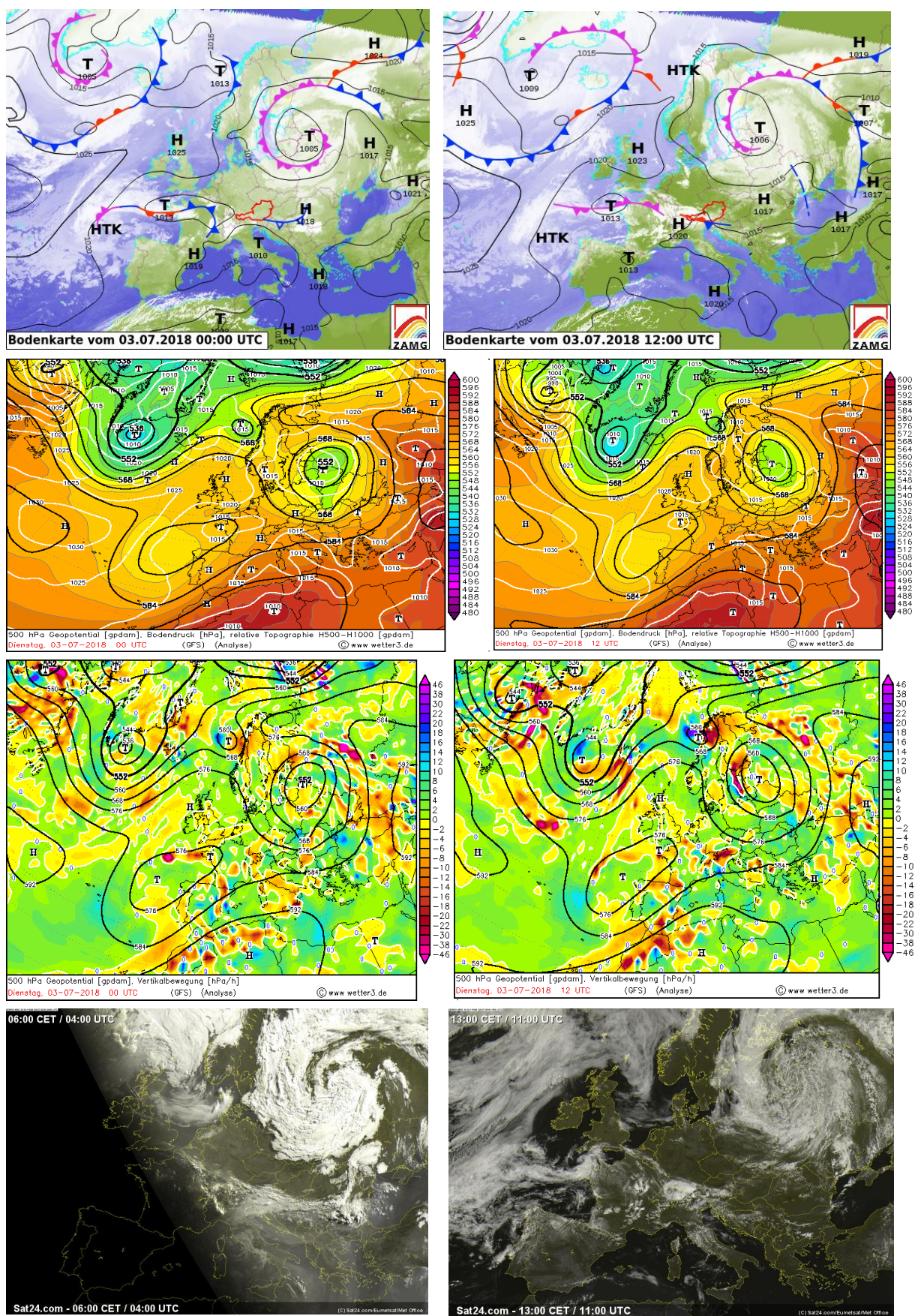


Рис. 2.12. Приземний аналіз [21], ВТ 500/100, АТ-500, карта вертикальних рухів [20] та хмарність за 00 та 12 UTC 3.07.2018 р.

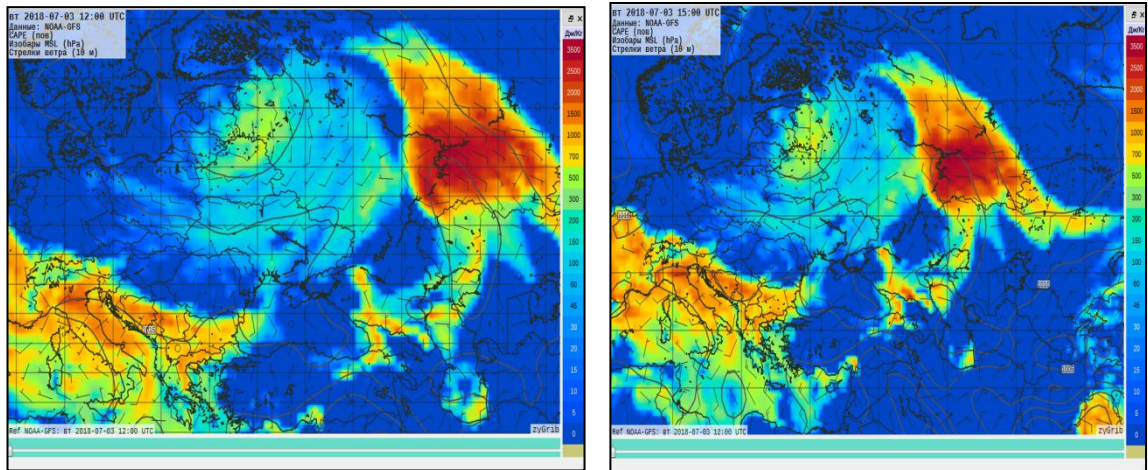


Рис. 2.13. Розподіл індексу CAPE за 12 та 15 UTC 03.07.2018 р.

На приземній карті погоди виявлено, що центр циклону майже не змінив свого положення. Атмосферний тиск в центрі виріс до 1006 гПа. Вся Південно-Східна частина України знаходиться під впливом антициклонічного гребеню з тиском 1015–1017 гПа.

В місці виникнення смерчу спостерігається атмосферний тиск 1016 гПа., за останні 3 години тиск не змінився. На момент виникнення явища температура повітря складала 26°C.

В даний строк відмічається розмивання смерченебезпечної хмарності над всією територією України. В основному спостерігається шарувато-купчаста хмарність, і лише місцями купчасто-дощова (рис. 2.12).

Над центральною частиною України та над Одеською областю спостерігається лінія нестійкості, а разом з нею потужна купчасто-дощова хмарність. Це явище також відмічено і на карті приземного аналізу.

Індекс CAPE, на 14 UTC посилюється, в порівнянні з 11:00 UTC (рис. 2.13). Він займає лівобережну Україну та частину правобережної (Полтавська, Харківська, Сумська, Донецька, Луганська області). Також підвищилось значення до 200 Дж/кг, місцями 300 Дж/кг.

Щодо висоти верхньої межі хмар за архівом продуктів наукастингу з [21], то ця характеристика не перевищувалася 3500-4000 м, хмарна маса складалася з хмар середнього ярусу та купчасто-дощових.

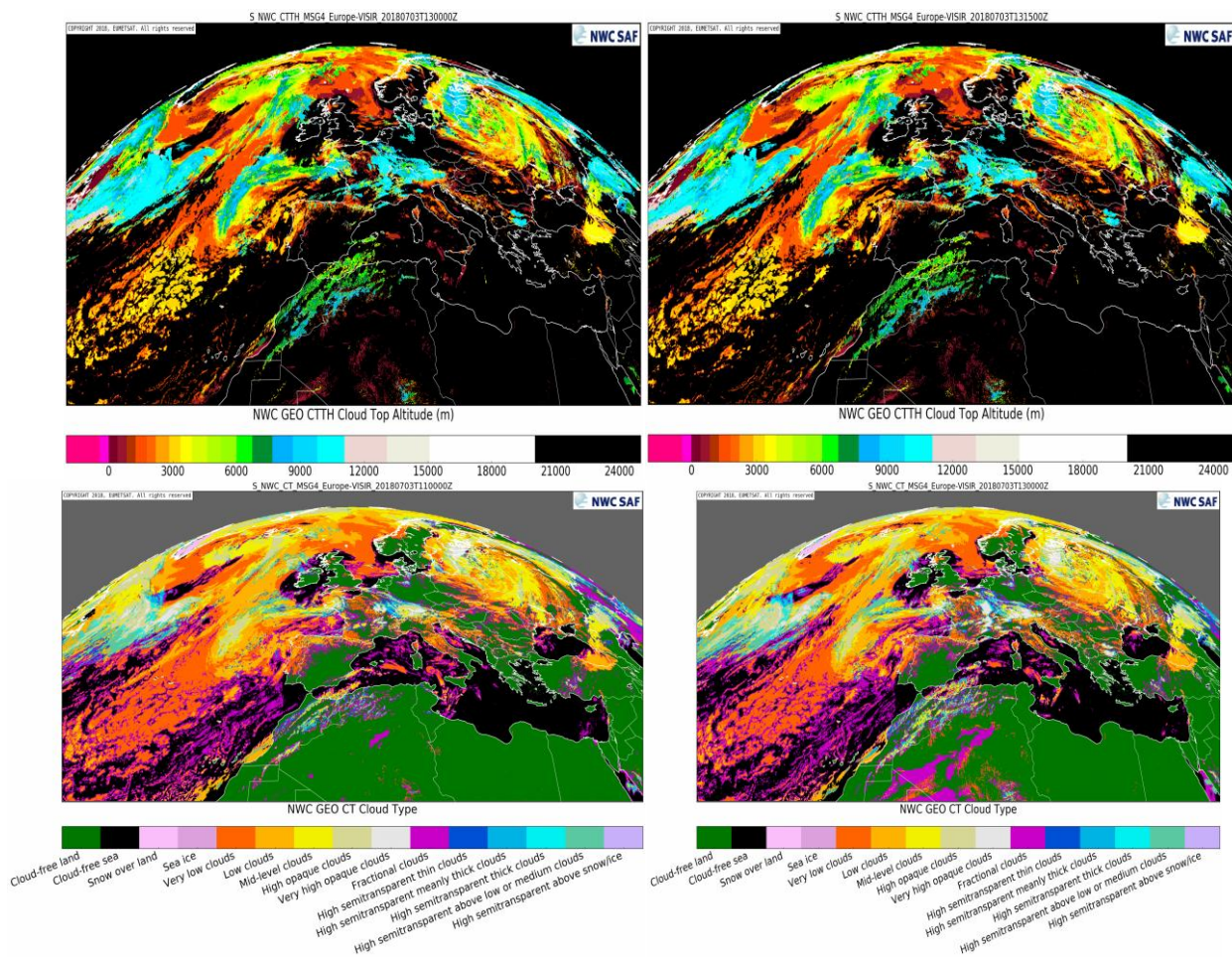


Рис. 2.14. Карти висоти (СТТН) верхньої межі хмарності та типу хмарності за 13.00 та 13.15 годин 3.07.2018 р.

Отже, смерч 3 липня 2018 р., можливо, виник в термічно нестійкій повітряній масі через формування зони з інтенсивними потоками протилежного напрямку без утворення мезомасштабного конвективного комплексу.

3 ТЕРМОДИНАМІЧНІ УМОВИ УТВОРЕННЯ СМЕРЧІВ

3.1 Індeksi нестійкості атмосфери та її готовності до розвитку суперосередків

В даний час в деяких прогностичних моделях погоди для прогнозу розвитку грози, граду, шквалу та інших небезпечних явищ погоди, обумовлених розвитком конвекції, практикується використання значень індексів, що характеризують конвекцію за низкою параметрів [4,17].

Кількісні значення індексів нестійкості, що розраховані на основі даних аерологічних зондування, дозволяють визначити потужність конвекції і, як наслідок, ймовірність розвитку того чи іншого небезпечного конвективного явища в альтернативних прогнозах.

Одним з найбільш часто використовуваних індексів є така характеристика потужності нестійкого шару, як конвективна потенційна енергія. Її досить ефективно відображає індекс CAPE (Convective Available Potential Energy), який розраховується за формулою:

$$CAPE = g \int_{LFCT}^{EL} dz * (Ti - Te) / Te, \quad (3.1)$$

де, T_i – температура частки повітря, T_e – температура навколишнього повітря, g – прискорення вільного падіння, $LFCT$ – рівень конденсації, EL – рівень конвекції.

Загальний запас енергії нестійкості в атмосфері CAPE знаходиться як алгебраїчна сума енергій нестійкості окремих шарів від рівня конденсації до рівня конвекції.

Більш високі значення енергії нестійкості вказують на більш інтенсивну конвекцію в хмарі, тобто на більш небезпечні явища погоди. Енергія нестійкості або індекс CAPE є незмінним предиктором в прогнозі небезпечних явищ, пов'язаних з конвекцією. Високий рівень потенційної енергії атмосфери є неодмінною умовою того, що піднімається частка досягне значно більших

висот, ніж рівень вільної конвекції, а, отже, збільшується небезпека розвитку таких явищ погоди як гроза і град.

Аналіз значень цього індексу в конвективній атмосфері дозволить кількісно оцінити ступінь розвитку конвекції і ймовірність утворення грози і граду (табл. 3.1).

Індекси нестійкості K_i - індекс нестійкості або число Вайтінга (W). Розрахунок K_i заснований на вертикальному градієнті температури, вологості повітря в нижній тропосфері, а також враховує вертикальну протяжність вологого шару повітря. K_i характеризує ступінь конвективної нестійкості повітряної маси, яка необхідна для виникнення і розвитку гроз:

$$K_i = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - \Delta Td_{700}, \quad (3.2)$$

де K_i – індекс нестійкості (число Вайтінга), T_{850} – температура повітря на ізобаричній поверхні 850 гПа, T_{500} – температура повітря на 500 гПа, Td_{850} - точка роси на 850 гПа, ΔTd_{700} - дефіцит точки роси на поверхні 700 гПа.

Індекс K_i краще за все використовувати влітку для прогнозування внутрішньомасових гроз. Порогові значення з табл. 3.2 можуть змінюватися залежно від сезону, географії та синоптичної ситуації.

Наступний індекс нестійкості, це вертикальний індекс VT (Vertical Totals):

$$VT = T_{850} - T_{500}, \quad (3.3)$$

де T_{850} - температура повітря на ізобаричній поверхні 850 гПа, T_{500} - температура повітря на 500 гПа. Якщо $VT > 28$ °С, то тропосфера має високий потенціал конвективної нестійкості, який достатній для утворення гроз.

Далі, індекс СТ - Cross Totals:

$$CT = Td_{850} - T_{500}, \quad (3.4)$$

де Td_{850} - точки роси на 850 гПа, T_{500} - температура повітря на 500 гПа.

На основі двох попередніх індексів (VT та СТ) складається підсумковий індекс TT – (Total Totals):

$$TT = VT + CT, \quad (3.5)$$

де СТ - Cross Totals індекс, VT - Vertical Totals індекс.

Таблиця 3.1 – Інтенсивність конвективних явищ за CAPE

CAPE, Дж/кг	Очікувана ситуація
400-1000	невелика нестійкість (C _u , C _b , слабкі зливові опади)
1000-2500	помірна нестійкість (C _b зі зливами, грози)
2500-3500	сильна нестійкість (грози, місцями сильні)
> 3500	дуже сильна нестійкість (сильні і дуже сильні грози, смерчі)

Таблиця 3.2 – Порогові значення індексу нестійкості Вайтінга

Значення K _i	Що очікується	Співвідношення площі, де очікують грозу до території за якою складено прогноз, %
< 20	без гроз	-
20-25	окремі ізольовані грози	10-20
25-30	кілька гроз	20-50
30-35	розсіяні грози	50-70
35-40	численні грози	> 70
> 40	грози повсюдно	100

Таблиця 3.3 – Інтенсивність конвективних явищ за СТ

Значення СТ	Очікувана ситуація
< 18	Тропосфера володіє низьким потенціалом конвективної нестійкості, який недостатній для грозової діяльності
18-19	Помірна нестійкість. Слабка грозова діяльність
20-21	Висока нестійкість. Грози.
22-23	Енергія нестійкості при якій можливі сильні грози.
24-25	Висока енергія нестійкості. Сильні грози.
> 25	Дуже висока енергія нестійкості. Дуже сильні грози.

Таблиця 3.4 – Інтенсивність конвективних явищ за ТТ

Значення ТТ	Очікувана ситуація
< 44	Гророва діяльність не можлива
44-45	Окрема гроза або кілька гроз
46-47	Розсіяні грозові осередки
48-49	Значні кількість гроз, окремі з яких сильні.
50-51	Розсіяні сильні грозові осередки, окремі осередки зі смерчем
52-55	Значна кількість вогнищ сильних гроз, окремі осередки зі смерчем
> 55	Численні сильні грози з сильними смерчами

Метеорологами ВПС США (1994 р.) був розроблений комплексний критерій для діагнозу і прогнозу небезпечних і стихійних явищ погоди, пов'язаних з конвективною хмарністю – індекс нестійкості SWEAT – (Severe Weather ThrEAT), який містить в себе індекс нестійкості повітряної маси, швидкість і зсув вітру.

$$SWEAT=12 \times Td_{850} + 20 \times (TT - 49) + 3.888 \times F_{850} + 1.944 \times F_{500} + (125 \times (D_{500} - D_{850}) + 0.2) \quad (3.6)$$

де Td_{850} - точка роси на 850 гПа ($^{\circ}\text{C}$), TT - Total Totals індекс, F_{850} - швидкість вітру (м/с) на 850 гПа, F_{500} - швидкість вітру (м/с) на 500 гПа, D_{500} і D_{850} - напрямок вітру (град.) на відповідних поверхнях.

Другий член рівняння буде дорівнювати 0, якщо $TT \leq 49$. Останній доданок у формулі буде рівнятися нулю, якщо не виконується будь-яке з наступних умов:

- D_{850} в діапазоні від 130 до 250 градусів;
- D_{500} в діапазоні від 210 до 310 градусів;
- різниця в напрямку вітру ($D_{500} - D_{850}$) > 0 ;
- F_{850} і F_{500} швидкості вітру ≤ 7 м/с.

Індекс підйому Li (Lifted index) - Різниця температур навколишнього повітря і деякого одиничного обсягу, який піднявся адіабатично від поверхні землі (або з заданого рівня) до рівня 500 гПа. Li розраховується з урахуванням залучення навколишнього повітря.

Таблиця 3.5 – Інтенсивність конвективних явищ за SWEAT

Значення SWEAT	Очікувана ситуація
< 250	немає умов для виникнення сильних гроз
250-350	сильні грози, град і шквали
350-400	дуже сильні грози, великий град та сильні шквали
> 400	дуже сильні грози, великий град, сильні шквали, сильні смерчі

Індекс L_i характеризує термічну стратифікацію атмосфери по відношенню до вертикальним переміщенням повітря. Якщо $L_i > 0$, то атмосфера (у відповідному шарі) стійка. Якщо значення $L_i < 0$, то атмосфера нестійка.

Таблиця 3.6 – Інтенсивність конвективних явищ за індексом L_i

Значення L_i	Очікувана ситуація
≥ 6	Глибока інверсія. Атмосфера дуже стійка. Розвинені низхідні рухи повітря
1...5	Стійкий стан атмосфери. Купчасті хмарність гарної погоди.
-2...0	Невелика нестійкість. Конвективна хмарність зі зливами, при інтенсивному денному прогріванні або в зоні атмосферного фронту - з грозами та градом.
-5...-3	Помірна нестійкість. Сильні грози
$\leq - 6$	Висока нестійкість. Дуже сильні грози.

Індекс Томсона - T_i (Thompson index):

$$T_i = K_i - L_i, \quad (3.7)$$

де K_i - індекс нестійкості(число Вайтінга), L_i - Lifted index.

Таблиця 3.7 – Інтенсивність конвективних явищ за індексом Томсона (T_i)

Значення T_i	Очікувана ситуація
<25	без гроз
25-34	можливі грози
35-39	грози, місцями сильні
≥ 40	сильні грози

Індекс Шоуолтера – SHW (Showalter index):

$$SHW = T_{500} - T_{850}^B, \quad (3.8)$$

де T_{850}^B - температура частки, що адіабатично піднімається з поверхні 850 гПа до 500 гПа (по вологій адіабаті з рівня конденсації), T_{500} - температура повітря на рівні 500 гПа.

Якщо в шарі 850-500 гПа спостерігаються інверсійні шари (незалежно від походження), даний метод не спрацьовує. Індекс Шоуолтера для території Східної Європи найбільш показовий для прогнозу вечірніх гроз (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Інтенсивність конвективних явищ за індексом SHW

Значення SHW	Очікувана ситуація
> 3	немає конвекції
1...3	є умови для розвитку конвекції
-2...1	можливі слабкі грози
-3...-2	можливі грози, шквали (місцями сильні)
-6...-4	можливі сильні грози, шквали
< -6	можливі дуже сильні грози, шквали, смерчі

Найчастіше більша частина всіх смерчів (близько 70-80%) пов'язана з суперосередками і мезоциклоном, тому прогноз торнадо безпосередньо базується на прогнозі виникнення суперосередків.

Індекс Балка Ричардсона (Bulk Richardson Number) ІБР або BRN є

безрозмірною величиною в метеорології, яка об'єднує вертикальну стійкість і вертикальний зсув (як правило, стабільність, що розділена зсувом). Він являє собою відношення турбулентності, що викликана термічними процесами до турбулентності, що викликана вертикальним зрушенням вітру. Практично, значення індексу BRN показують, чи є конвекція вільної або примусовою. Високі значення індексу означають нестійкість і/або слабкі вертикальні зсуви в навколишньому середовищі. Низькі значення індексу вказують на слабку нестійкість і/або сильний зсув вітру. Зазвичай значення BRN в межах від 10 до 45 означають сприятливі умови для розвитку суперосередка. BRN розраховується за формулою:

$$\text{BRN} = \frac{\text{CAPE}}{0,5 \cdot (U_{6\text{km}} - U_{500\text{m}})^2}, \quad (3.9)$$

де $U_{6\text{ km}}$ - швидкість вітру на висоті 6 км; $U_{500\text{ m}}$ - швидкість вітру на висоті 500 м; CAPE - доступна конвективна потенційна енергія.

Зазвичай, при $\text{BRN} < 10$, вертикальний зсув домінує над плавучістю. При значеннях індексу від 10 до 45 зсув буде врівноважувати плавучість, а такі умови сприятливі для розвитку потужних суперосередків. При $\text{BRN} > 45$ через значний кут нахилу висхідних потоків, суперосередки не будуть спостерігатися.

2. Незважаючи на те, що індекс BRN є дуже хорошим показником для прогнозу суперосередків і наявності мезоциклона в середній тропосфері, він не здатний спрогнозувати інтенсивність мезоциклона на нижньому рівні (у шарі тертя) і ймовірність торнадо. Тому саме для цих цілей запроваджено додатковий показник - BRN Shear:

$$\text{BRN shear} = 0,5 \cdot (U_{6\text{km}} - U_{500\text{m}})^2 \quad (3.10)$$

До того ж, цей показник часто використовується для визначення різних видів суперосередків, які генерують або не генерують торнадо (табл.3.9).

Цей індекс добре показує відмінність між суперячейкою і звичайної грозою, а так само інтенсивність мезоциклона в середньому шарі грози. І чим вище його значення, тим сильніший зсув вітру, а отже і велика ймовірність суперячейки.

Таблиця 3.9 – Інтенсивність конвективних явищ за індексом
BRNshear, m^2/c^2

Значення BRN Shear	Очікувана ситуація
40-140	Імовірні потужні суперосередки
35-40	Імовірні слабкі суперосередки
< 35	Низька ймовірність розвитку суперосередка

3. Глибокий шар зсуву (DLS) або зсув вітру в шарі 0-6 км Визначається як величина векторної відмінності між вектором швидкості вітру на висоті 450 гПа і вектором вітру біля поверхні землі. В якості альтернативи можна використовувати довжину годографа в шарі від 0 до 6 км. Зсуви в цьому шарі використовується для визначення потенціалу суперосередка. Однак це не дуже хороший показник для визначення обертового потенціалу в нижньому шарі.

При $DLS > 40 \text{ kt}$ розвиток суперосередку найбільш ймовірний, а при DLS від 35 до 39 kt - малий потенціал для розвитку суперосередку.

Індекс LOSHR - векторна різниця між вітром на рівнях 1 км і 10 м. Критеріальне значення індексу 10 м/с (смерч). Одиниці вимірювання: м/с

$$\text{LOSHR} = V_{1\text{km}} - V_{\text{sfc}} \quad (3.11)$$

Індекс SHEAR – величина вертикального зсуву вітру в шарі 0-6 км вище рівня землі. Одиниці вимірювання: м/с

Індекс Storm Relative Helicity (SRH) - відносна спіральність шторму, тобто оцінка спроможності (потенціалу) циклонічного обертання висхідних потоків для розвитку грози, одиниці вимірювання: m^2/c^2

Для прогнозування суперосередків немає чіткого межового значення SRH, тому що їх формування найчастіше пов'язане з шаром вертикального зсуву вітру. Розраховується в нижніх шарах 0-1 км ($> 100 \text{ m}^2/\text{c}^2$) і 0-3 км ($> 250 \text{ m}^2/\text{c}^2$). Зазначені значення свідчать про підвищену ймовірність виникнення суперосередків, хоча чіткої межі між прогнозом відсутності і наявності суперосередку немає.

$$\text{SRH} = V_{\text{SR}} * (\Delta \times V) \quad (3.12)$$

Наприклад, шторм рухається вправо від середнього вітру при наявності вертикального зсуву та буде більш реагувати на високу відносну спіральність і V_{SR} (відносну швидкість) потоку всередині шторму, ніж звичайний осередок, що рухається за середнім вітром (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Критерії індексу Storm Relative Helicity

Значення SRH, m^2/c^2	Очікувана ситуація
Hs-r = 150	Розвиток суперосередків
Hs-r = 150-299	Можливий розвиток слабкого торнадо
Hs-r = 300-449	Можливий розвиток сильного торнадо
Hs-r > 450	Можливий розвиток дуже сильного торнадо

Примітка: ці значення спіральності припускають, що при розвитку грози шторм буде рухатися вправо щодо середнього вітру. Значення є справедливими для шару 0-3 км.

Індекс Energy Helicity (індекс енергії спіральності) - спроба скомбінувати CAPE и SRH в одному індексі для оцінки потенціалу розвитку суперосередку та мезоциклону. Безрозмірна величина.

$$EHI = \frac{CAPE * SRH}{1,6 * 10^5} \quad (3.13)$$

Високі значення ЕНІ представляють середу, що володіє високим параметром CAPE і / або високою SRH (табл. 3.11)

Значення індексу Significant Tornado Parameter (STP або параметру сильних смерчів) розраховуються для визначення сприятливості стану атмосфери для виникнення торнадо інтенсивністю F2 та більше за формулою:

$$STP = LOSHR/20 \cdot SRH/100 \cdot CAPE/1000 \cdot (2000-LCL)/1500, \quad (3.14)$$

де LCL – висота рівню конденсації (гПа) для частки, що адіабатичне підіймається. Сильні смерчі слід чекати якщо $STP \geq 1$.

Таблиця 3.11 – Критерії індексу Energy Helicity

Значення ЕНІ	Очікувана ситуація
$EHI < 1,0$	Суперосередки та торнадо малоімовірні у більшості випадках, але необхідно мати відомості про конвекцію та зони зсуву, що може зробити значення ЕНІ не репрезентативними
$EHI = 1,0-2,0$	Суперосередки та торнадо можливі, але зазвичай торнадо не інтенсивний або довго живучий. Можна отримати не суперосередковий / зсувовий вихор торнадо біля передньої кромки дуги радіолуни /LEWPS
$EHI = 2,0-2,4$	Дуже ймовірні суперосередки і мезоциклон - можливий розвиток торнадо.
$EHI = 2,5-2,9$	Мезоциклон - утворення суперосередкового торнадо дуже ймовірно.
$EHI = 3,0-3,9$	Сильний мезоциклон – утворення торнадо (F2 і F3) можливе.
$EHI > 4,0$	Дуже сильний (вибуховий) мезоциклон - утворення торнадо (F4 і F5) можливе

3.2. Аналіз індексів нестійкості атмосфери напередодні смерчів над Одеською областю 17 червня та 3 липня 2018 р.

При прогнозуванні виникнення грози, граду, шквалу та інших небезпечних явищ погоди, які обумовлені розвитком конвекції, практикується використання значень індексів, що характеризують конвекцію за низкою параметрів.

Якщо проаналізувати готовність атмосфери до розвитку конвекції за даними радіозонду (00 UTC), то можна оцінити сприятливість термодинамічних умов виникненню небезпечних вихорів за 11 та 13 годин до

їх утворення, тому для деталізації розрахунків індексів нестійкості та спіральності районом утворення смерчу залучені дані глобальної моделі GFS з кроком 50 км за 17 червня 2018 р. зі стартом реалізації у 06 UTC на 0 та 3 години вперед. Для випадку 3 липня 2018 р. – старт реалізації 06 та 12 UTC. [17].

Розрахунки проводилися по полігону від 42,0 до 47,0 °пн.ш. та від 27,0 до 34,0 °сх.д., тобто охоплюючи регіон розвитку обох вихорів (45,71 °пн.ш. та 29,86 °сх.д. та 46,43 °пн.ш. та 30,34 °сх.д.). Результати розрахунків представлені на рис. 3.1-3.11.

Як видно з рис. 3.1, індекс CAPE або конвективна потенційна енергія 16 червня 2018 р. була помірною над акваторією Чорного моря в 06 UTC та не змінила свого значення до 09 UTC, приймаючи вигляд вузької смуги зі значеннями 1500 Дж/кг та вище. В районі майбутнього утворення смерчу CAPE не відзначається високими значеннями – менше 1000 Дж/кг, тому активна грозова діяльність почалася у другій половині доби.

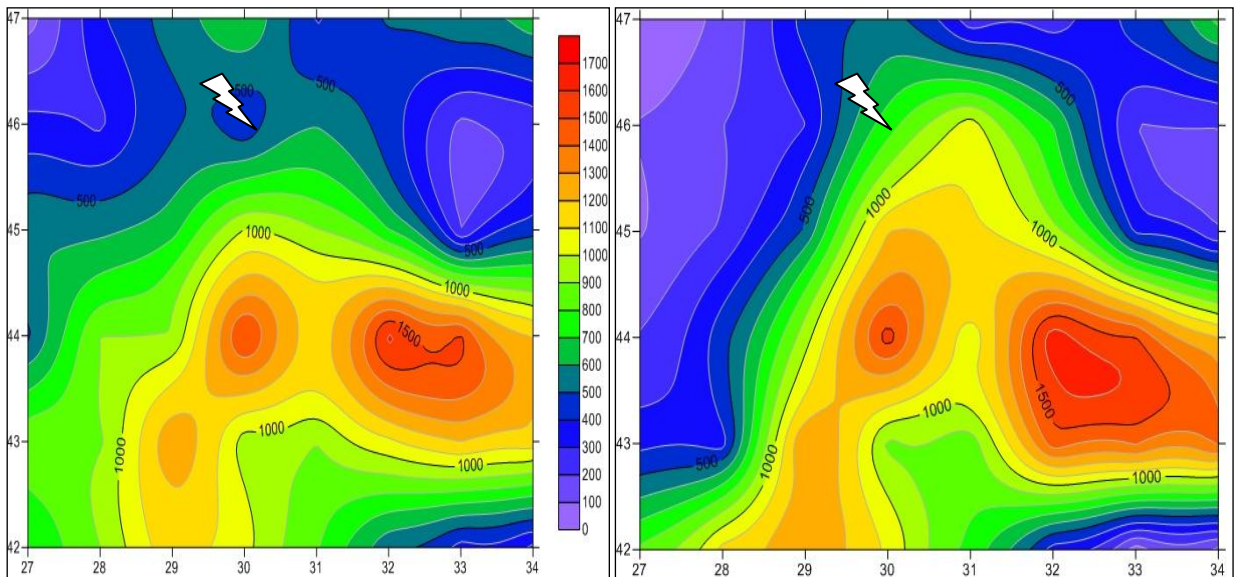


Рис. 3.1. Карта значень індексу CAPE за 06 і 09 UTC 17 червня 2018 р

Інший індекс нестійкості Vertical Totals (VT), який є різницею між температурою на рівнях 850 та 500 гПа та відображає вертикальний градієнт температури повітря та потенціал її нестійкості, також у строк 06 та 09 UTC не перевищував критерій, достатній для утворення гроз (28 °C), але на район утворення смерчу орієнтована смуга його відносно підвищених значень (рис. 3.2).

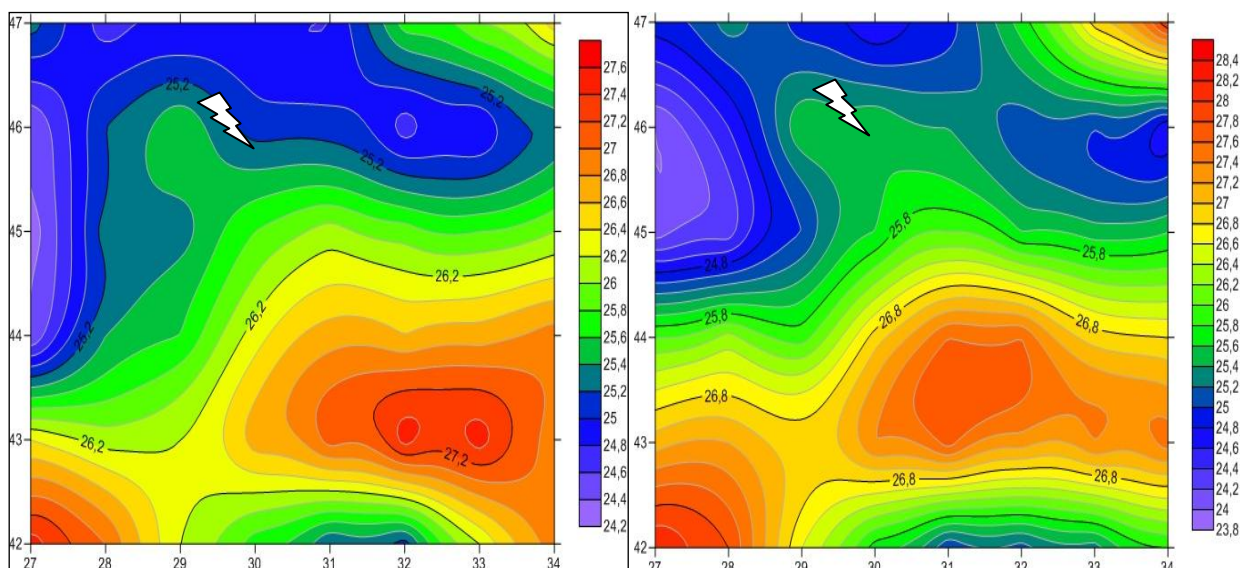


Рис. 3.2. Карта значень індексу VT за 06 і 09 UTC 17 червня 2018 р.

Отже, атмосфера була нейстійкою та мала певний потенціал для грозоутворення, тому проаналізуємо індекси, які поєднують термічну та динамічну нестійкість: LOSHR та BRN Shear.

Розрахунок вертикального зсуву вітру у шарі від 10 м до 1 км (рис. 3.3) виявив значну площу з відносно підвищеною величиною цього індексу над Одеською областю в 06 та 09 UTC та акваторією Чорного моря. Але, в 09 UTC спостерігається область з підвищеною величиною індексу LOSHR (від 10 до 15 м/с) над місцем майбутнього виникнення смерчу.

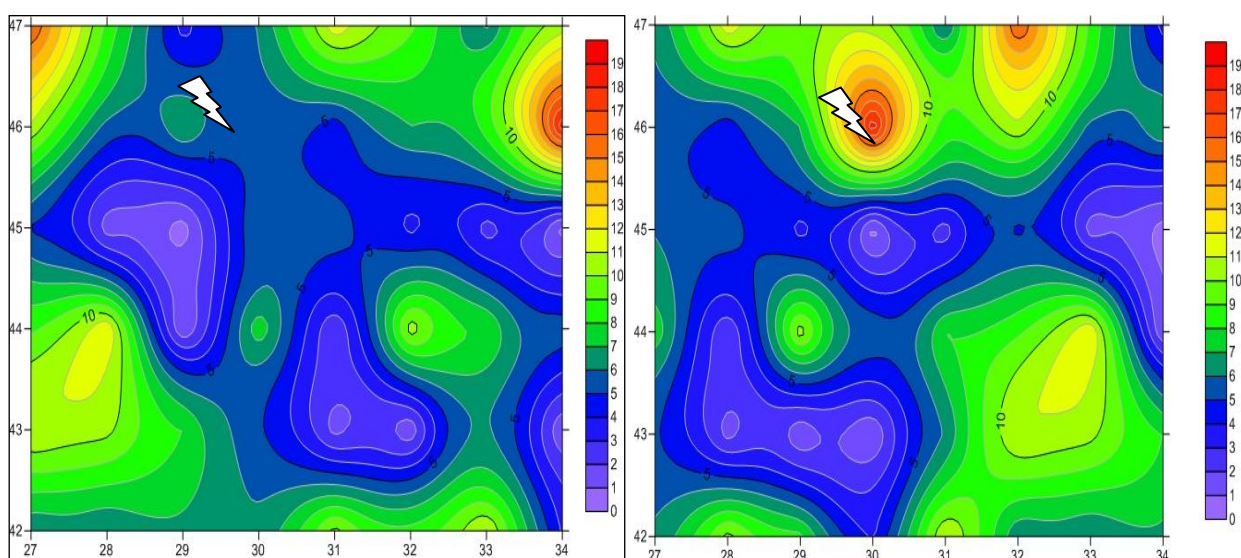


Рис. 3.3. Карта значень індексу LOSHR за 06 і 09 UTC 17 червня 2018 р.

Індекс BRN Shear, який відображує відношення турбулентності, що викликана термічними процесами до турбулентності, що викликана вертикальним зсувом вітру, над місцем майбутнього утворення смерчу, не перевищував 35, (рис. 3.4) тобто не передбачав розвитку потужних суперосередків, але над місцем майбутнього вихорю утворилася зона підвищених значень цього індексу, форма якої приблизно подібна хмарному осередку у 11 годин.

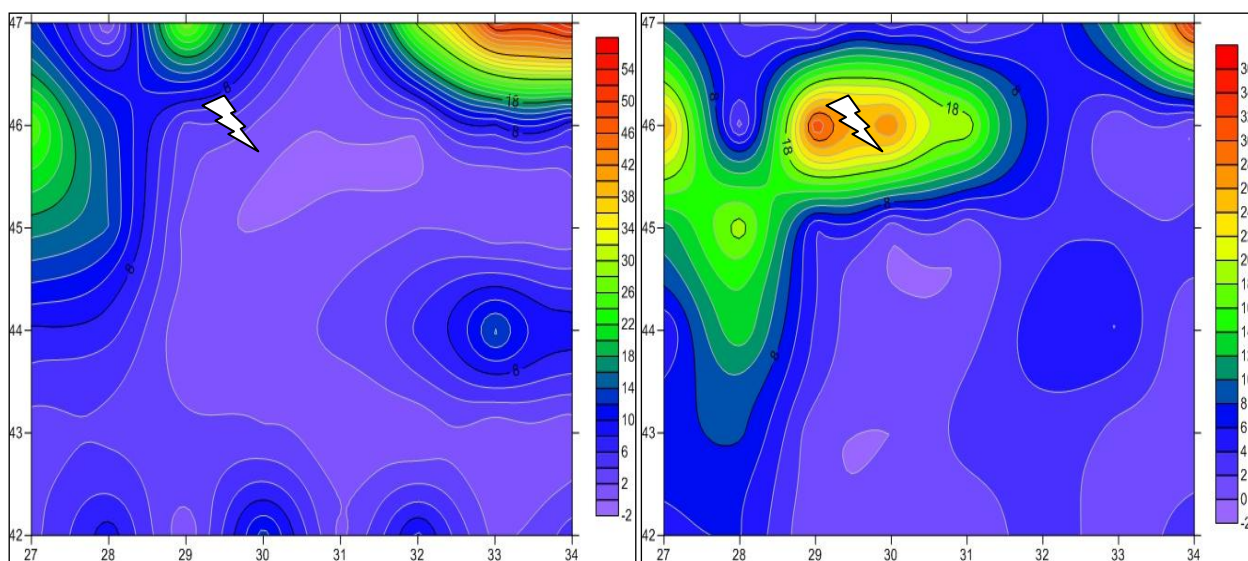


Рис. 3.4. Карта значень індексу BRNshear за 06 і 09 UTC 17 червня 2018 р.

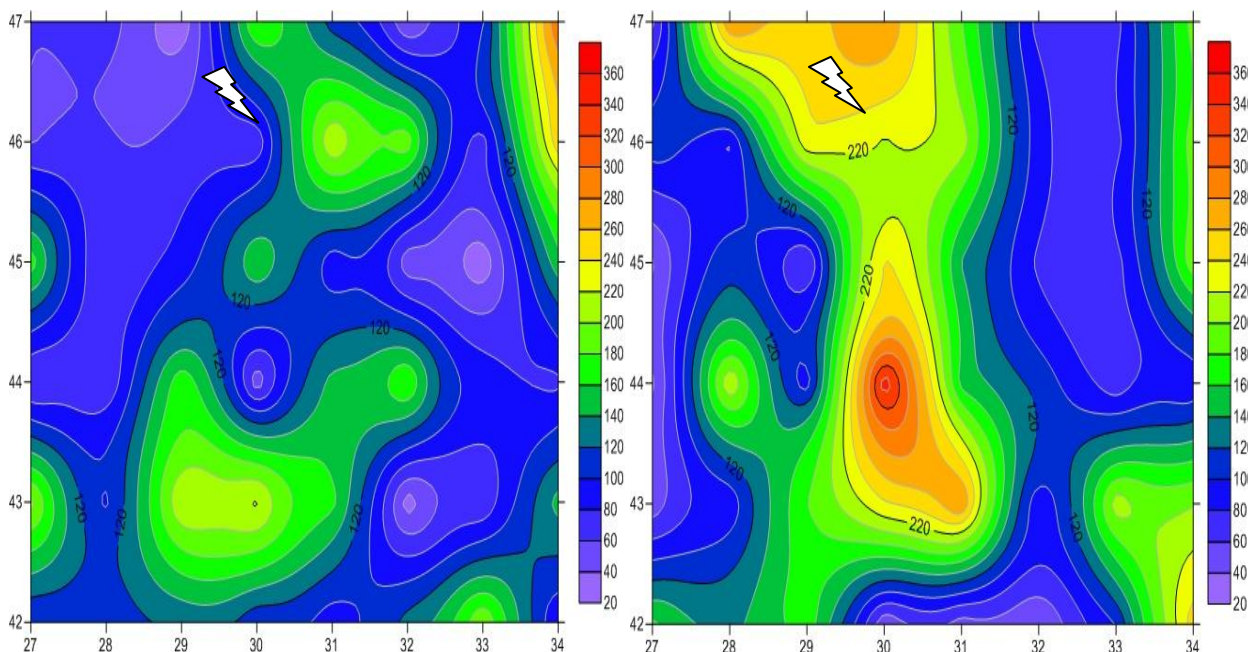


Рис. 3.5. Карта значень індексу SWEAT за 06 і 09 UTC 17 червня 2018 р.

Розрахунки комплексного критерію для діагнозу і прогнозу небезпечних і стихійних явищ погоди, пов'язаних з конвективною хмарністю SWEAT (рис. 3.5) показали, що в 06 UTC він не перевищував 200, тобто не було умов для виникнення сильних гроз, але через 3 години значення SWEAT збільшилися та місці виникнення вихорю досягнули 260-280, що вказує на можливість утворення сильних гроз, граду, шквалів та ін.

Отже, 17 червня 2018 р. смерч біля узбережжя селища Приморське утворився завдяки зростанню термічної нестійкості та значному впливу неоднорідності поля вітру.

Інший випадок, 3 липня 2018 р., спостерігався на фоні відносно низьких значень CAPE в обидва строки розрахунків. Індекс VT в 06 UTC над Одещиною не перевищував 20 °C та через 3 години збільшився до 23 °C, тобто до полудня термічних умов для розвитку грозової діяльності не виникало.

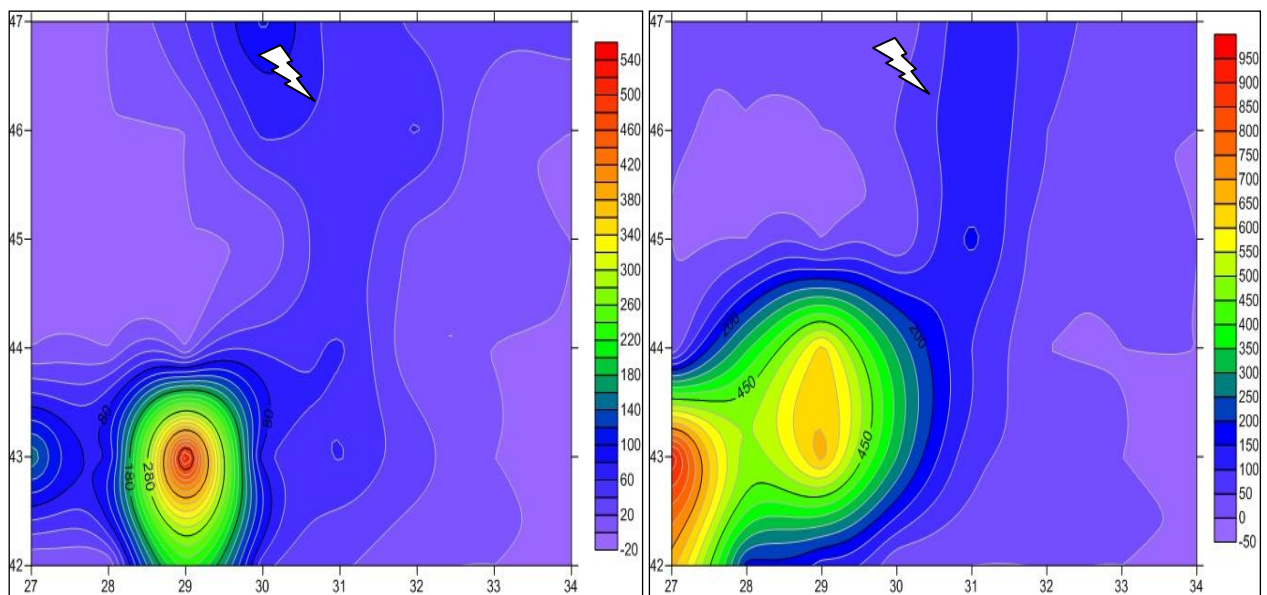


Рис. 3.6. Карта значень індексу CAPE за 06 і 12 UTC 03 липня 2018 р

Якщо проаналізувати розподіл вітру з висотою, то можна виявити вузьку смугу підвищених значень індексу LOSHR вже 06 UTC вдовж 30-31 °сх.д., але вони не досягають 10 м/с. Через 3 години орієнтація цієї смуги змінюється – вона розповсюджується від району Одеси на південний схід з трьома локальними максимумами (більше 10 м/с), один з яких співпадає з локацією вихорю, який утвориться через годину.

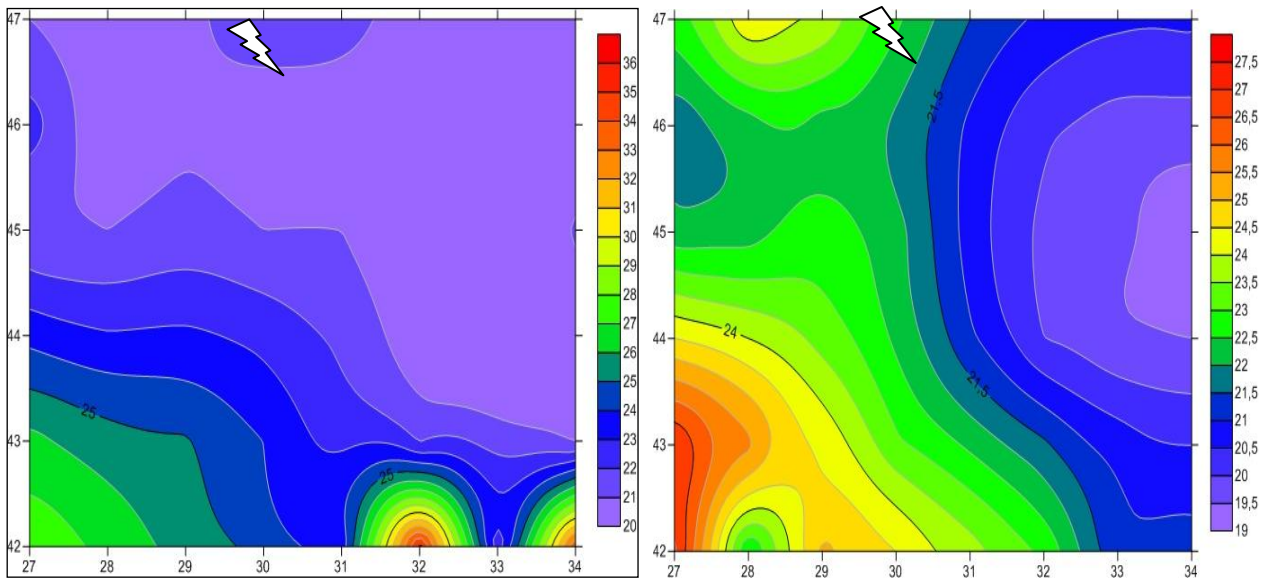


Рис. 3.7. Карта значень індексу VT за 06 і 12 UTC 03 липня 2018 р.

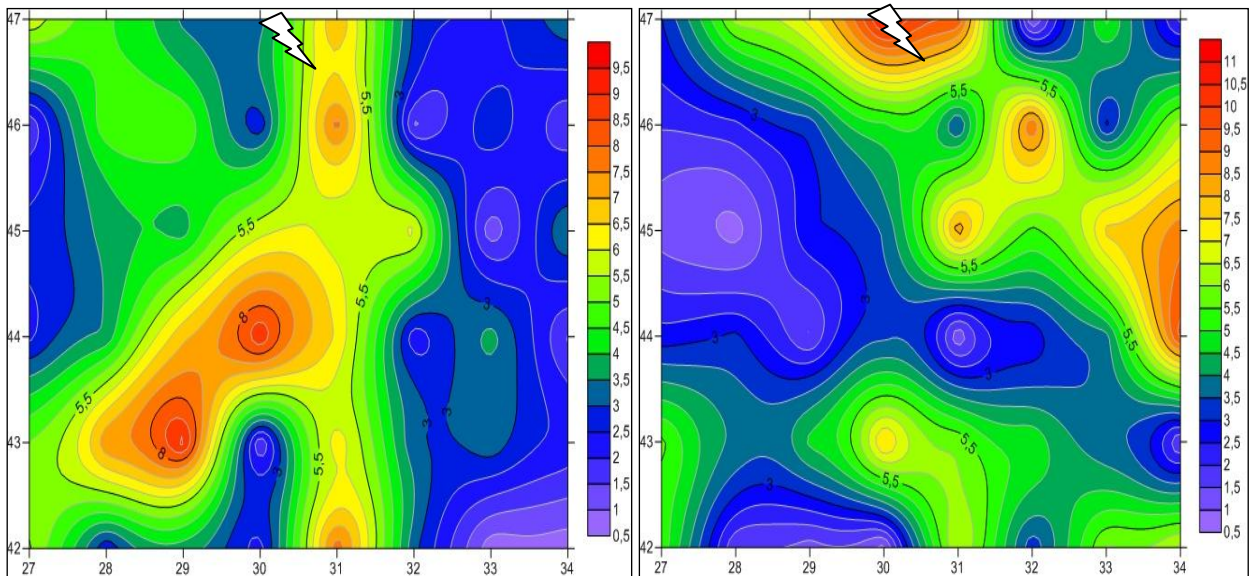


Рис. 3.8. Карта значень індексу LOSHR за 06 і 012 UTC 03 липня 2018 р.

Індекс BRNshear (рис. 3.9) вказує на імовірні потужні осередки, індекс SRH (рис. 3.10) не досягає небезпечної інтенсивності, але смуга його відносно підвищених значень майже повторює просторовий розподіл індексу LOSHR.

За розрахунками комплексного критерію для діагнозу і прогнозу небезпечних і стихійних явищ погоди, пов'язаних з конвективною хмарністю SWEAT (рис. 3.11) показали, що в 06 UTC він перевищував 200 в окремих осередках, а у полудень утворилися зони його великих значень (більш 250) над півднем Одеської області та вузька смуга на північ від Одеси, у напрямку місця виникнення смерчу.

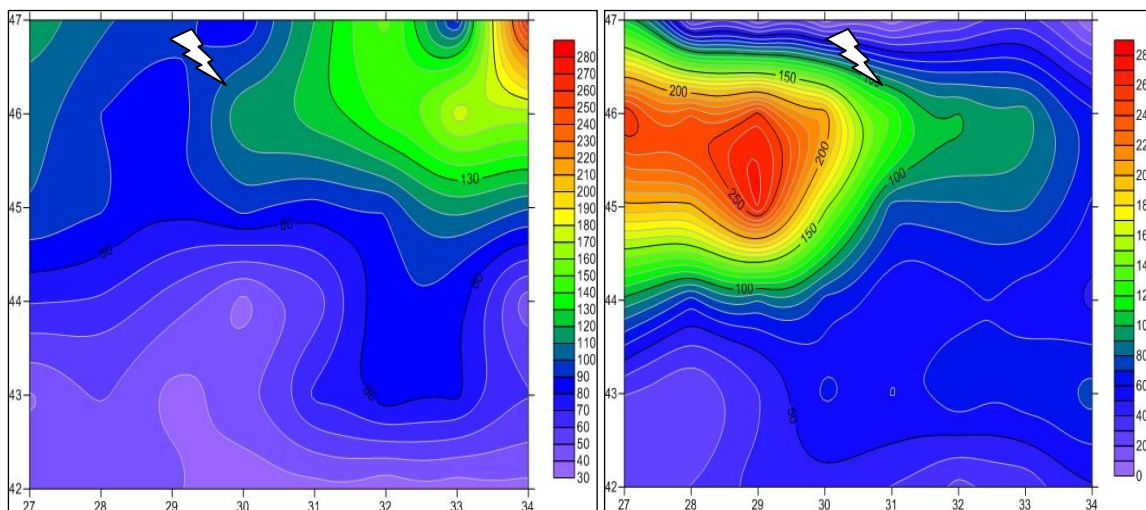


Рис. 3.9. Карта значень індексу BRNshear за 06 і 12 UTC 03 липня 2018р.

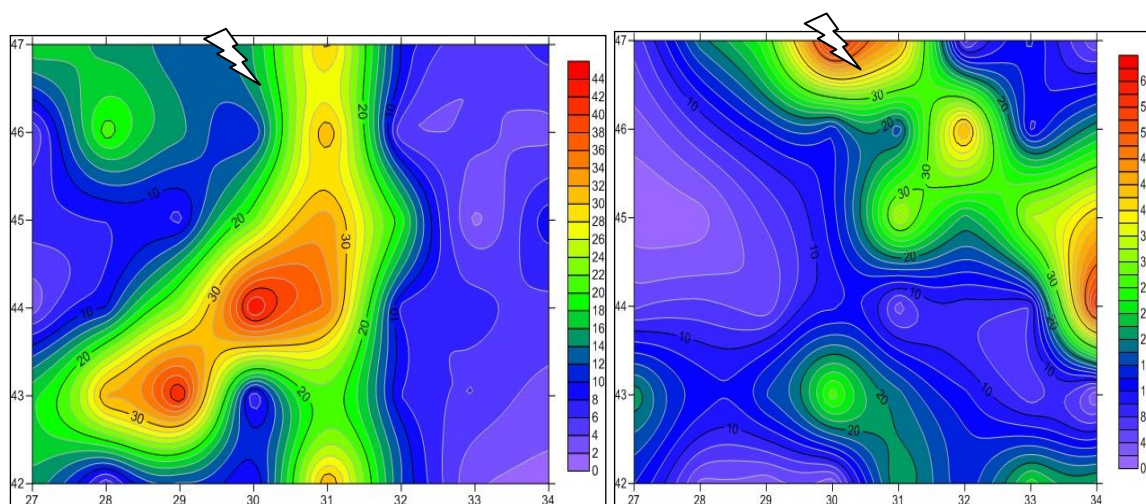


Рис. 3.10. Карта значень індексу SRH за 06 і 12 UTC 03 липня 2018 р.

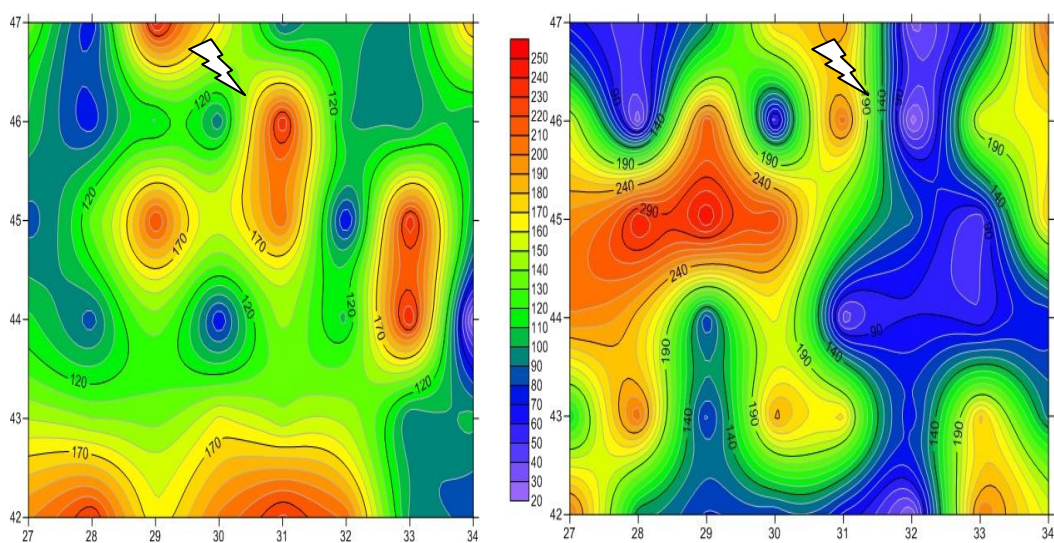


Рис. 3.11. Карта значень індексу SWEAT за 06 і 12 UTC 03 липня 2018 р.

Отже, 3 липня 2018 р. смерч біля міста Теплодар утворився на фоні слабкого розвитку термічної конвекції, але при значному вертикальному зсуву вітру.

Таким чином, розрахунок параметрів конвекції за даними глобальної моделі GFS з кроком 50 км може допомогти виявити район з високою імовірністю виникнення смерчів та чинники, які можуть цьому сприяти.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи отримані наступні висновки:

1. Впродовж 2018 р. над територією України виявлено 14 випадків виникнення смерчів, переважно над південно-східною частиною країни з найбільшою повторюваністю у червні та липні у першій половині доби.

2. Смерч 17 червня 2018 р. утворився в термічно нестійкої повітряної масі через розвиток та збереження з 9 до 12 годин мезомасштабного конвективного комплексу біля узбережжя півдня Одеської області.

3. Смерч 3 липня 2018 р., можливо, виник в термічно нестійкої повітряної масі через формування зони з інтенсивними потоками протилежного напрямку без утворення мезомасштабного конвективного комплексу

4. Смерч біля узбережжя селища Приморське 17 червня 2018 р. утворився завдяки зростанню термічної нестійкості та значному впливу неоднорідності поля вітру.

5. Смерч біля міста Теплодар 3 липня 2018 р. сформувався на фоні слабого розвитку термічної конвекції, але при значному вертикальному зсуву вітру.

6. Розрахунок параметрів конвекції за даними глобальної моделі GFS з кроком 50 км може допомогти виявити район з високою імовірністю виникнення смерчів та чинники, які можуть цьому сприяти.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Антонов В.С. Короткий курс загальної метеорології. Чернівці: Рута, 2004, 336 с.
2. Будилина Е.М., Прох Л.З., Снитковский А.И. Смерчи и шквалы умеренных широт. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 32 с
3. Волеваха В.А., Токарь Н.Ф. Шквали и смерчи на Украине в 1984-1985 гг. // Труды УкрНИГМИ. 1987. Вип. 225.- С. 46-55.
4. Івус Г. П. Спеціалізовані прогнози погоди. Одеса: ТЕС, 2012. 407 с.
5. Івус Г.П., Семергей-Чумаченко А.Б. Смерчи и струйные течения низких уровней (обзор литературных источников) // Культура народов Причерноморья. 2006. № 73. С. 156-158.
6. Клімат України. К.: Видавництво Раєвського, 2003. 343 с.
7. Ромов А.И. Причины образования смерчей и рекомендации к анализу и прогнозу смерчеопасных ситуаций // Труды УкрНИГМИ. 1988. Вып. 233. С.23-29.
8. Семергей–Чумаченко А.Б., Кроленко Ю.І. Смерчі над південним заходом України // Вестник ГМЦ ЧАМ. 2018.- № 1 (21). С. 29-41.
9. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 рр.) / За ред. В.М.Ліпінського, В.І.Осадчого, В.М.Бабіченко. К.: Ніка-Центр, 2006. – 312 с.
10. http://old.geology.lnu.edu.ua/phis_geo/fourman/E-books-FVV/Interactive%20books/Meteorology/Weather%20and%20Climate/METEO-PHENOMENA/Tornado/tornado.htm (дата звернення 19.04.2019 р.).
11. https://ru.wikipedia.org/wiki/Шкала_Фудзиты
12. <http://animalworld.com.ua/news/Superjachejki>
13. <https://glavcom.ua/odesa/video/na-odeshchini-vidpochivayuchi-sposterigali-yak-u-mori-pronissya-smerch-506083.html> (дата звернення 17.04.2019 р.).
14. European Severe Weather Database. <http://www.essl.org/ESWD/> (дата звернення 11.05.2019 р.).

15. European Storm Forecast Experiment. Forecast archive. <http://www.estofex.org/> (дата звернення 10.05.2019 р.).
16. <https://kp.ua/citynews/612563-v-odesskoi-oblasty-smerch-na-neskolko-sekund-podbrosyl-v-vozdukh-podrostka> (дата звернення 18.04.2019 р.).
17. National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/> (дата звернення 20.04.2019 р.).
18. <http://www.nwcsaf.org/web/guest/nec/geo-geostationary-archiv> (дата звернення 10.05.2019 р.).
19. <https://ru.tsn.ua/ukrayina/pod-odessoj-pronessya-smerch-1180872.html>
20. http://www2.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html (дата звернення 10.05.2019р.)
21. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterkarte?tag=26&monat=07&jahr=2017&utc=12> (дата звернення 12.05.2019 р.).