

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий  
гідрометеорологічний інститут  
Кафедра метеорології та кліматології

**Кваліфікаційна робота магістра**

на тему: Генерація і підтримання хвиль тепла над територією України

Виконала студентка 2 курсу групи МЗК-20  
Спеціальності 103 «Науки про Землю»  
Освітня програма  
«Метеорологія і кліматологія»  
Приходько Надія Олександрівна

Керівник к. геогр.н., доцент  
Хоменко Інна Анатоліївна

Рецензент д.геогр.н., професор  
Берлінський Микола Анатолійович

Одеса 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий гідрометеорологічний інститут \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ Метеорології та кліматології \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 103 “Науки про Землю” \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Метеорологія і кліматологія \_\_\_\_\_  
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
метеорології та кліматології  
\_\_\_\_\_ Прокоф'єв О.М.  
“28” \_\_\_\_\_ жовтня \_\_\_\_\_ 2021 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

студенту(ці) \_\_\_\_\_ Приходько Надії Олександрівні \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Генерація і підтримання хвиль тепла \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ над територією України \_\_\_\_\_

керівник роботи \_\_\_\_\_ Хоменко Інна Анатоліївна, к.геогр.н., доц., \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ОДЕКУ від “18” жовтня 2021 року № 216-С \_\_\_\_\_  
2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ 13 грудня 2021 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи поля об'єктивного аналізу NCEP/NCAR геопотенціальної висоти 500 гПа у строки 00 і 12 СГЧ з просторовим розділенням 2,5°×2,5°; об'єктивний аналіз NCEP/NCAR кліматичних норм (1981-2010 рр.) і аномалій метеорологічних величин, осереднених за періоди хвиль тепла, у вузлах сітки 2,5°×2,5° і на стандартних ізобаричних висотах від 1000 до 100 гПа; композитні карти середніх значень і аномалій тиску на рівні моря, аномалій температури біля поверхні землі і на рівні 850 гПа, аномалій середнього положення струминної течії на рівні 300 гПа за періоди хвиль тепла, зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Визначення областей блокування для десяти епізодів з найінтенсивнішими хвилями тепла за період 1961-2020 рр. з використанням критерію Тібальді-Мольтені, виявлення зв'язку між хвилями і великомасштабними процесами, які підтримують появу і встановлення аномально спекотної погоди над територією України

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

часово-просторові поля критерію Тібальді-Мольтені, просторовий розподіл топографії ізобаричної поверхні 500 гПа, просторовий розподіл кліматичних норм (1981-2010 рр.) і аномалій метеорологічних величин, осереднених за періоди хвиль тепла, композитні карти середніх значень і аномалій тиску на рівні моря, аномалій температури біля поверхні землі і на рівні 850 гПа, аномалій середнього положення струминної течії на рівні 300 гПа за періоди хвиль тепла, зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла

#### 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 28 жовтня 2021 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Вивчення літературних джерел за темою дипломного проекту.	28.10 – 6.11.2021 р.	90	відмінно
2	Підготовка даних метеорологічних спостережень до обробки.	6 – 14.11.2021 р.	92	відмінно
3	Обробка даних метеорологічних спостережень за допомогою графічно-розрахункових пакету «Excel», пакету прикладних програм «Matlab»	14-19.11.2021 р.	98	відмінно
4	Побудова часово-просторових полів наявності критерію Тібальді-Мольтені, просторового розподілу кліматичних норм (1981-2010 рр.) і аномалій метеорологічних величин, осереднених за періоди хвиль тепла, побудова зворотних п'ятиденних траєкторій повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла	19-22.11.2021 р.	95	відмінно
<b>Рубіжна атестація</b>		22 – 26.11.2021 р.	95	
5	Аналіз отриманих результатів	26.11 – 6.12.2021 р.	90	відмінно
6	Оформлення магістерської роботи.	7 – 12.2021 р.	92	відмінно
7	Оформлення і надання керівникові роботи для складання висновку і перевірки на антиплагіат	13.12.2021 р.	94	відмінно
8	Перевірка на антиплагіат, складання протоколу	14-16.12.2021 р.	96	відмінно
9	Складання висновку та підписання авторського договору	17 – 20.12.2021 р.	95	відмінно
10	Підготовка комп'ютерної презентації та доповіді до захисту магістерської роботи.	21 – 25.12.2021 р.	95	відмінно
11	Попередній захист дипломної роботи.		95	відмінно
12	<b>Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)</b>			відмінно

Студент \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

**ЗМІСТ**

Вступ.....	6
1 Вплив синоптичних і місцевих факторів на виникнення хвиль тепла....	8
1.1 Підходи до вивчення високих температур повітря на території України.....	8
1.2 Основні критерії для виявлення хвиль тепла, які використовуються у світовій практиці.....	10
1.3 Вплив синоптичних і місцевих факторів на виникнення хвиль тепла	15
2 База даних та методологія дослідження.....	19
3 Механізми генерації і підтримання інтенсивних хвиль тепла в атмосфері.....	23
3.1 Синоптична класифікація мегахвиль тепла для території України..	23
3.2 Сумісна дія циркуляційних факторів на висотах.....	46
3.3 Вертикальні рухи і низхідні вітри.....	53
Висновки.....	64
Перелік посилань.....	66

## ВСТУП

Хвилі тепла зі стійкими високими понаднормовими температурами можуть спричинити катастрофічні наслідки для людського суспільства та природних екосистем. Прикладом таких хвиль тепла є спека в Чикаго 1995 року, під час якої від захворювань, пов'язаних зі спекою, загинуло понад 500 людей [34], а також спека 2003 року в Європі, впродовж якої загинуло близько 35 000 людей [47]. За оцінками страхових компаній посуха під час спеки 2003 р. спричинила втрати врожаю приблизно на 1,3 мільярда доларів США, а лісові пожежі в Португалії – додаткові збитки в розмірі 1,6 мільярда доларів США [50]. В п'ятому оціночному звіті Міжурядової групи експертів зі зміни клімату зазначено, що ймовірність хвиль тепла зросла у Європі, Азії та Австралії [32]. Нещодавні дослідження показали, що ймовірність надзвичайно спекотних періодів влітку різко зросла з 2003 року [18], що узгоджується з прогнозами, що такі явища стануть більш поширеними на фоні глобального потепління, і їх вплив на смертність людей, регіональну економіку та екосистеми, безсумнівно, буде посилено [22].

Інтенсивні хвилі тепла в останні десятиліття, такі як хвиля тепла в Європі 2003 р. і хвиля тепла в Росії 2010 р., побили багато температурних рекордів і тому їх часто називають мегахвилями тепла [14,27,51]. З початку XXI століття було зроблено багато ґрунтовних і детальних досліджень щодо хвиль тепла, в яких було виявлено деякі механізми виникнення хвиль тепла. Так було доведено, що існує тісний взаємозв'язок між додатними аномаліями температури поверхні моря в Атлантиці та Середземному морі і появою хвиль тепла в Європі [16,25,33]. Іншим провісником хвиль тепла в Європі є дефіцит зимових та весняних опадів у Середземномор'ї та Південній Європі [63]. Відсутність опадів і виснаження ґрунтової вологи призводять до зменшення прихованого охолодження і, отже, до посилення хвиль тепла [27,28]. Ці механізми зворотного зв'язку, виявлені завдяки кліматичним моделям, були додатково перевірені за допомогою отриманих завдяки супутниковим даним компонентам в рівнянні теплового балансу [65]. Проте, незважаючи на

суттєвий прогрес, наше розуміння екстремальних хвиль тепла є все ще обмеженим [41].

Зменшення впливу майбутніх хвиль тепла вимагає вирішення фундаментальних питань, наприклад, чи можна передбачити хвилі тепла і чи можна пом'якшити їх вплив [20]. За цих обставин особливо важливим є питання про фізичні механізми, які обумовлюють появу і підтримання хвиль тепла впродовж тривалого часу. Виявлення таких механізмів може суттєво покращити прогноз аномально спекотної погоди, тому у все більшій кількості досліджень зосереджуються саме на таких механізмах [20,46,60-62]. Більшість із цих досліджень показали, що хвилі тепла не виникають незалежно від умов циркуляції, але їх появі сприяють певні конфігурації потоку, які є малоймовірними за інших умов.

Таким чином, зв'язок між циркуляцією та встановленням тривалої аномально спекотної погоди є важливим компонентом кліматичної системи. Безумовно, поведінка циклонів і антициклонів є важливим проявом того, як великомасштабна циркуляція може генерувати і підтримувати екстремальні погодні умови [46].

В даній роботі досліджувались синоптичні і циркуляційні умови, за яких реалізуються і підтримуються інтенсивні хвилі тепла над територією України. В роботі було досліджено 11 епізодів з інтенсивними хвилями тепла, які спостерігались над територією України в період з 1961 по 2020 рр.

Дипломну роботу виконано на кафедрі метеорології та кліматології під керівництвом доцента кафедри, к.геогр.н. Хоменко І.А.

## 1 ОСНОВНІ ЕТАПИ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ ХВИЛЬ ТЕРМЛА

### 1.1 Підходи до вивчення високих температур повітря на території України

Беручи до уваги постійне збільшення небезпечних та особливо небезпечних метеорологічних явищ у всьому світі в контексті глобальних змін клімату, вченими у ХХІ столітті зроблено величезну роботу з вивчення причин та наслідків такого збільшення. Оскільки однією з основних метеорологічних величин, яка змінюється та вказує на приховані зміни, що відбуваються в кліматичній системі, є температура повітря, зокрема максимальна температура повітря, то в теперішній час пропонується багато методів для вивчення змін у динаміки максимальної температури повітря.

Дослідження високих температур завжди здійснювалось за допомогою аналізу переходу температури через задані межі.

За даними [1,6,8,10] температура повітря  $\geq 25^{\circ}\text{C}$  вважається високою (дні з максимальною температурою в межах  $25,0 - 29,9^{\circ}\text{C}$  називають жаркими), а температура  $\geq 30^{\circ}\text{C}$  – дуже високою (дні з такою температурою вважаються аномально жаркими або тропічними). Великий практичний інтерес являють також дані повторюваності дуже високих температур повітря [1].

Висока температура повітря у більшості випадків несприятливо позначається на діяльності багатьох галузей економіки. Під впливом високої температури повітря відбувається пошкодження обладнання та механізмів, змінюється їх якість. Така температура повітря негативно впливає на роботу залізничного транспорту. Температурний режим має вирішальне значення під час вибору типу житла та конструкцій сонцезахисту в різній місцевості. Тривале утримання високої температури повітря негативно впливає і на здоров'я людини. Температура повітря  $25^{\circ}\text{C}$  і вище з відносною вологістю 30% і нижче та швидкістю вітру 5 м/с і більше за незначної кількості або відсутності опадів є критерієм посушливості та суховійності території. У посушливі періоди створюються передумови виникнення лісових пожеж,

інколи на великих площах. Температура повітря 30°C і вище відноситься до числа небезпечних явищ [1].

Для території України максимальна температура повітря, що сягає в південних, південно-східних та східних областях 35°C та вище, є небезпечною, а температура 40°C та вище – особливо небезпечною. В західних, північних, північно-східних областях небезпечною вважається температура 30°C та вище, а особливо небезпечною – температура 35°C та вище [5,9].

Небезпечні температури, особливо її екстремальні значення, в більшості випадків несприятливо позначаються на діяльності багатьох галузей народного господарства. Сильна жара при малій кількості опадів або їх відсутності формує, як і високі температури, посушливу погоду, яка погано впливає на зростання та розвиток сільськогосподарських культур.

Під дією небезпечної та дуже небезпечної температури відбувається пошкодження матеріалів та устаткування. Температурний режим має вирішальне значення при виборі типу оселі та конструкції захисту від сонця в різних районах. Сильна жара погано впливає на організм людини. Різні кількісні співвідношення максимальної температури з низькою відносною вологістю та швидкістю вітру слугує критерієм посушливості та суховійності території. В посушливі періоди утворюються умови для виникнення лісових пожеж. Небезпечна температура погано впливає також на роботу залізничного транспорту.

Саме такі перевищення найчастіше досліджуються вченими в Україні [7,9], вони розглядаються в контексті періодів, в які спостерігаються температури повітря, що перевищують пороги 25, 30°C, рідше 40°C. Аналізується тривалість періодів перевищення даних порогів (в днях та годинах), обчислюється ймовірність їх настання, визначаються та класифікуються синоптичні ситуації за яких вони спостерігаються.

Крім вище названих критеріїв, дослідники використовують критерії, які обумовлюються місцевими кліматичними особливостями. Оскільки пороги



25, 30, 35 та 40°C є досить узагальненими та не можуть вважатись однаково вдалими критеріями і для північних, і для південних регіонів.

В останні роки найчастіше розглядаються критерії, які є залежними від максимальної температури (зазвичай, розглядають середню добову максимальну температуру) певної місцевості. Таким чином, можна виявляти аномально теплі або аномально спекотні дні не тільки влітку, але і взимку. Тому такі критерії є більш універсальними [7,9].

Таким чином, при аналізі переходу максимальної температури через певні критерії, які розраховуються в залежності від максимальної температури, замість термінів «високі температури» та «небезпечні температури» розпочали використовувати термін «хвилі тепла», оскільки він більш точно відбиває сутність явища, яке розглядається [7,9]. Оскільки під час спостереження хвилі тепла досить часто температури можуть не сягати навіть таких порогових значень як +25°C або +30°C.

## 1.2 Основні критерії для виявлення хвиль тепла, які використовуються у світовій практиці

Визначення хвилі тепла різняться [9], немає її загально прийнятного визначення, проте, загальні характерні ознаки для всіх територій за якими виділяється хвиля тепла – це середня максимальна температура і кількість послідовних днів, протягом яких утримується аномально жарка погода. Таким чином, термін «хвиля тепла» є дуже специфічним і неоднозначним, до цього часу у вітчизняній метеорологічній практиці немає жодного офіційного визначення цього явища чи явища спеки, яке б можна було застосувати до різних кліматичних зон.

Хвилею тепла зазвичай вважають період в кілька діб, температура під час якого перевищує заданий поріг, але специфічні особливості цього поняття варіюються залежно від фізико-географічного розташування району дослідження та ін. Найчастіше використовується визначення, рекомендоване

Всесвітньою метеорологічною організацією: хвиля тепла – явище, коли денний максимум температури (в період 6 або більше послідовних днів) перевищує середній максимум денної температури для того ж календарного дня в період 1961-1990 роки щонайменше на 5°C [9].

Проте в різних регіонах та країнах використовуються різні порогові значення і періоди тривалості (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. – Найбільш поширені методики визначення хвиль тепла у світі [9].

Країна/автор/організація	Мінімальна тривалість, діб	Порогове значення температури, °C
Велика Британія (Global Platform)	5	Перевищення середньої максимальної температури на 5°C
Велика Британія (Holt and Palutikof, 2004)	кілька	30°C
ВМО	6	Перевищення середнього максимуму денної температури за період 1961-1990 роки щонайменше на 5°C
Данія	3 3	25°C (50% та більше території країни) 28°C (50% та більше території країни)
Швеція	5	25°C
КНР	1	35°C
Нідерланди (Метеорологічне бюро)	5	25°C, за умови, що під час не менше 3-х діб спостерігається 30°C
США (Національна служба погоди)	2–3	32.2–37.8°C
Угорщина (Revesz A.)	3	26.6°C
Україна (Мартазінова та Остапчук, 2004)	2	Перевищення середньодобової температури повітря на 6–10°C на 80% території

Наприклад, в Данії хвиля тепла визначається як період, в який принаймні три дні поспіль спостерігається середньодобова максимальна температура вища за 28°C більше, ніж в 50 % всієї території країни, а Датський метеорологічний інститут визначив хвилю тепла як період, що відповідає таким самим критеріям для середньодобових максимальних температур 25°C,

в той час як у сусідній Швеції хвиля тепла визначається як період у п'ять послідовних днів з середньодобовою максимальною температурою, яка перевищує 25°C.

В Англії та Уельсі, окрім методів, наведених в табл. 2.1, є метод, запропонований Метеорологічною Службою Великої Британії (Met Office), за яким встановлення аномально жаркої погоди визначається максимальною денною температурою та мінімальною нічною температурою, що досягли певного порогового значення, яке для кожного регіону має своє значення, а тривалість періоду обумовлює рівень небезпечності хвилі тепла. „Рівень 1” відповідає нормальним умовам влітку. „Рівень 2” досягається, якщо з 60-тивідсотковою ймовірністю температура утримуватиметься вище порогового значення два дні і ніч. „Рівень 3” відповідає періоду, при якому температура була вищою за порогове значення в попередні день та ніч, та з 90-товідсотковою ймовірністю залишатиметься вищою ще впродовж одного дня. „Рівень 4” має місце, якщо умови більш екстремальні, ніж ті, що є характерними для трьох попередніх рівнів.

Приземними хвилями тепла та холоду займалися К.А. Васюков та Н.І. Зверєв [9]. Вони визначали хвилі холоду та хвилі тепла, як пониження (підвищення) середньої добової температури на 5°C і більше.

В останні роки хвилями тепла стали займатися науковці КНУ ім. Т.Г. Шевченка [9,12,13,55]. У всіх цих роботах наголошується на доцільності застосування методики ВМО для виявлення та дослідження хвиль тепла на території України, адже саме ця методика враховує особливості температурного режиму кожного пункту, що обирається для дослідження, також вона не несе великого розрахункового навантаження, що сприяє отриманню однозначних результатів та усуває можливість помилки.

В США визначення також залежить від регіону, проте це зазвичай період принаймні у два дні та порогові значення середньодобових максимальних температур є вищими за європейські стандарти (32,2–37,8°C). На північному сході країни хвиля тепла визначається зазвичай як три послідовні дні, в які

температура досягала або перевищувала 32.2°C, проте, не завжди, оскільки досить часто максимальні температури також пов'язують з рівнем вологості, який спостерігається в атмосфері. Під аномальною хвилею тепла в Каліфорнії розуміють пролонговану хвилю тепла. Така хвиля тепла має місце у випадку, коли температура сягає 37.8°C впродовж 3 та більше послідовних днів над досить великою територією (десятки тисяч квадратних кілометрів).

Всі наведені вище критерії для визначення хвиль тепла, що використовуються в різних країнах світу, є абсолютними порогоми температури.

Проте, в США досить часто використовується не поняття «хвиля тепла», а поняття «індекс тепла», який можна розрахувати за такою формулою [31]:

$$\text{Heat Index (HI)} = 42.379 + 2.04901523 \cdot T + 10.14333127 \cdot R + 0.22475541 \cdot T \cdot R + 6.83783 \cdot 10^3 \cdot T^2 + 5.481717 \cdot 10^2 \cdot R^2 + 1.22874 \cdot 10^3 \cdot T^2 \cdot R + 8.5282 \cdot 10^4 \cdot T \cdot R^2 + 1.99 \cdot 10^6 \cdot T^2 \cdot R^2$$

де  $T$  – температура повітря в градусах Фаренгейта,  $R$  – відносна вологість.

Нижче представлено номограму для визначення індексу тепла (рис. 2.1).

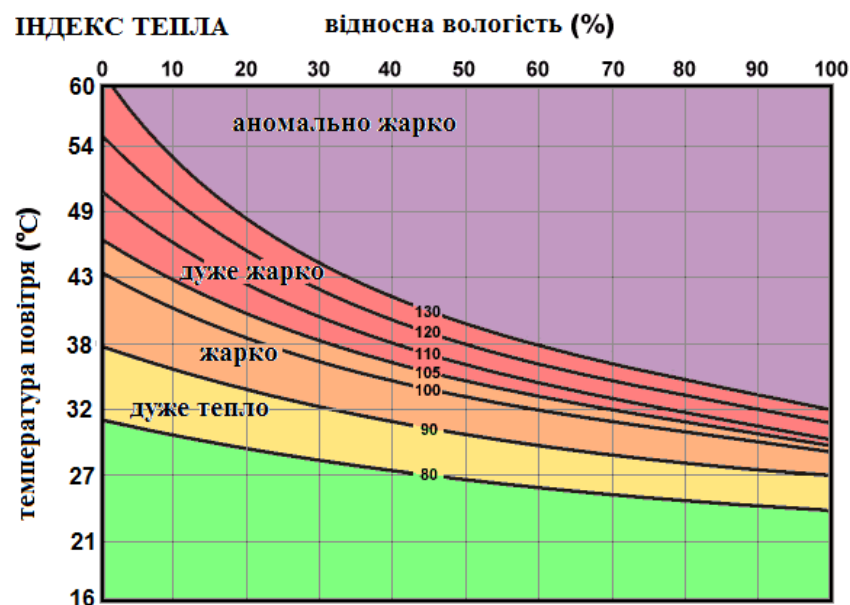


Рисунок 2.1 – Номограма для визначення інтенсивності хвиль тепла [31].

Індекс тепла є прикладом іншої групи критеріїв для визначення хвиль тепла, які визначаються пороговими значеннями температури в поєднанні з пороговими значеннями інших метеорологічних величин (вологість, швидкість вітру). Критерії такого типу найчастіше використовуються в біометеорології та біокліматології, оскільки дають уявлення про вплив певних метеорологічних умов на стан здоров'я людини.

Таким чином, можна зробити висновок, що в США найчастіше використовують підхід, при якому враховується такий аспект впливу хвилі тепла, який може бути названий фізіологічним та пов'язаний з терморегуляцією організму людини. Проте, в багатьох країнах найчастіше зосереджуються на іншому аспекті – соціальний, який враховує адаптацію до місцевих кліматичних умов, тому використовують тільки максимальну температуру в якості порогового критерію [9].

Соціальні та культурні звички (соціальний фактор) також схоже відіграють значну роль в сприйнятті людиною жаркої погоди. В місцях, де погодні умови влітку такі, що температури найчастіше перевищують психологічний поріг, культурні звички зазвичай забезпечують можливості для уникнення активних дій. Рівні соціально прийнятної активності може бути також змінено. Таким чином, зазвичай критичний поріг може бути вищим за той, що отриманий з врахування фізіологічного комфорту людини та може представляти соціальний феномен. В цьому випадку критичні значення ймовірно мають залежати від розподілу порогових значень для типового теплового сезону [24].

Для визначення хвиль тепла за такими критеріями досить корисно використовувати не тільки абсолютні пороги температури, але й так звані відносні пороги температури, які являють собою процентилі. Найчастіше використовують процентилі такі, як [9].

- 1) 95-а процентиль, обчислюється по середньодобових максимальних температурах за період в 5 днів, центральним днем якого є кожний календарний день. Цей критерій характеризує інтенсивні хвилі тепла.

- 2) 90-а перцентиль, обчислюється по середньодобових максимальних температурах за період в 5 днів, центральним днем якого є кожний календарний день. Цей критерій в іноземній літературі має назву також *warm-spell duration index* та позначає такий комплекс погодних умов, при яких є досить ймовірним поява хвилі тепла.

### 1.3 Вплив синоптичних і місцевих факторів на виникнення хвиль тепла

В різних дослідженнях розглядався вплив великомасштабних факторів на хвилі тепла задля визначення механізмів генерації та розвитку хвиль тепла. Одним з основних факторів, що спричиняє спеку, є наявність великомасштабної антициклональної циркуляції над певною територією, яка створює умови, сприятливі для радіаційного нагрівання і адвекції тепла [27,40]. Безумовно, синоптична поведінка циклонів і антициклонів є важливим проявом того, як великомасштабна циркуляція може обумовлювати появу екстремальних погодних умов [46]. В останні десятиліття частота систем блокування над Європою чи різними регіонами Європи все частіше генерувала хвилі тепла [61,62], тоді як кількість систем низького тиску на південь від 55°півн.ш. зменшилась [60]. Деякі інші роботи продемонстрували, що підвищення стабільності атмосферної циркуляції може частково пояснити почастищення випадків аномально спекотної погоди над територією Європи.

В роботах [35] було виявлено, що влітку більш стабільні типи циркуляції сприяють виникненню більш інтенсивних і тривалих хвиль тепла. Більше того, було показано, що виникнення додатних температурних аномалій пов'язане з більш тривалими епізодами блокування високого тиску влітку та навесні [60,15]. Екстремуми на обох кінцях розподілу температури тісно пов'язані з атмосферним блокуванням. На температуру поверхні може впливати атмосферне блокування за допомогою радіаційного впливу або адвекції [15].

Встановлення безпрецедентно спекотної погоди над територією Росії, України і Білорусі влітку 2010 р. було пов'язано зі стаціонаванням блокуючого антициклону протягом 55 днів. Вже в червні були перевищені абсолютні максимуми температури багатьох містах Росії. На початку липня спека посилилась. В Москві місячна аномалія становили  $7,8^{\circ}\text{C}$ , що далеко перевищувало раніше зафіксовані додатні аномалії. Великі аномалії спостерігались практично на всій території Європейської Росії, Східної України і Східної Білорусі. В серпні аномалії перевищили  $6^{\circ}\text{C}$  на півдні. Наприкінці другої декади серпня блокуючий антициклон зруйнувався [11].

Хвиля спеки влітку 2003 року в Європі була зафіксована як найспекотніше літо за останні 500 років [39]. В роботі [52] було показано, що середня температура за червень-липень-серпень 2003 року для швейцарських станцій перевищувала  $5,0^{\circ}\text{C}$  порівняно з середньою температурою за 136 років. Ця екстремальна спека спричинила більше 70 000 додаткових смертей [48]. Формування і розвиток цієї хвилі був пов'язаний з встановленням антициклонального типу погоди, який домінував над Центральною Європою у 2003 році, особливо навесні та влітку [26].

Розширення субтропічного максимуму в західній частині Північної Тихого океану відіграє важливу роль у встановленні аномально спекотної погоди в районі літніх мусонів Східної Азії, включаючи Східний Китай, Південну Корею та Японію. Сильний субтропічний максимум з центром над Східним Китаєм та Корейським півостровом також часто викликає екстремальні хвилі тепла у Східному Китаї [21]. Ця система високого тиску також пригнічує опади над Східною Азією, що має додатковий вплив на інтенсифікацію аномально спекотної погоди [36]. Екстремальна хвиля тепла та посуха влітку 1994 року у Східній Азії були пов'язані з аномальною антициклонічною циркуляцією над регіоном Східної Азії та північно-західною частиною Тихого океану [45].

В деяких дослідженнях було зроблено спробу класифікувати хвилі тепла. У більшості досліджень було проаналізовано просторові розподіли

температури і тиску для категоризованих епізодів з хвилями тепла. В роботі [56] визначено 78 епізодів хвиль тепла влітку в європейсько-середземноморському регіоні з 1950 по 2009 рік на основі трьох просторово-часових критеріїв та класифікували всі епізоди за шістьма типами за допомогою методів кластерного аналізу. Отримані типи було порівняно з екстремальними хвилями тепла в Європі, і було показано, що на виникнення хвиль тепла суттєво впливають синоптичні умови, такі як висота поверхні 500 гПа. В роботі [38] було виявлено основні епізоди хвиль тепла в Центральній Європі з 1950 по 2012 рік, на основі температури, тривалості та зони впливу. Хвилі тепла були класифіковані за допомогою ієрархічного кластерного аналізу на чотири типи. Автори роботи [64] визначили хвилі тепла в Китаї, які мали місце з 1959 по 2013 роки, враховуючи їх просторово-часові характеристики, і згрупували їх за допомогою кластерного аналізу. Автори також показали, що епізоди часто супроводжуються антициклонами, такими як субтропічний максимум в західній частині Північної Тихого океану, системами підвищеного тиску на висотах, і зниженою вологістю ґрунту.

Причини аномальної спеки можуть бути пов'язані з місцевими факторами, а також з синоптичними умовами. Зокрема, рельєф і стан поверхні землі є важливими місцевими факторами, які можуть мати прямий вплив на температуру повітря. Наприклад, такі як фен і вологість ґрунту. Ефект фену підвищує температуру поверхні над підвітряною стороною високого гірського хребта від сухого повітря, що спускається. Для дослідження динамічних механізмів ефекту фену було проведено багато наукових досліджень. Загалом, основною причиною ефекту фену вважають термодинамічний процес над гірським хребтом, що супроводжується опадами з навітряного боку. Однак в роботі [30] було запропоновано інший механізм, який не пов'язаний з випадінням опадів на навітряному боці гори, при якому потенційно тепліше і сухіше гірське повітря, ізентропічно переміщуючись донизу уздовж підвітряного схилу, блокує холодне стабільно стратифіковане вологе повітря [53]. Блокування потоку холодного і вологого повітря характерне для



нелінійного режиму течії, коли швидкість стабільно стратифікованого потоку, що наближається, недостатня для підйому з низовини вгору. В роботі [23] було класифіковано різні механізми ефекту фену на чотири різні типи, зокрема традиційний погляд і механізми Ханна.

Зменшення вологості ґрунту підвищує температуру приземного повітря протягом літнього сезону через взаємодію землі та атмосфери. Випаровування ґрунтової вологи над місцевими ділянками відіграє роль у зниженні температури приземного повітря шляхом перенесення прихованого тепла від атмосфери до шару ґрунту. Тому екстремальні літні приземні температури повітря, викликані антициклонними аномаліями, посилюються позитивними зворотними зв'язками від нестачі ґрунтової вологи [52]. Автори роботи [28] моделювали півмісячні зміни потоків поверхневого енергетичного балансу з умовами вологості ґрунту, усередненими по території Франції в 2003 році. Вони показали, що поверхневий потік прихованого тепла наприкінці літа 2003 року був обмежений браком вологи в ґрунті. Змодельована аномалія прихованого потоку тепла, усереднена для червня-липня-серпня 2003 р., порівняно з 30-річною кліматичною нормою для Франції становить  $11 \text{ Вт м}^{-2}$ . Вони також контролювали весняну вологість ґрунту, щоб визначити її вплив на формування теплової хвилі. Їхні результати свідчать про те, що як приховані, так і відчутні потоки тепла дуже чутливі до початкових умов зволоження ґрунту. Зниження весняної вологості ґрунту може посилити аномалію прихованого тепла в наступне літо та спричинити підвищення температури приземного повітря.

## 2 БАЗА ДАНИХ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

В даній роботі досліджуються механізми і атмосферні процеси, які сприяють генерації і підтримці хвиль тепла над великою частиною території України впродовж тривалого часу.

У північній півкулі аномально спекотна погода в теплий період року зазвичай встановлюється при стаціонуванні впродовж тривалих періодів великих інтенсивних антициклонів, що вказує на тісний зв'язок між процесами блокування і хвилями тепла. В роботі було досліджено вплив циркуляційних чинників на формування аномально спекотної погоди за допомогою двох критеріїв блокування, один з яких – це критерій Тібальді-Мольтені, для визначення якого було застосовано дані об'єктивного аналізу NCEP/NCAR [42,57] за строк 00 і 12 СВЧ у вузлах регулярної сітки з розділенням  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  для території, обмеженої  $30$  і  $85^\circ$  півн.ш. та  $0$  і  $60^\circ$  сх.д. (рис. 2.1); другий – поля аномалій геопотенціальної висоти ізобаричної поверхні 500 гПа в період реєстрації хвилі тепла.

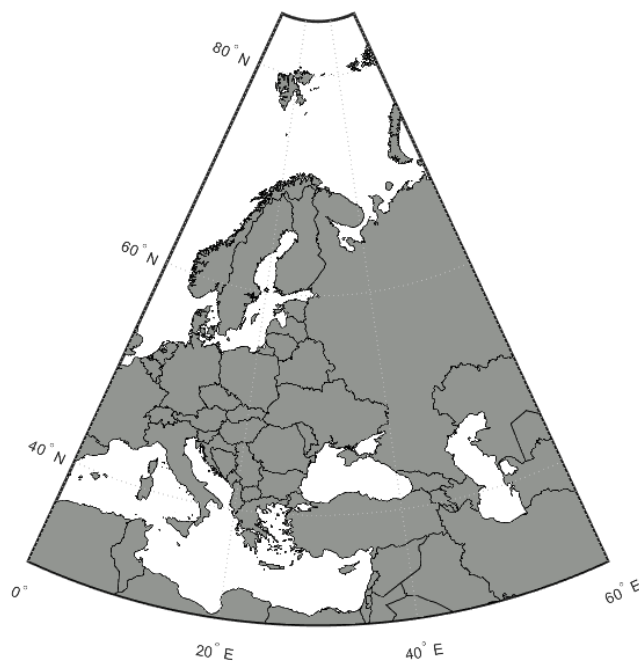


Рисунок 2.1 – Область дослідження, для якої виконувались розрахунки

Виявлення атмосферного блокінгу здійснювалося за стандартним алгоритмом, запропонованим Тібальді-Мольтені [58] і модифікованому в роботі [59] для сітки з кроком  $2.5^\circ$  за широтою та довготою:

$$GHGS = \frac{Z(\lambda, \varphi_0) - Z(\lambda, \varphi_s)}{\varphi_0 - \varphi_s}$$

$$GHGN = \frac{Z(\lambda, \varphi_n) - Z(\lambda, \varphi_0)}{\varphi_n - \varphi_0}$$

$$\varphi_n = 77.5^\circ N + \Delta$$

$$\varphi_0 = 60^\circ N + \Delta$$

$$\varphi_s = 40^\circ N + \Delta$$

$$\Delta = -5.0^\circ, -2.5^\circ, 0^\circ, 2.5^\circ$$

Умовою виявлення ситуації блокування є

$$GHGS > 0 \quad \text{і} \quad GHGN < -10 \frac{m}{\text{deg lat}}$$

Запропонований алгоритм виявлення блокуючих процесів ідентифікує системи високого тиску, що утворюються під час обвалення хвиль Росбі і період існування яких становить принаймні 5 днів, що відповідає існуванню тривалих хвиль тепла.

Блокуючі антициклони ідентифікувались за допомогою методики, основаної на відхиленнях геопотенціальної висоти поверхні 500 гПа від осереднених значень цієї висоти, які визначались за період 1981-2010 рр. за допомогою композитних карт [42,57].

В даній роботі було використано вибірку з інтенсивних хвиль тепла визначених за критерієм, запропонованим ВМО, який являє собою середньодобову максимальну температуру, визначену за 1961–1990 роки та

збільшену на 5°C. Добірку хвиль тепла було зроблено доктором географічних наук Київського національного університету Шевченко О.Г.

Хвилі тепла було ранжовано за індексом інтенсивності хвиль тепла (heat-wave magnitude index daily, HWMId), запропонованим в роботі [49]:

$$M_d(T_d) = \begin{cases} \frac{T_d - T_{30y25p}}{T_{30y75p} - T_{30y25p}} \\ 0, \text{ если } T_d \leq T_{30y25p} \end{cases}$$

де  $T_d$  – максимальна температура в день, коли мала місце хвиля тепла;

$T_{30y25p}$  – 25-та перцентиль максимальної температури за період 1961-1990 рр.;

$T_{30y75p}$  – 75-та перцентиль максимальної температури за період 1961-1990 рр.

В даній роботі до кожного епізоду з інтенсивною хвилею тепла було застосовано класифікацію хвиль тепла, запропоновану в роботі [54], який було виконано на основі аналізу поля тиску на рівні моря, поля адвекції температури на рівні 850 гПа і положення струминної течії на рівні 300 гПа, Оскільки класифікацію було отримано на великому обсязі матеріалу за період з 1961 по 2015 рр. для території Румунії, яка має схожі з Україною фізико-географічні і кліматичні умови, то є всі підстави для застосування цієї класифікації до епізодів, які мали місце на території України. Схожу класифікацію було використано в роботах [61,62]

За цією класифікацією хвилі тепла було віднесено до радіаційно-адвективного типу А, якщо спостерігався слабкий баричний градієнт ( $< 0,5\text{гПа}/111\text{ км}$ ) над територією Румунії, і до адвективно-радіаційного типу В, якщо баричний градієнт був більшим за  $0,5\text{гПа}/111\text{ км}$ .

Типи хвиль тепла було розділено на підтипи за допомогою аналізу зворотних п'ятиденних траєкторій повітряних часток: хвиля тепла відносилась до підтипу А1 у випадку антициклонічної траєкторії і до підтипу А2 – циклонічної траєкторії. Для типу В було виділено три типи, які було ідентифіковано в залежності від району формування повітряної маси: в підтипі В1 районом формування припускався район Північної і Північно-Східної

Африки, в підтипі В2 – Північно-Західна Африка/ Південно-Західна Європа і в підтипі В3 – центральні райони Північної Атлантики.

В даній роботі зворотні траєкторії для повітряних часток було побудовано за допомогою онлайн моделі HYSPLIT, яка належить лабораторії дослідження системи Земля в NOAA [43].

Термобаричну структуру атмосфери і структуру атмосферного потоку, зокрема середні значення і відхилення від кліматичної норми температури повітря на рівні 2 м, атмосферного тиску на рівні моря, геопотенціальної висоти, зональної швидкості вітру і відносної вологості, було досліджено за допомогою даних об'єктивного аналізу NCEP/NCAR [42,57].

### 3 МЕХАНІЗМИ ГЕНЕРАЦІЇ І ПІДТРИМАННЯ НАЙПОТУЖНІШИХ ХВИЛЬ ТЕПЛА В АТМОСФЕРІ

#### 3.1 Синоптична класифікація мегахвиль тепла для території України

В роботі досліджувались епізоди інтенсивних хвиль тепла, які було виявлено за допомогою критерію ВМО за період 1961 – 2020 рр. і ранжовані (табл. 3.1) за індексом інтенсивності хвиль тепла (heat-wave magnitude index daily, HWMId), запропонованим в роботі [49]. В табл. 3.1 показано епізоди з одинадцятьма найбільш інтенсивними хвилями тепла, які було виявлено за весь період.

Найбільш інтенсивними хвилями тепла вважались епізоди з середнім і максимальним значенням індексу HWMId більшим за порогове значення 15 і 20 відповідно.

Найінтенсивнішим випадком, якій спостерігався за всі ці роки, безумовно був епізод з хвилею тепла, який мав місце в липні-серпні 2010 р., коли в усій північній півкулі спостерігалася аномально спекотна і суха погода, причиною якої в Європейській Росії і східних та центральних областях України було встановлення антициклону протягом 55 днів. На території України хвиля тепла проявилася в середині процесу блокування з 17 липня до 18 серпня, охопивши 41,2% території і перевищивши в усіх регіонах порогове значення індексу інтенсивності практично в чотири рази. В цей період максимальне значення індексу HWMId сягає рекордного значення 94,8, причому слід зауважити, що, якщо для багатьох хвиль тепла площа, охоплена високими значеннями індексу суттєво зменшується, то під час цього епізоду інтенсивність хвилі тепла скрізь була рекордно високою.

На рис. 3.1, а представлено поле індексу Тібальді-Мольтені, який впродовж усього існування хвилі тепла демонструє неперервність просторово-часового розподілу. Особливо добре блокування за цим критерієм визначається з 30° по 60° сх.д., де саме і стаціонував антициклон. Наприкінці липня і на початку серпня блокування не виявлялось в полі індексу Тібальді-Мольтені, але це жодним чином не послаблювало хвилю тепла. Аномалії температури в цей час в граничному шарі атмосфери сягали +9°C порівняно з кліматичною нормою (рис. 3.1 д,е).

Таблиця 3.1 – Епізоди з інтенсивними хвилями тепла

Рік	Початок хвилі тепла				Руйнування хвилі тепла				Характеристики хвилі тепла			
	Місяць	Число	Рік	Місяць	Число	Місяць	Число	Тривалість [кількість днів]	Площа [%]	Середня магнітуда	Максимальна магнітуда	
2010	7	17	2010	8	18	8	18	37	41,2	51,5	94,8	
2015	8	4	2015	8	16	8	16	13	30,2	23,4	29,8	
1994	7	25	1994	8	9	8	9	16	16,9	20,7	31,8	
1964	6	13	1964	6	28	6	28	16	22,4	20,4	33,1	
2012	7	25	2012	8	7	8	7	14	32,0	19,4	30,5	
2007	8	18	2007	8	27	8	27	10	52,4	19,2	25,0	
2002	7	3	2002	7	15	7	15	13	41,1	19,1	27,5	
1996	7	3	1996	7	17	7	17	15	21,8	17,1	32,5	
2012	6	30	2012	7	11	7	11	12	42,3	16,9	23,9	
2016	6	17	2016	6	28	6	28	12	16,8	16,8	22,4	
2019	6	10	2019	6	27	6	27	18	30,1	16,5	37,0	

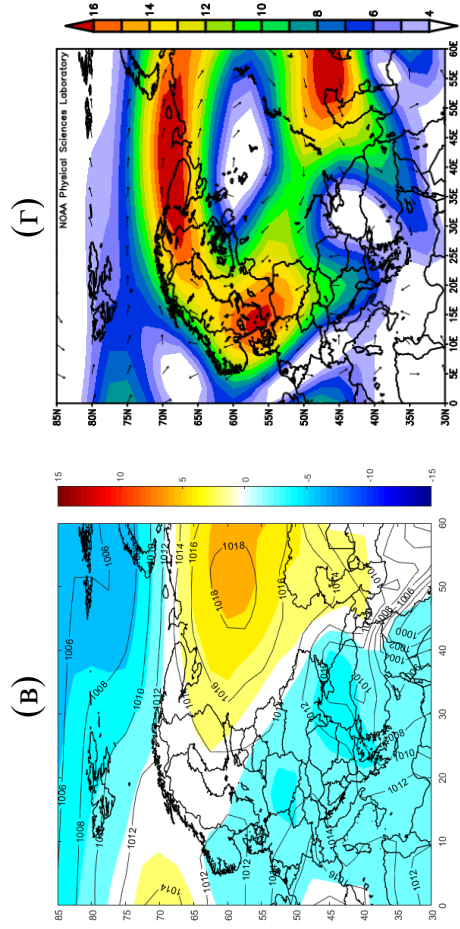
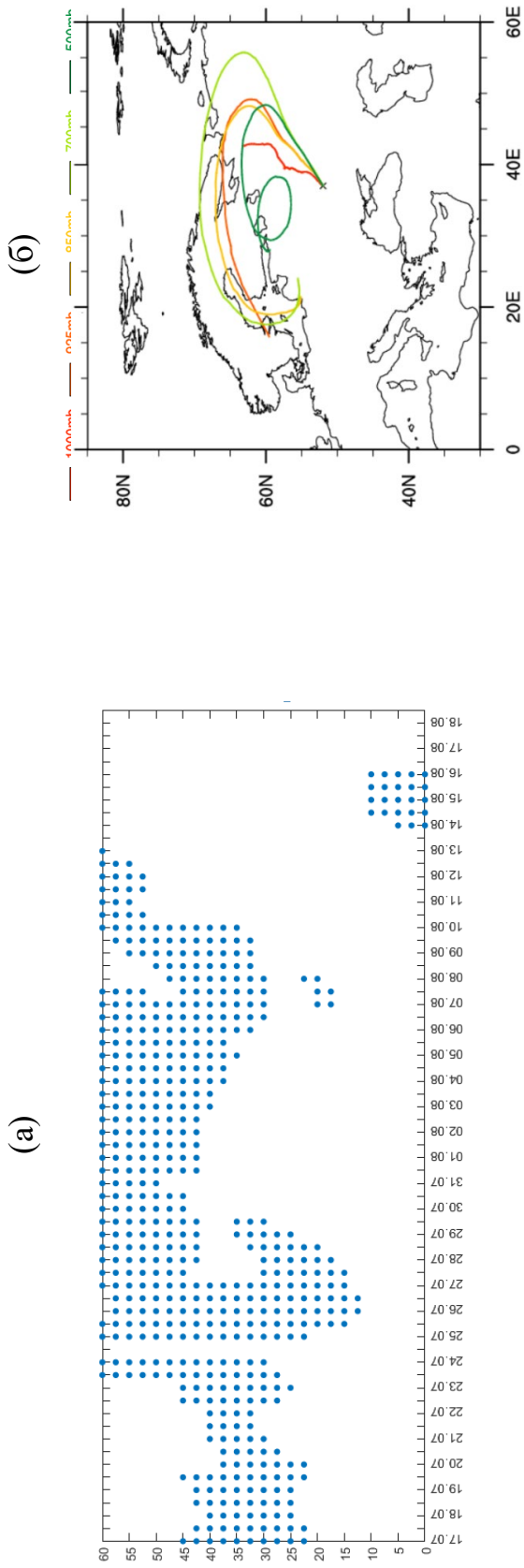


Рисунок 3.1 – Поле критерію Тібальді – Мольтені (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 52° півн.ш., 37° сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струминної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 17 липня – 18 серпня 2010 р.



Оскільки горизонтальний баричний градієнт над Україною в цей період становить менше ніж 1 гПа/111 км, то цей тип хвилі тепла можна віднести до типу А – радіаційно-адвективного типу, тобто у встановленні цієї хвилі тепла більшу роль зіграв радіаційний фактор, що є підтверджується існуванням хвилі тепла впродовж тривалого часу (32 дні). Цей антициклон за класифікацією, яка була запропонована європейськими вченими [54], належить до підтипу А1, для якого є характерними антициклонічні зворотні траєкторії на всіх рівнях до висоти 500 гПа (рис. 3.1 б), лише за одним виключенням: хвиля тепла формується у баричному гребені, який поширюється зі сходу (рис. 3.1 в), а не від Азорського максимуму.

Поле аномалій положення струминної течії (рис. 3.1 г) вказує на добре розвинену хвилю Росбі з відсіченим антициклоном з центром над Північною Європою: у більш високих широтах домінують західні течії, над південними районами Європи, навпаки, - східні. Це добре знайомий випадок зберігання хвилі тепла за рахунок тривалого існування антициклонічної циркуляції у верхній тропосфері [37]. Нещодавно було показано, що такі умови можуть підсилюватись додатними аномаліями температури поверхні Середземного моря [24] Можна припустити, що цей епізод так добре виявляється в полі індексу Тібальді-Мольтені саме через добре розвинену хвилю Росбі, оскільки саме цей критерій добре визначає блокування, яке розвивається внаслідок обвалення хвиль Росбі.

Наступним за інтенсивністю випадком є епізод з хвилею тепла 2015 р., коли надзвичайно інтенсивна і тривала хвиля тепла охопила на початку серпня всю територію Європейського Союзу і вже 4 серпня поширилась на територію Західної України, зайнявши третину території країни. Значення індексу інтенсивності хвилі тепла для 4-16.08.2015 р. становило 29,8 (табл. 3.1).

Цей випадок набагато гірше виявляється в полі індексу Тібальді – Мольтені, хоча в першій половині існування хвилі тепла атмосферний блокінг на території Західної України досить яскраво виражений в полі критерію (рис. 3.2 а).

Осередок хвилі тепла був локалізований над територією Центральної Європи впродовж всього періоду існування з додатними аномаліями температури повітря до 6-7°C в граничному шарі (рис. 3.2 д,е).

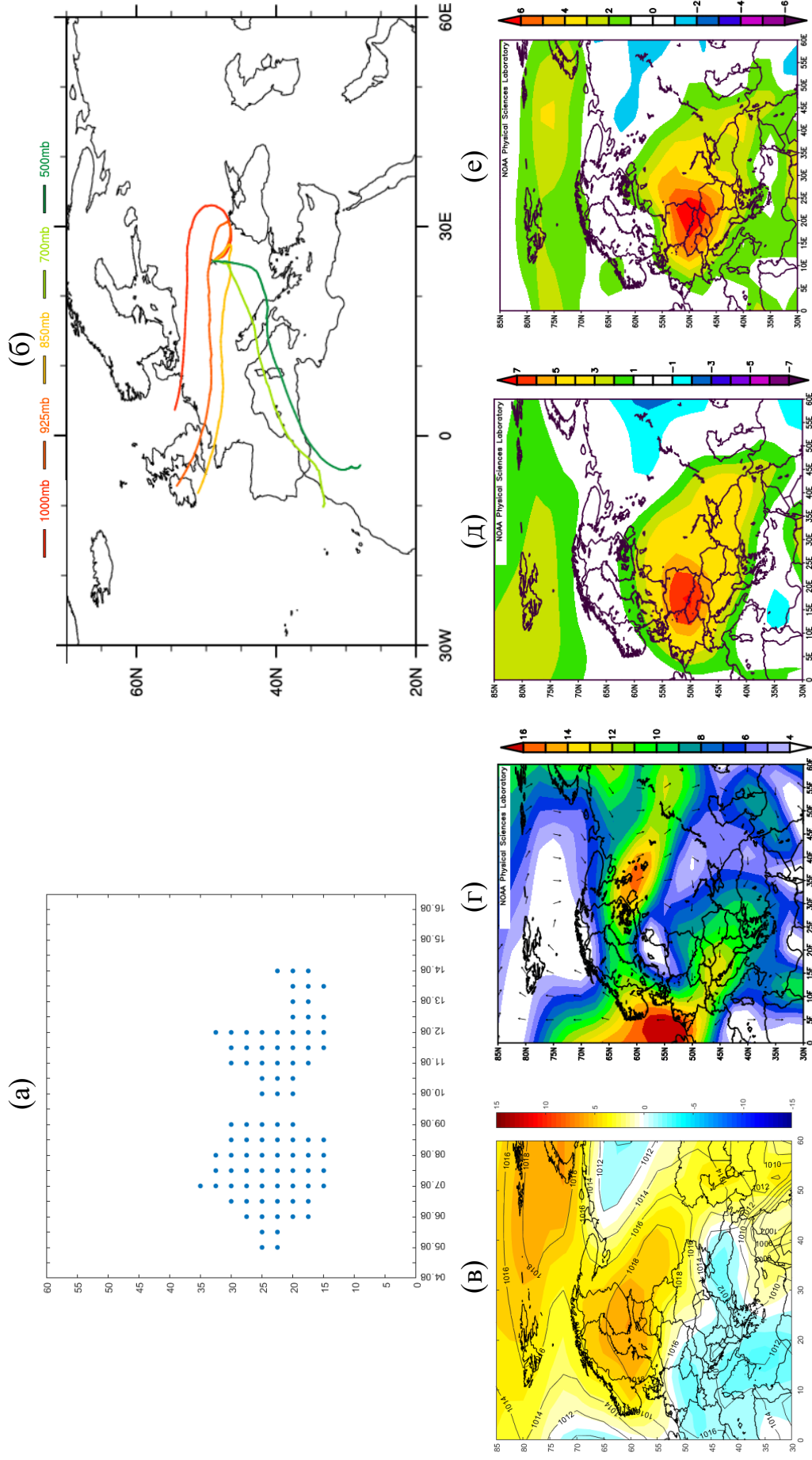


Рисунок 3.2 – Поле критерію Тібальді – Мольєні (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 49° півн.ш., 25° сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струминної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 4–16 серпня 2015 р. 27

В цей період над територією Західної України спостерігається розмите поле тиску (рис. 3.2 в) і траєкторії повітряних часток є досить короткими, що свідчить про радіаційно-адвективний тип формування хвилі тепла, при якому головну роль відіграє радіаційний фактор. П'ятиденні зворотні траєкторії в граничному шарі мали антициклональну кривизну (рис. 3.2 б). Тому цей випадок як і випадок 2010 р. можна віднести до типу А1. Теплий гребінь розповсюджувався з північно-східних районів Європи.

На рівні 300 гПа як і в попередньому епізоді є яскраво вираженою антициклонічна циркуляція з центром над Балтійським морем (рис. 3.2 г). Додатні аномалії швидкості вітру мали над всієї територією, яку охоплює антициклон, над територією України і на схід від території України ці аномалії є найменші, на відміну від території Північної і Західної Європи, де відхилення швидкості сягало 14-16 м/с.

Наступною за інтенсивністю хвилею тепла є хвиля, яка спостерігалась в період 25 липня – 9 серпня 1994 р. (табл. 3.1). Вона тривала впродовж 16 днів і охоплювала менше 20% території України, але її максимальна магнітуда була вища за магнітуду хвилі тепла 2015 року, хоча середня магнітуда була на декілька пунктів менша.

Хвиля тепла охопила практично всю територію Європи з епіцентром на території Польщі (рис. 3.3 д,е), де аномалії добової максимальної температури становили більше 12°C за семиденний період [29].

Біля поверхні землі спостерігається великий неінтенсивний антициклон (рис. 3.3 в), аномалії в центрі якого порівняно з кліматичною нормою становлять 5 гПа. Баричний гребінь поширюється від Азорського антициклону, який в цей період є погано виражений, оскільки в області Азорського максимуму спостерігаються від'ємні аномалії тиску. В полі критерію Тібальді – Мольтені блокування, простежуючись до східної довготи 40°, є добре вираженим в середині періоду блокування і існування хвилі тепла (рис. 3.3 а), але все ж таки не визначає повністю територію, яка охоплена стаціонарним антициклоном.

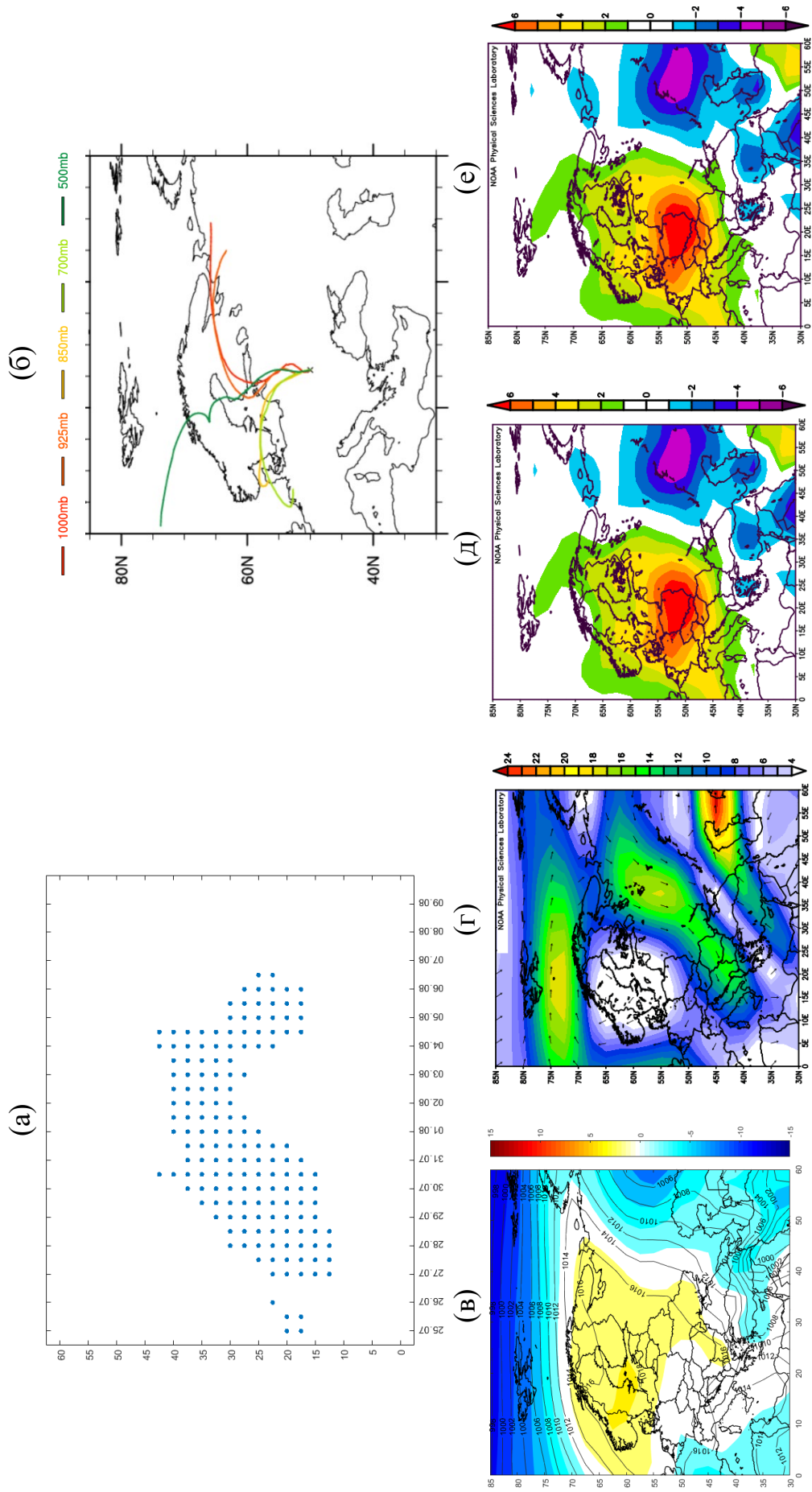


Рисунок 3.3 – Поле критерію Тібальді – Мольтені (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 50°півн.ш., 26°сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струминної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 25 липня – 9 серпня 1994 р.

Як показує критерій Тібальді-Мольтені антициклон в середині існування хвилі тепла посилюється на території України і послаблюється на території Європейського Союзу, на початку і наприкінці періоду – навпаки.

Західна Україна в період існування хвилі тепла знаходиться в малоградієнтному полі, в якому градієнт тиску набагато менший за 1 гПа/ 111 км, тому цю хвилю можна віднести до типу А і, оскільки зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних часток біля поверхні землі мають антициклональну кривизну, цей епізод може бути віднесений також до підтипу А1 (рис. 3.3 б). Траєкторії на більш високих рівнях мають циклонічну кривизну і частинки рухались з території північної Атлантики.

Так само як і в попередніх епізодах на рівні 300 гПа є добре вираженою хвиля Росбі і антициклон з центром над півднем Скандинавського півострова, додатні аномалії швидкості сягають дуже високих значень порівняно з попередніми випадками у 20 м/с. В області найбільш високих температур спостерігаються північно-східні потоки.

В період 13 – 28 червня 1964 р. на території України мала місце досить тривала і інтенсивна хвиля тепла (табл. 3.1). Вона охопила більше, ніж п'яту частину території України і її максимальна магнітуда навіть перевищила максимальну магнітуду двох попередніх епізодів, але за середньою магнітудою її інтенсивність була менша.

Хвиля тепла мала місце над територією Східної Європи, найвищі температури і найвищі відхилення від кліматичної норми в граничному шарі атмосфери було зареєстровано на території Білорусі, України і Польщі (рис. 3.4 д, е). Порівняно з попередніми випадками найбільші аномалії середньодобової температури спостерігались на рівні 850 гПа, біля поверхні землі аномалії є помітно меншими. Цей випадок є досить цікавим, оскільки в період 1961 – 1990 рр. середньодобові і максимальні температури порівняно з наступними десятиріччями були набагато нижче, але епізод виявився більш інтенсивним, ніж більшість хвиль тепла в ХХІ сторіччі.

Хвиля тепла спостерігалась в розмитому антициклональному полі (рис. 3.4 в), що вказує, що хвилю тепла можна віднести також до типу А.

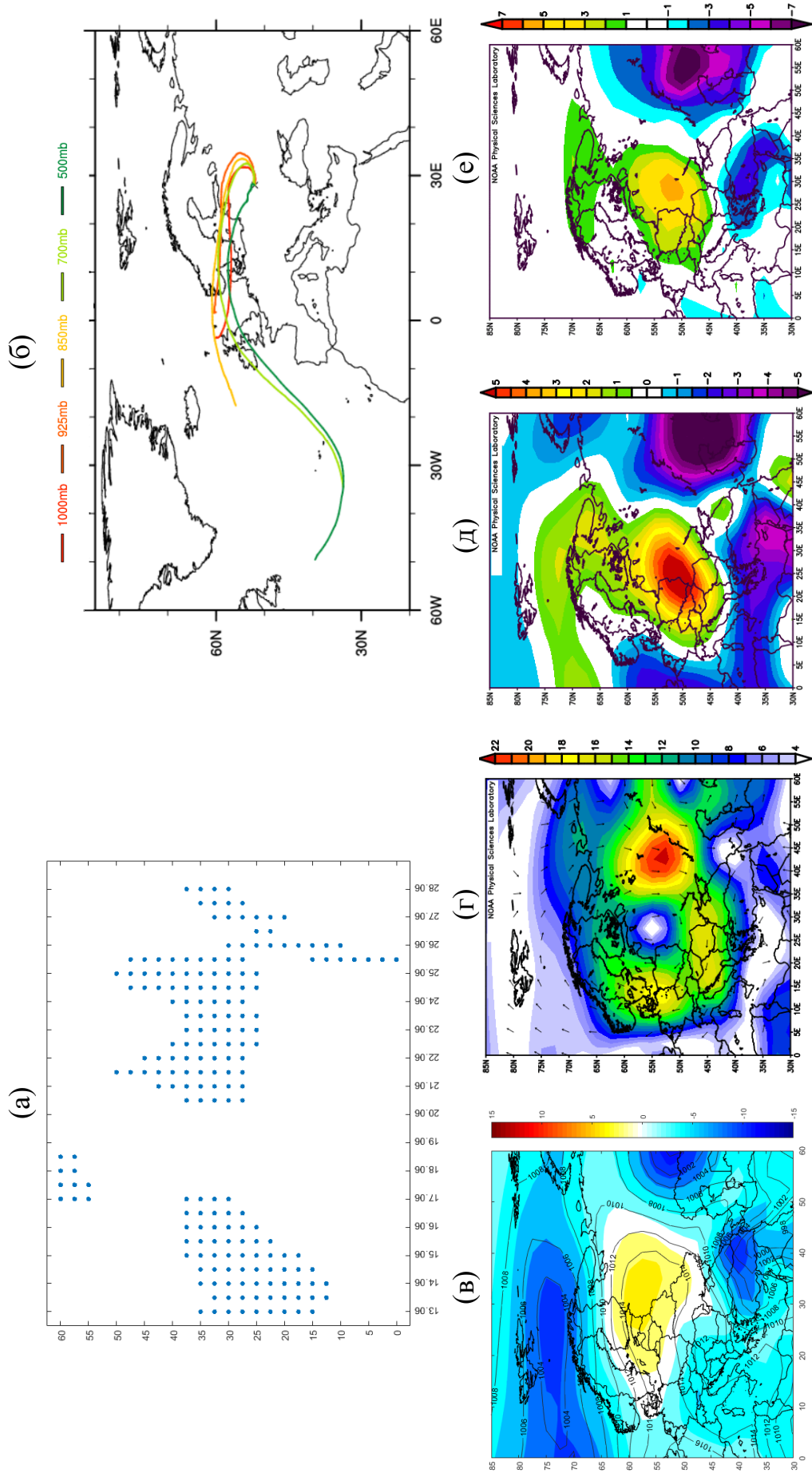


Рисунок 3.4 Поле критерію Тібальді – Мольтені (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 52° півн.ш., 28° сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струминної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 13 – 28 червня 1964 р. 31

Таким чином, хвилю тепла можна віднести до радіаційно-адвективного типу.

Зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних часток на всіх висотах мали добре виражену антициклональну кривизну, що вказує на підтип А1. Повітряні частинки було перенесено з районів Центральної Атлантики.

На поверхні 300 гПа струминна течія має яскраво виражену антициклональну кривизну, що вказує на добре сформовану хвилю Росбі з відсіченим антициклон з центром над територіями, де саме спостерігаються найбільші аномалії середньодобової температури. Аномалії швидкості вітру сягають значень 20-22 м/с.

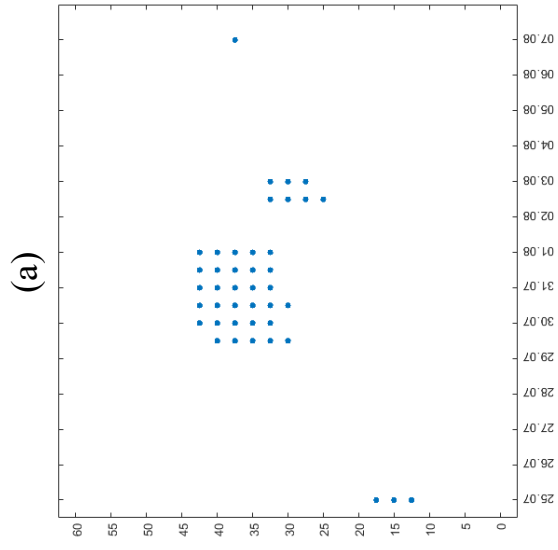
Наступна за інтенсивністю є хвиля тепла 25 липня – 7 серпня 2012 р., яка тривала 14 днів, мала максимальну магнітуду 30,5 і охоплювала практично третину території України (табл. 3.1).

Додатні аномалії середньодобової температури повітря біля поверхні землі сягали  $+5^{\circ}\text{C}$  і охоплювали територію Румунії, Молдови, України, Білорусі і частину Західної Росії і акваторії Чорного моря (рис. 3.5 е). На верхній межі граничного шару аномалії температури сягали  $+4^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.5 е). На території України хвиля тепла проявлялась в перші дні на заході, а потім поступово поширювалась на схід.

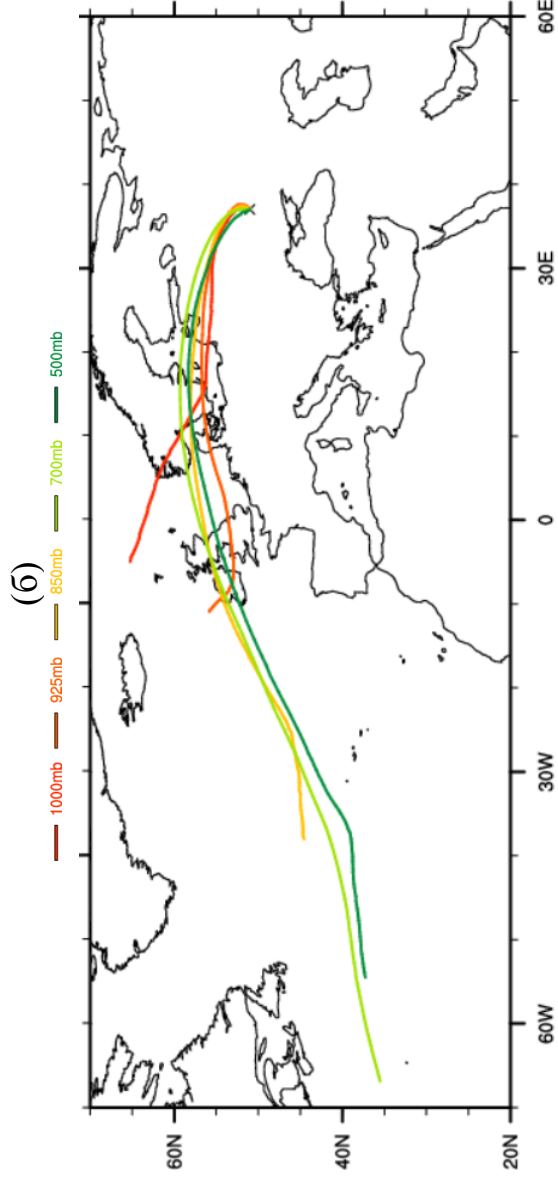
Хвиля тепла спостерігалась в баричному полі підвищеного тиску, яка була розташована над Західною Росією, і з якою були пов'язані додатні аномалії в полі тиску до 5 гПа (рис. 3.5 в). Територія України і більшості інших країн, охоплених понаднормовими середньодобовими температурами знаходилась на периферії антициклону, де мали місце нульові або навіть від'ємні аномалії тиску.

В полі критерію Тібальді-Мольтені антициклон був виявлений дуже погано – лише впродовж двох днів і тільки в східних районах України (рис. 3.5, а).

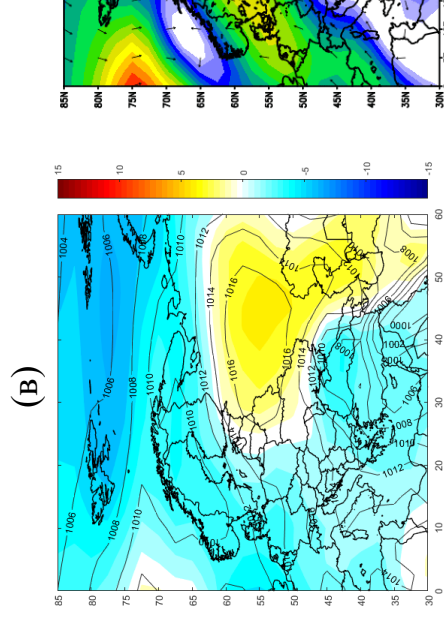
Даний епізод хвилі тепла належить до типу В, оскільки над територією України в цей час спостерігається згущення ізобар (великі градієнти тиску), пов'язане з тим, що Україна знаходилась в перехідній зоні між циклоном та антициклоном (рис. 3.5, в).



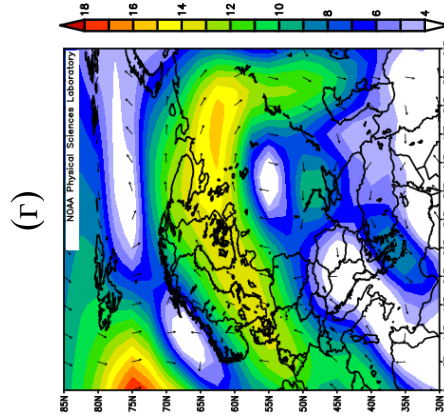
(а)



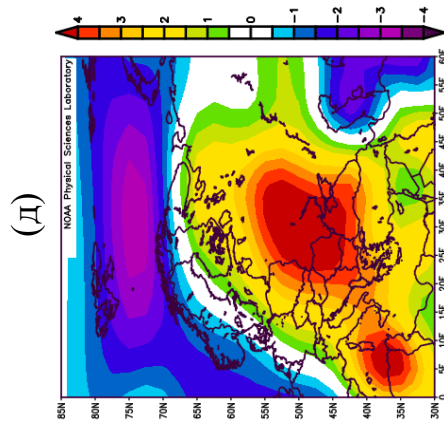
(б)



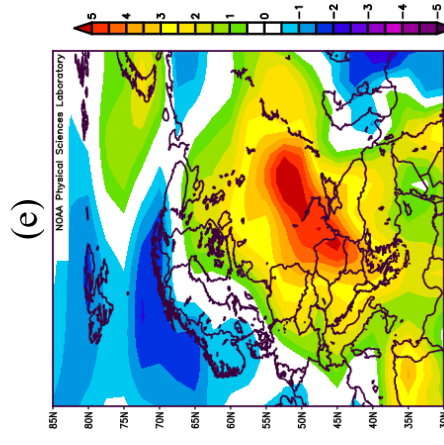
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 3.5 – Поле критерію Тібальді – Мольтені (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 51° півн.ш., 37° сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струминної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 25 липня – 7 серпня 2012 р.



Цей висновок підтверджується і побудовою п'ятиденних зворотних траєкторій повітряних частинок на різних висотах, які надійшли на рівні верхньої межі граничного шару і вище з Західної або Центральної Атлантики, а біля поверхні землі – з Північної Атлантики. Такі тривалі траєкторії вказують на великі баричні градієнти (рис. 3.5, б). Таким чином, дана хвиля тепла є хвилею адвективно-радіаційною, а отже в її розвиток більший внесок зробив адвективний фактор. Цей випадок за класифікацією, запропонованою в [54], можна віднести до другого підтипу типу В, який характеризується місцем зародження повітряних частинок над субтропічною Атлантикою на нижніх і середніх рівнях тропосфери, і, хоча повітряні частинки біля поверхні землі сформувались не над північно-західною Африкою, а над Північною Атлантикою, інші ознаки дозволяють цей тип віднести до другого підтипу.

Так, на рівні 300 гПа, так само як і в другому підтипі типу В над районом додатних температурних аномалій розташований центр антициклону, по периферії якого відбувається інтенсивне винесення теплого повітря з Північної Африки до Північної Європи, що визначає також інтенсивну адвекцію у нижніх шарах тропосфери (рис. 3.5, г).

Додатково важливу роль відіграє область високого тиску, розташована над Анатолією, звідки відбувається адвекція тепла на територію України.

Досить інтенсивною хвилею тепла виявилась хвиля 18-27 серпня 2007 р., яка існувала впродовж усього 10 днів, а за максимальною магнітудою сягала лише 25,0 одиниць, але є рекордною за охопленням території – було охоплено більше половини України цією хвилею (табл. 3.1).

Хвиля тепла була пов'язана зі смугою високого тиску яка поширювалась від великого антициклону над територією Західною Росії і простягалась через північні райони Європи (рис. 3.6, в). Додатні аномалії тиску, які спостерігались в області антициклону, сягали значень у 6-7 гПа.

Область максимальних додатних температурних аномалій була розташована на території Західної Росії (аномалії становили 8°C), розповсюджуючись на більш західні території і визначаючи не такі високі, але також досить суттєві аномалії на цій території в усій товщі граничного шару (рис. 3.5, д, е).

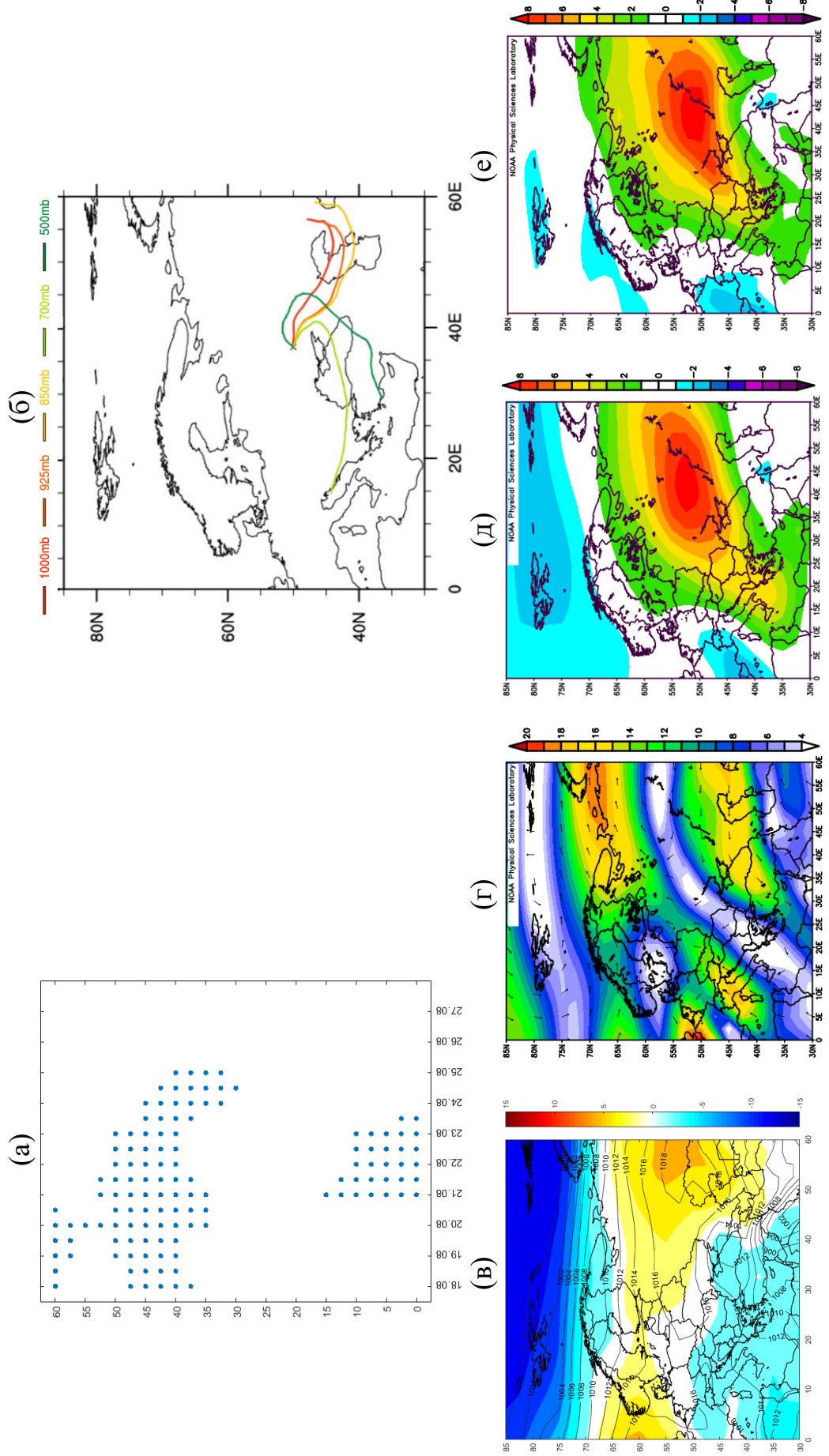


Рисунок 3.6 – Поле критерію Тібальді – Мольтені (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 50°півн.ш., 37°сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струминної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 18-27 серпня 2007 р.

Ця смуга високого тиску досить добре виявляється в просторово-часовому розподілі критерію Тібальді-Мольтені (рис. 3.6, а). Можна бачити, що вона повністю зникає в цьому полі наприкінці епізоду, але на початку і в середині – досить добре простежується і в західних районах, і в східних районах Європейського континенту (рис. 3.6, а).

Оскільки територія України знаходиться в полі малоградієнтного гребеня, то баричні градієнти, які спостерігались в цей період були слабкими, тому розглядувану хвилю тепла можна віднести до типу А, який характеризує радіаційно-адвективний тип хвиль (рис. 3.6, в). Зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних часток мають циклональну кривизну і надходять у граничному шарі з Туранської низовини, а в нижній і середній тропосфері – з Середземномор'я (рис. 3.6, б), тому цей тип можна віднести до другого підтипу. Такий тип породжує інтенсивне радіаційне нагрівання, яке як і в підтипі А1, робить важливий внесок у підтриманні існування високих температур, які підтримуються неінтенсивною, але тривалою адвекцією теплого повітря з Анатолії.

Інтенсивний гребінь, по периферії якого відбувається струминною течією винесення теплого повітря у верхній тропосфері з північного заходу до північного сходу Європи, підсилює процеси біля поверхні землі.

Наступною за інтенсивністю хвилею тепла є хвиля тепла 3 – 15 липня 2002 р. Епізод спостерігався впродовж 13 днів, хвиля тепла охопила 405 території України, її максимальна магнітуда сягала 27,5 одиниць.

Впродовж епізоду середньодобова температура в граничному шарі атмосфери перевищувала кліматичну норму періоду 1981 – 2010 рр. найбільше на 6 – 7°C, що для інтенсивних хвиль тепла не є понаднормовим перевищенням, але хвилею тепла було охоплено весь Європейський континенті і північні райони Атлантики (рис. 3.7, д,е). І хоча найбільшу інтенсивність вона мала на території України, але і над рештою території перевищення становило близько 2 – 3°C.

Хвиля тепла була пов'язана з великим двоцентровим антициклоном, один з центрів якого знаходився над Західною Росією, а інший – над Північною Атлантикою (рис. 3.7, в).

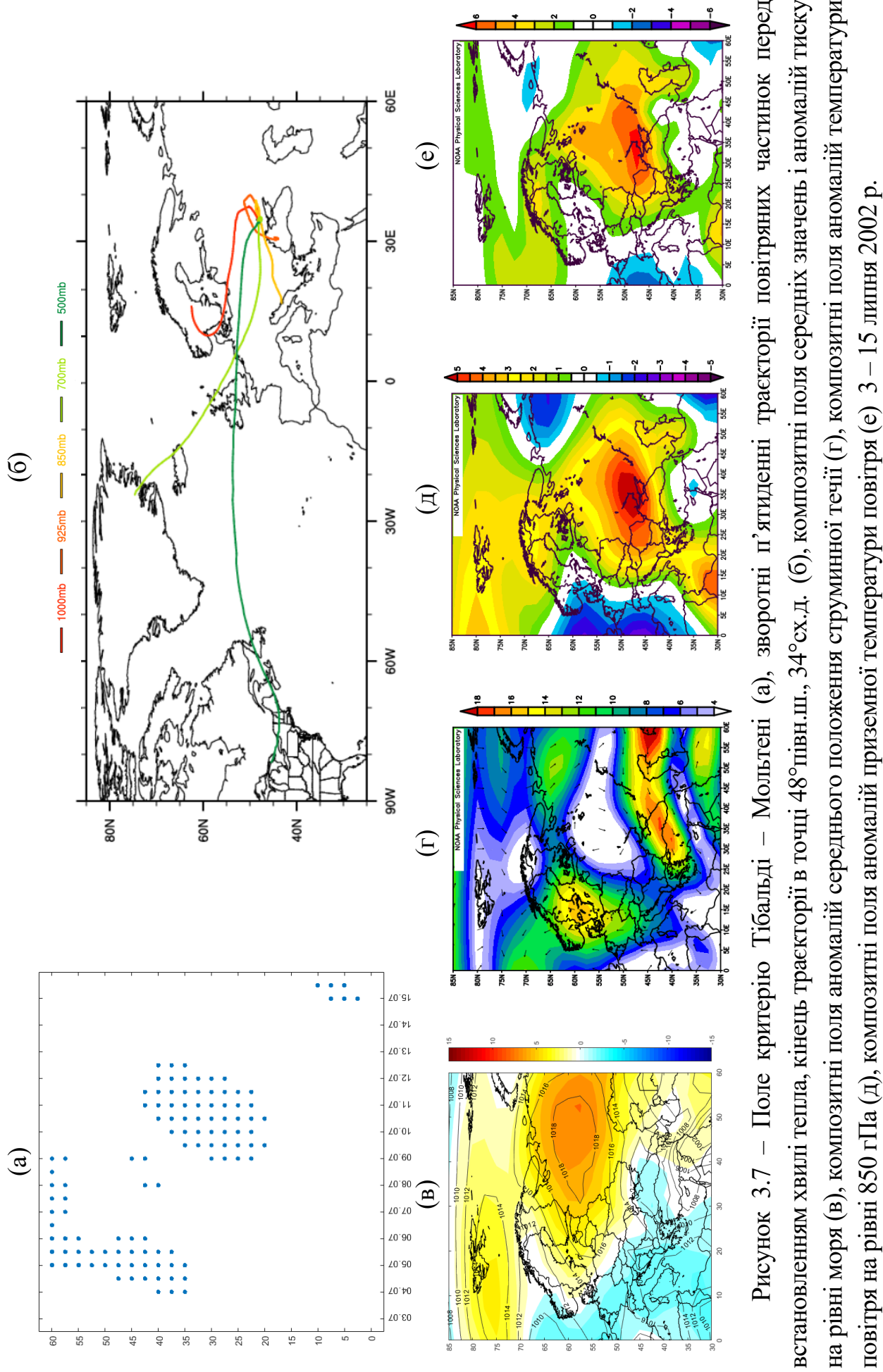


Рисунок 3.7 – Поле критерію Тібальді – Мольтені (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 48° півн.ш., 34° сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струмінної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 3 – 15 липня 2002 р.

Найбільші додатні аномалії тиску, пов'язані саме з антициклоном над Західною Росією, і сягають приблизно 7 – 8 гПа, над районами Північної Атлантики аномалії становили приблизно 5 гПа (рис. 3.7, в).

Проте така велика зона підвищеного тиску досить погано виявляється в полі індексу Тібальді – Мольтені: на сході можна було простежити блокування впродовж 5 липня і в Центральній Європі протягом 10 – 12 липня.

Над територією України баричні градієнти були меншими за 1 гПа на 111 км, тому хвилю тепла може бути віднесено до радіаційно-адвективного типу, типу А (рис. 3.7, в). Оскільки траєкторії мають, хоча і невелику, але антициклональну кривизну, то цей епізод можна віднести до підтипу А1.

Слід звернути увагу, що, хоча біля поверхні землі відзначаються невеликі градієнти, але, зважаючи на траєкторії, в нижній і середній тропосфері градієнти суттєві, оскільки за п'ять днів частинки подолали відстані в тисячі кілометрів: повітряні частинки на поверхні 500 гПа надійшли аж зі східних берегів Північної Америки.

На поверхні 300 гПа простежується добре сформована хвиля Росбі з відсіченим антициклоном, який має великий центр саме над районами, де простежувались найбільші додатні аномалії температури (рис. 3.7, г). Винесення повітря у верхній тропосфері в райони формування хвилі тепла відбувається з півдня на північ уздовж периферії антициклону, найінтенсивніші потоки спостерігаються на південній периферії антициклону.

Хвиля тепла 3 – 17 липня 1996 р. охоплювала п'яту (21,8%) частину території України і тривала 17 днів (табл. 3.1). Максимальна магнітуда цього епізоду становила 32,5 одиниць, тому за цим параметром цю хвилю можна порівняти з найінтенсивнішими хвилями тепла, які спостерігались в Україні, але за середнім значенням – хвиля тепла була значно менш інтенсивною.

Викликано це підвищення температури невеликим неінтенсивним антициклоном, який окреслювався ізобарою лише 1014 гПа, і знаходився над Середньоруською височиною, хоча, слід зазначити, що в цей періоду для даного регіону є характерним більш низький тиск, оскільки відзначаються додатні аномалії тиску (рис. 3.8, в).

Даний антициклон сформувався як відріг Азорського максимуму, який поширився на всю територію південною Європи аж до 60° сх. довг.

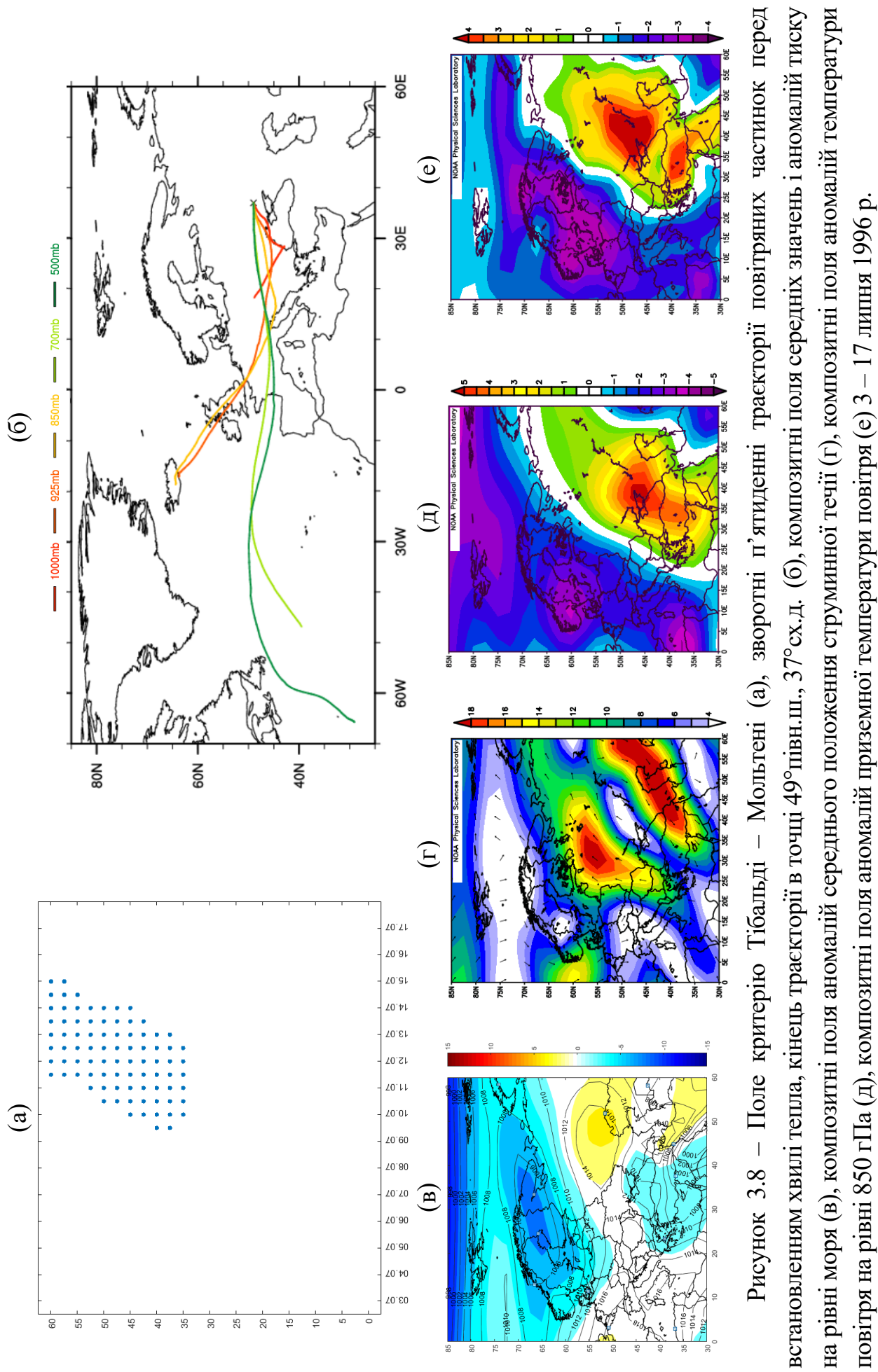


Рисунок 3.8 – Поле критерію Тібальді – Мольтені (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 49° півн.ш., 37° сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струмінної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 3 – 17 липня 1996 р.

Теплий баричний гребінь пов'язаний з додатними аномаліями температури не тільки біля поверхні землі, але і на поверхні 850 гПа (рис. 3.8, д, е). В полі Тібальді – Мольтені антициклон простежується досить нетривалий час у другу половину епізоду з 35 по 60° сх. довг.

Баричне поле над територією України є досить розмитим, оскільки саме тут проходить малоградієнтна ділянка між баричним гребенем, який поширився від Азорського максимуму, і відсіченим від нього вторинним антициклоном. Тому цей епізод можна віднести до радіаційно-адвективного типу, типу А.

Зворотні п'ятиденні траєкторії мають циклонічну кривизну, повітряні частинки у середній і нижній тропосфері надійшли з тропічних районів Атлантики, а частинки у граничному шарі атмосфери рухались з Північної Атлантики, за виключенням траєкторії біля поверхні землі, яка мала дуже маленьку довжину через слабкі баричні градієнти (рис. 3.8, б).

На поверхні 300 гПа струминна течія розділяється на дві гілки, в одній з яких потужний потік спрямований з південного заходу на північний схід, в іншій, – навпаки, домінують потужні потоки зі східною складовою (рис. 3.8, г). Найбільші аномалії середньодобової температури біля поверхні землі мають місце саме під центром висотного антициклону.

Наступна хвиля тепла, яка мала місце 30 червня – 11 липня 2012, передувала більш інтенсивному епізоду, який був зареєстрований з 25 липня по 7 серпня 2012 р. Даний випадок охоплював більшу частину України (42,3% території), але набагато менш інтенсивною (табл. 3.1).

Як і інший епізод 2012 р. дана хвиля тепла сформувалась в антициклоні, який сформувався в гребені, який розповсюджувався від Азорського максимуму (рис. 3.9, в). Антициклон не інтенсивним, але додатні аномалії тиску спостерігаються в області цього баричного утворення і сягають 5 гПа.

Додатні аномалії середньодобової температури в граничному шарі атмосфери мале місце над великою територією, охоплюючи регіони від Північної Африки до 60° сх. довг., з осередком над Центральною Європою (рис. 3.9, д, е).

В полі індексу Тібальді – Мольтені антициклон простежується нетривалий час з 2 по 5 липня в області, яка окреслена 30° по 50° сх. довг. (рис. 3.9, а).

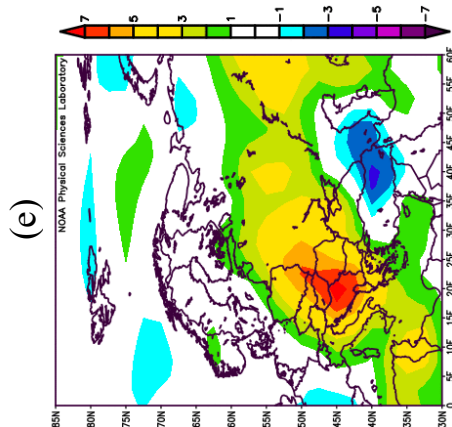
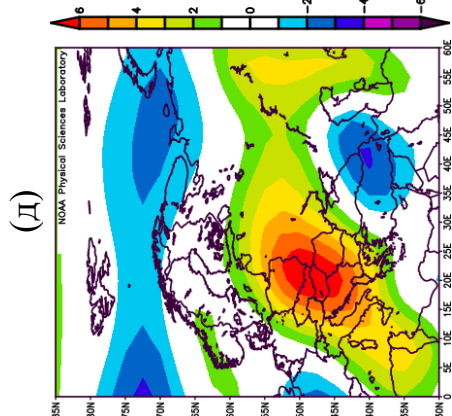
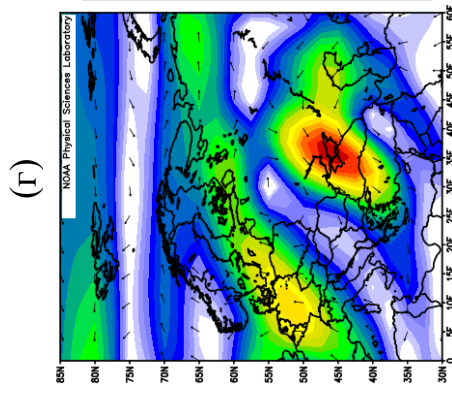
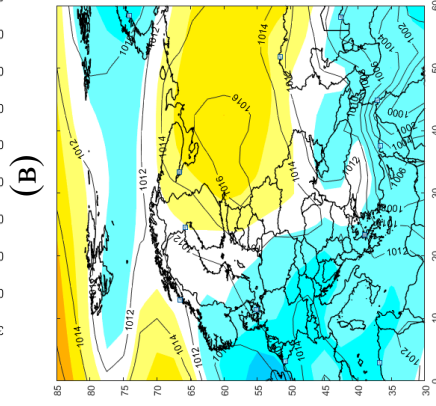
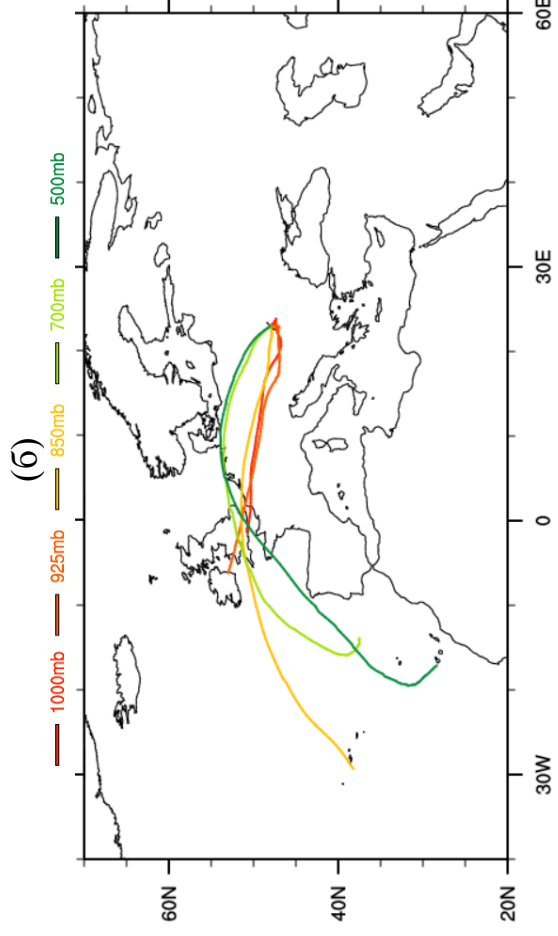
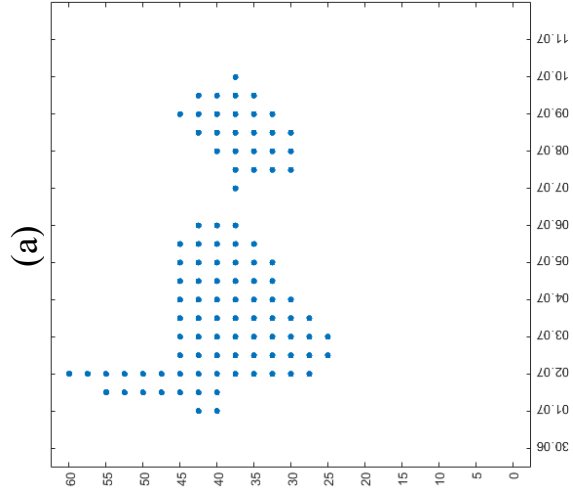


Рисунок 3.9 – Поле критерію Тібальді – Мольтені (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 48° півн.ш., 23° сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струминної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 30 червня – 11 липня 2012 р.



Інший епізод 2012 р. також не демонстрував просторово-часової неперервності в полі критерію Тібальді-Мольтені (рис. 3.5, а).

Територія України знаходилась в розмитому полі підвищеного тиску, тому баричні градієнти біля поверхні землі були слабкими, і, таким чином, хвилю тепла можна віднести до типу, в формуванні якого найбільшу роль відіграє радіаційний чинник, тобто типу А, на відміну від іншого випадку 2012 р., який був віднесений до адвективно-радіаційного типу.

Побудовані зворотні п'ятиденні траєкторії мають циклонічну кривизну, що вказує на підтип хвилі тепла А2 (рис. 3.9, б). Повітряні частинки в середній і верхній тропосфері зароджувались біля берегів Північної Африки, а траєкторії повітряних частинок біля поверхні землі починались над Британськими островами.

Антициклонічна циркуляція у верхній тропосфері не так добре виражена, як зазвичай це є характерним для радіаційно-адвективного типу. Струминна течія розділяється на дві частини, одна з яких являє собою потік з південного заходу на північний схід, а в інший потужний потік спрямований з північного сходу на південний захід (рис. 3.9, г). Найбільші аномалії температури відповідають області, яка розділяє ці дві гілки струминної течії.

Десятою з найінтенсивніших хвиль тепла в період з 1961 по 2019 рр. є епізод 2016 р., який тривав 12 днів (17 по 28 червня) і охоплював 16,8% території України. Максимальна і середня магнітуди цього випадку були найменшими порівняно з усіма попередніми випадками.

Хвиля тепла охоплювала практично увесь Європейський континент в граничному шарі атмосфери (рис. 3.10, д, е).

Цей епізод не відстежується у полі індексу Тібальді-Мольтені (рис. 3.10, а).

Цей випадок цікавий тим, що антициклон, з яким пов'язано формування хвилі тепла, розташований над територією України (рис. 3.10, в) і утворився в гребені, що розповсюджувався від Азорського максимуму. Антициклон є досить інтенсивним (тиск в центрі становить більше 1018 гПа) і великим баричним утворенням, в області якого спостерігаються суттєві аномалії тиску, які сягають 6-7 гПа. Хвилю тепла могла ще підсилювати адвекція теплого повітря з території Турції і Кавказьких гір біля поверхні землі.

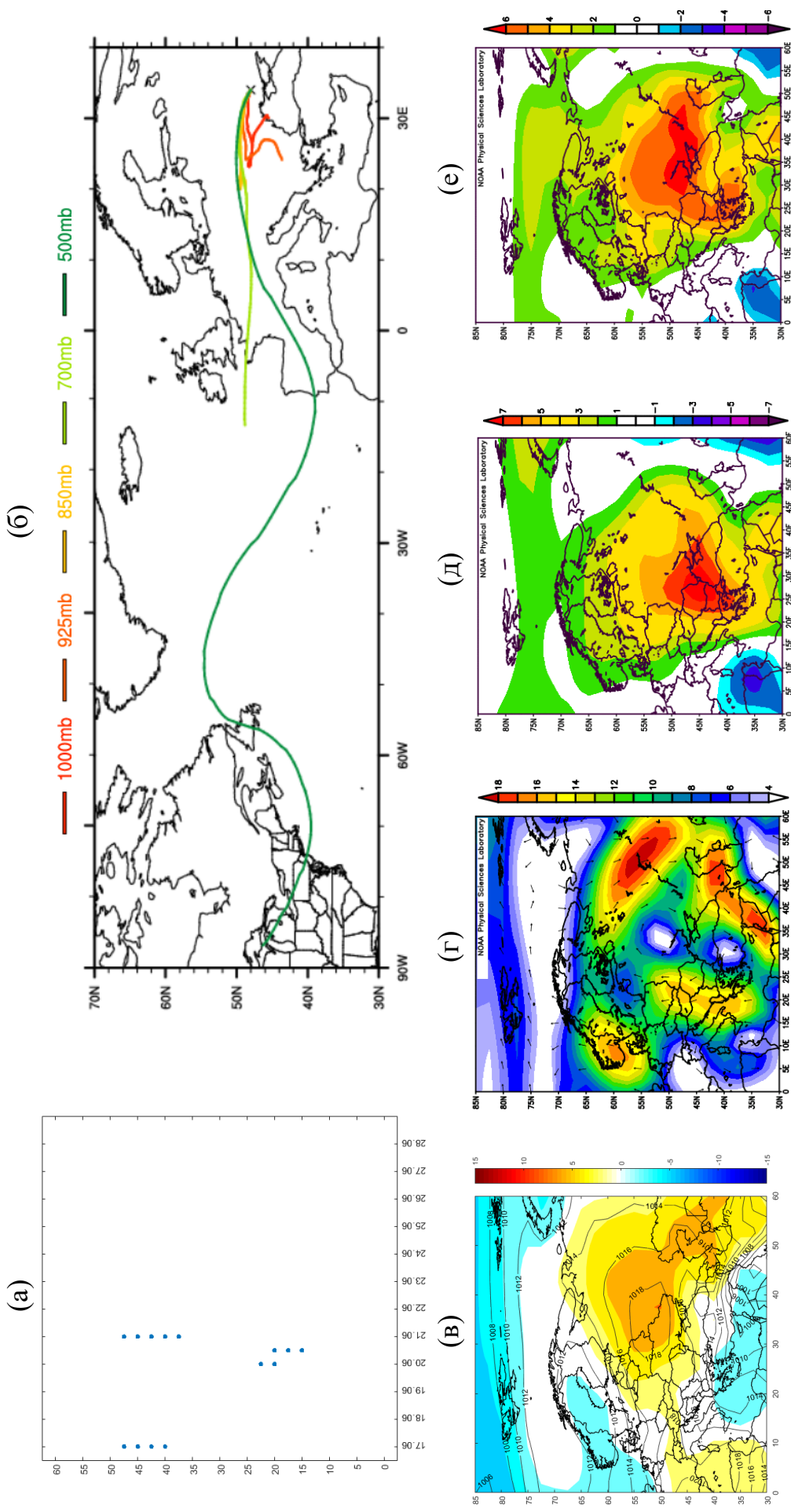


Рисунок 3.10 – Поле критерію Тібальді – Мольєні (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 48° півн.ш., 34° сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струминної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 17-28 червня 2016 р. 43

Над територією України має місце малоградієнтне поле, з чого можна зробити висновок, що хвилю тепла можна віднести до радіаційно-адвективного типу.

Зворотні п'ятиденні траєкторії в граничному шарі атмосфери є дуже короткими, що ще раз вказує на слабкі баричні градієнти, і мають циклонічну кривизну. В середній і нижній тропосфері траєкторії набагато довші: наприклад, повітряна частинка, яка рухалась на рівні 500 гПа, надійшла зі східних районів Північної Америки (рис. 3.10, б), і також мають циклонічну кривизну. Таким чином, хвилю тепла можна віднести до підтипу А2.

У верхній тропосфері над територією, охопленою хвилею тепла, спостерігається яскраво виражена антиклонічна циркуляція (рис. 3.10, г). Антициклон має два осередки, які відповідають найбільшим додатним аномаліям температури біля поверхні землі.

Остання хвиля тепла, яка була обрана як найінтенсивніша, це епізод, який тривав 18 діб з 10 по 27 червня 2019 р., і охоплював практично третину території України (табл. 3.1). За середньою магнітудою цей випадок виявився найменш інтенсивним, але за максимальною магнітудою цей епізод є більш інтенсивним за всі попередні, виключаючи хвилю тепла 2010 р.

Хвиля тепла, як і в попередньому випадку 2016 р., охоплює практично увесь Європейський континент за виключенням північно-східних районів. Аномалії середньодобової температури простежуються не тільки біля поверхні землі, але і на висоті поверхні 850 гПа (рис. 3.11, д, е). Область максимальних додатних температурних аномалій спостерігались над Центральною і Південною Європою.

Цей випадок в першій половині добре виявляється в полі індексу Тібальді-Мольтені (рис. 3.11, а) в усій області дослідження, але в другій половині епізоду блокування не відстежується.

Антициклон, з яким пов'язано формування хвилі тепла, утворився в гребені, що поширюється від антициклону, розташованим над Північною Атлантикою, в південно-східному напрямку до 45° півн. ш. (рис. 3.11, в). З антициклоном пов'язані суттєві аномалії тиску, які сягали 6-7 гПа.

Над територією України спостерігається малоградієнтне баричне поле, що відносить хвилю тепла до радіаційно-адвективного типу (рис. 3.11, в).

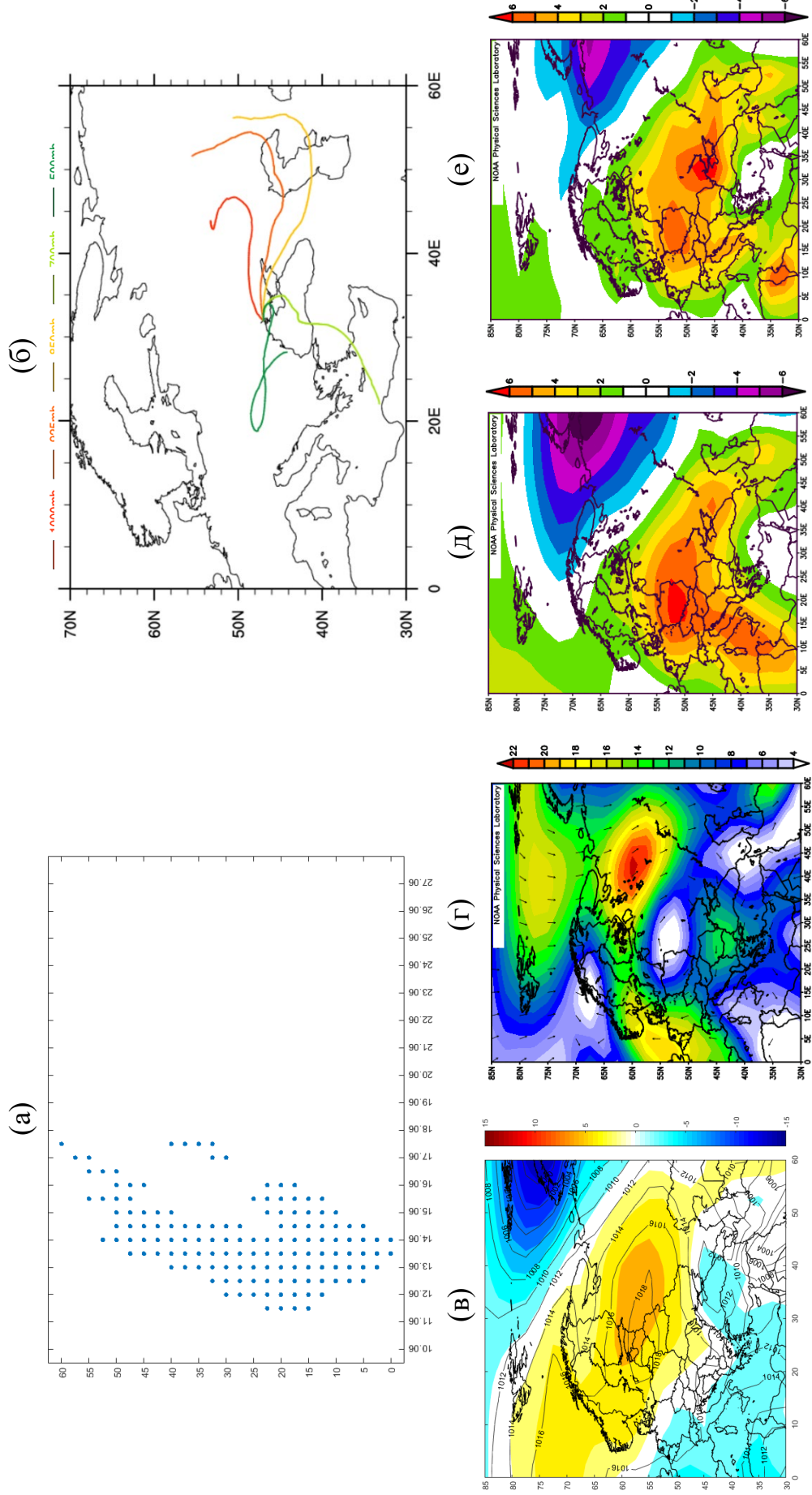


Рисунок 3.11 – Поле критерію Тібальді – Мольтені (а), зворотні п'ятиденні траєкторії повітряних частинок перед встановленням хвилі тепла, кінець траєкторії в точці 47° півн.ш., 32° сх.д. (б), композитні поля середніх значень і аномалій тиску на рівні моря (в), композитні поля аномалій середнього положення струмінної течії (г), композитні поля аномалій температури повітря на рівні 850 гПа (д), композитні поля аномалій приземної температури повітря (е) 10 – 27 червня 2019 р. 45

Побудовані зворотні п'ятиденні траєкторії в граничному шарі атмосфери, демонструють, що повітряні частинки рухались в антициклонічному напрямку зі Східно-Європейської рівнини. Траєкторії є досить короткими, що вказує на слабкі баричні градієнти. Райони формування повітряних частинок в середній і нижній тропосфері знаходились над Середземномор'ям і Чорним морем відповідно (рис. 3.11, б). Антициклональний характер траєкторій дозволяє віднести хвилю тепла до підтипу А1, як і більшість хвиль тепла типу А.

Над районами, охопленими хвилею тепла, у верхній тропосфері спостерігається добре розвинена хвиля Росбі з відсіченим антициклоном, осередок якого співпадає з максимальними додатними температурними аномаліями (рис. 3.11, г). Такий відсічений антициклон впродовж тривалого часу може підтримувати інтенсивність хвилі тепла. Аномально спекотна погода впродовж тривалого часу могла також підтримуватись додатними аномаліями температури поверхні Середземного моря.

### 3.2 Сумісна дія циркуляційних факторів на висотах

В роботі було зроблено аналіз просторового розподілу великомасштабних характеристик, а саме: середньодобових значень геопотенціальної висоти 500 гПа за період 1981 – 2010 рр. і її аномалій в період існування хвиль тепла (рис. 3.12), вектор швидкості вітру і аномалії відносної вологості в період існування хвиль тепла (рис. 3.13), а також середньодобових значень зональної швидкості вітру за період 1981 – 2010 рр. і її аномалій в період існування хвиль тепла (рис. 3.14).

З рис. 3.12 можна бачити, що найбільші аномалії геопотенціальної висоти 500 гПа мали місце у випадку хвиль тепла 2007 р. (рис. 3.12 д), 2010 р. (рис. 3.12 е), 2016 р. (рис. 3.12 л) і 2019 р. (рис. 3.12 м), що не завжди корелюється з інтенсивністю хвиль тепла. Наприклад, хвиля тепла 2010 і дійсно була найінтенсивнішою, але інші три епізоди за інтенсивністю або не перші, або навіть останні (випадки 2016 і 2019 рр.).

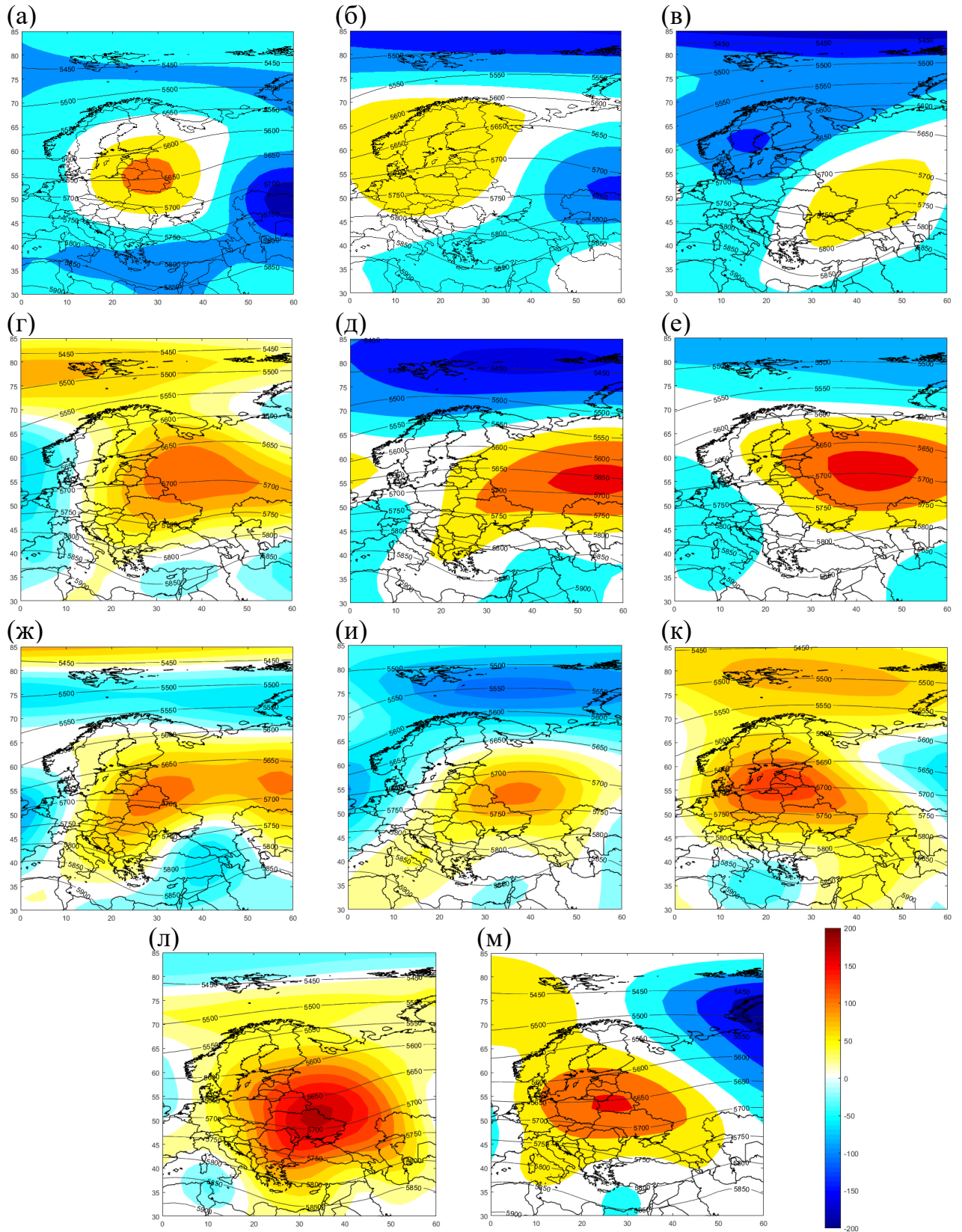


Рисунок 3.12 – Добові багаторічні середні значення (чорні суцільні лінії) і аномалії (градієнтна заливка) геопотенціальної висоти 500 гПа поверхні, осереднені за 13 – 28.06.1964 р. (а), 25.07 – 9.08.1994 р. (б), 03 – 17.07.1996 р. (в), 03 – 15.07.2002 р. (г), 18 – 27.08.2007 р. (д), 17.07 – 18.08.2010 р. (е), 30.06 – 11.07.2012 р. (ж), 25.07 – 07.08.2012 р. (и), 04 – 16.08.2015 р. (к), 17 – 28.06.2016 р. (л), 10 – 27.06.2019 р. (м)

Найменші додатні аномалії геопотенціальної висоти 500 гПа, які не перевищували 5 гПа, реєструвались у 1994 і 1996 рр. (рис. Б.1 б, в). Причому знову ж кореляції між інтенсивністю хвилі тепла і інтенсивністю аномалій висоти 500 гПа не спостерігається, оскільки епізод 1994 р. був третій за інтенсивністю.

Проте, в будь якому випадку, завжди над місцем встановлення аномально спекотної погоди в середній тропосфері спостерігається область підвищеного тиску, і найвищі аномалії температури біля поверхні землі і на висоті 850 гПа (рис. 1 – 11, д, е) практично завжди пов'язані з найбільшими аномаліями тиску в середній тропосфері.

Найбільш локалізована область підвищеного тиску біля поверхні землі і на висотах мала місце в епізоді 1964 р., всі інші випадки, які розглядаються в даній роботі, спостерігались наприкінці ХХ або на початку ХХІ століть і область високого тиску охоплювала досить велику територію. У восьми випадках з одинадцяти антициклон, який викликав аномальну спеку над територією України, був сформований в гребені Азорського максимуму, що розповсюджувався на Європу, тобто такий тип формування інтенсивних хвиль тепла можна вважати типовим. В інших двох випадках область підвищеного тиску утворилася над Східно-Європейською рівниною (епізоди 17 липня – 18 серпня 2010 і 25 липня – 7 серпня 2012), в одному випадку – в гребені антициклону, сформованого над Баренцевим і Карським морями, який є одним з сезонних центрів Арктичного максимуму, (епізод 4–16 серпня 2015) і в останньому випадку (10 – 27 червня 2019) – в гребені антициклону, який знаходився над Гренландією і належить до одного з сезонних центрів дії Арктичного максимуму. Інші два епізоди – 2010 і 2012 рр. – не пов'язані ані з сезонними, ані з постійно діючими центрами дії, навпаки, зазвичай ймовірність утворення антициклонів становить близько 8% [4]. До нетипових випадків належить дві найінтенсивніші хвилі тепла – 2010 і 2015 рр.

Дуже часто хвилі тепла підтримуються зворотними процесами в атмосфері, які є прямим наслідком встановлення аномально спекотної погоди.

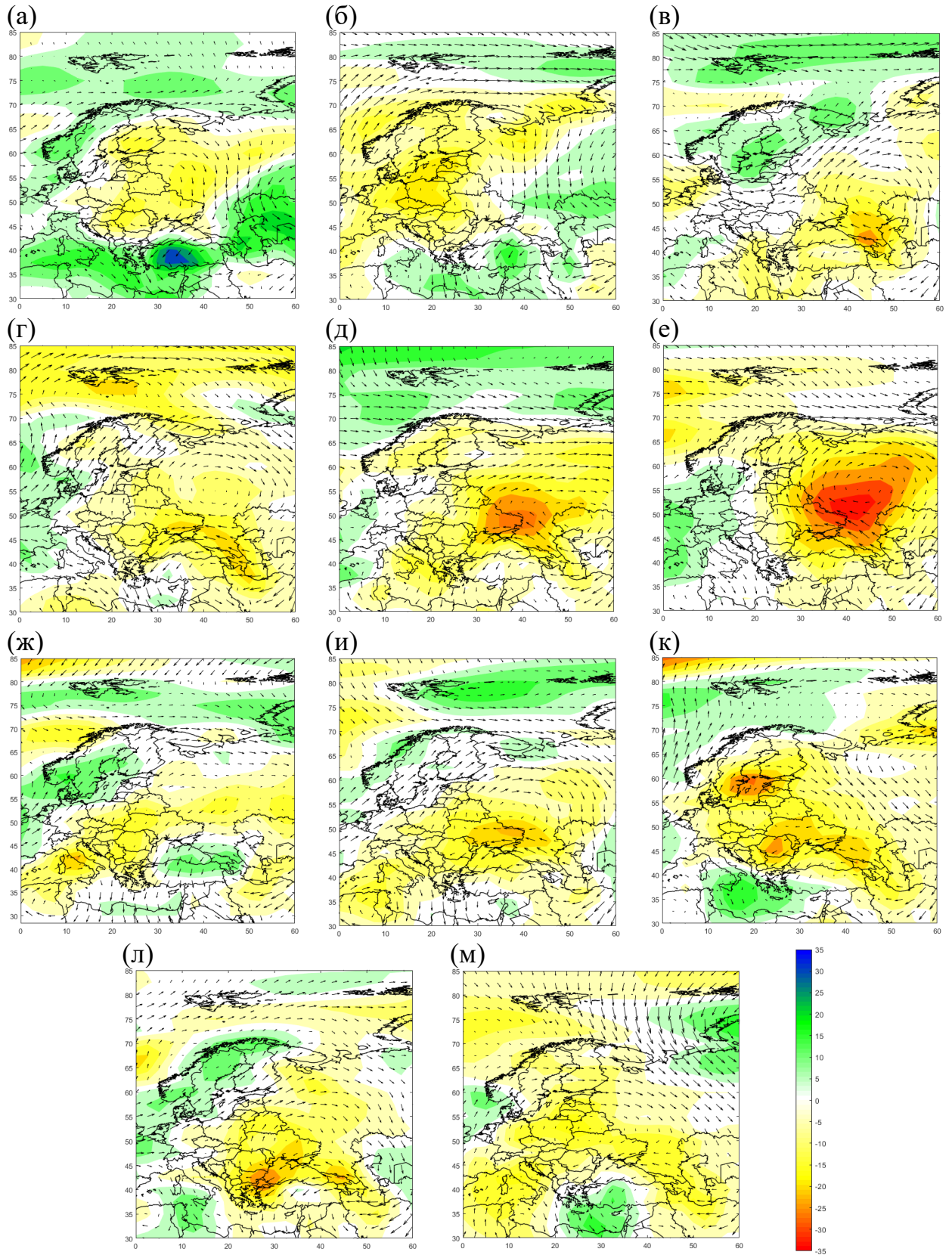


Рисунок 3.13 – Вектор швидкості вітру (чорні вектори) і аномалії відносної вологості (градієнтна заливка) на поверхні 850 гПа, осереднені за 13 – 28.06.1964 р. (а), 25.07 – 9.08.1994 р. (б), 03 – 17.07.1996 р. (в), 03 – 15.07.2002 р. (г), 18 – 27.08.2007 р. (д), 17.07 – 18.08.2010 р. (е), 30.06 – 11.07.2012 р. (ж), 25.07 – 07.08.2012 р. (и), 04 – 16.08.2015 р. (к), 17 – 28.06.2016 р. (л), 10 – 27.06.2019 р. (м)



Наприклад, якщо хвиля тепла існує впродовж тривалого часу, то атмосферна посуха, яка часто супроводжує хвилю тепла, призводить до ґрунтової; через нестачу ґрунтової вологи потік прихованого тепла спрямовується від ґрунту до нижніх шарів атмосфери, що ще в більшій степені підвищує температуру повітря [26]. В даній роботі досліджувались аномалії відносної вологості на верхній межі граничного шару (рис. 3.13).

З рис. 3.13 можна бачити, що від'ємні аномалії відносної вологості можуть сягати 35% і саме такі аномалії супроводжували хвилю тепла 2010 р., коли в Україні спостерігалась найінтенсивніша спека (рис. 3.13 е). В інших випадках від'ємні аномалії відносної вологості за модулем були набагато меншими і не перевищували значення в 25%, але всі розглядувані хвилі супроводжувались від'ємними аномаліями відносної вологості.

Протягом всіх епізодів над районами встановлення аномально спекотної погоди на рівні 850 гПа переважала антициклональна циркуляція (рис. 3.13).

Впродовж чотирьох епізодів – 13 – 28 червня 1964 р., 3 – 17 липня 1996 р., 4 – 16 серпня 2015 р., 17–28 червня 2016 р. (рис. 3.13 а, в, г, к, л) – винесення повітря на рівні 850 гПа відбувалось з тропічних або центральних районів Атлантики, незважаючи на проходження над морською поверхнею, повітря залишалось сухим порівняно з кліматичною нормою, що можна пояснити антициклонічною циркуляцією і пов'язаними з нею низхідними рухами, в яких брали участь частинки повітря, внаслідок чого їх температура суттєво підвищувалась і призводила до зростання дефіциту вологості. До цього типу належить один з епізодів з найінтенсивнішою спекою – випадок 2015 р.

В чотирьох випадках – 25 липня – 9 серпня 1994 р., 30 червня – 11 липня 2012 р., 25 липня – 7 серпня 2012 р., 10 – 27 червня 2019 р. (рис. 3.13 б, ж, и, м) – повітря на рівні 850 гПа виносилось з районів Північної Африки, де воно могло суттєво прогрітись, до цих випадків третя за інтенсивністю хвиля тепла 1994 р.

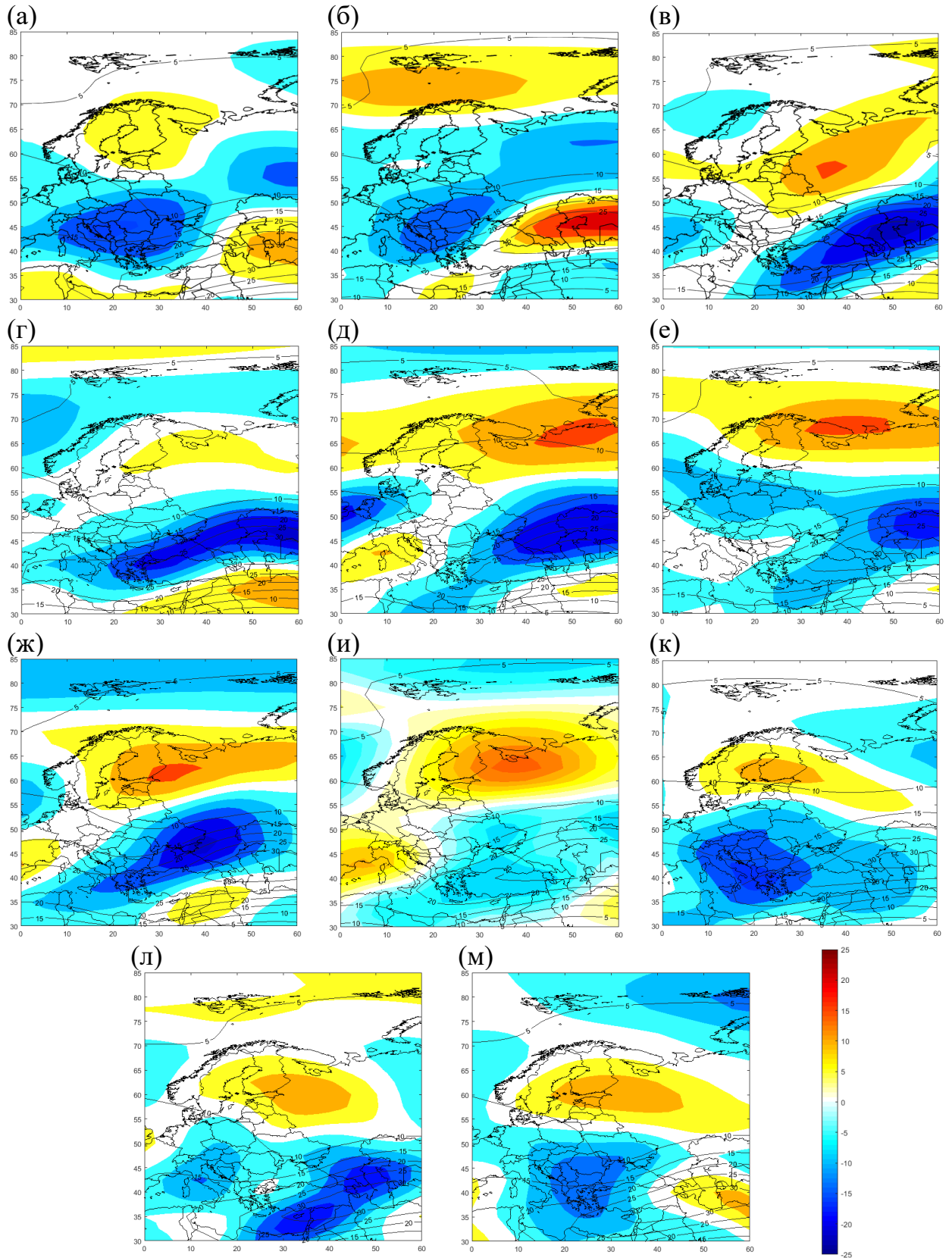


Рисунок 3.14 – Додові багаторічні середні значення (чорні суцільні лінії) і аномалії зональної швидкості вітру (градієнтна заливка) на поверхні 200 гПа, осереднені за 13 – 28.06.1964 р. (а), 25.07 – 9.08.1994 р. (б), 03 – 17.07.1996 р. (в), 03 – 15.07.2002 р. (г), 18 – 27.08.2007 р. (д), 17.07 – 18.08.2010 р. (е), 30.06 – 11.07.2012 р. (ж), 25.07 – 07.08.2012 р. (и), 04 – 16.08.2015 р. (к), 17 – 28.06.2016 р. (л), 10 – 27.06.2019 р. (м)

У випадках 2002 р. і 2016 р. винесення повітря на рівні 850 гПа відбувалось з північних районів Середземномор'я і ненасиченість повітря водяною парою можна пояснити такими самими чинниками, що і у випадку перенесенні повітря з районів Атлантики.

Епізод 2007 р. реалізувався при винесенні повітря на верхній межі атмосфери з районів Північної Африки і Малої Азії, і може бути віднесений до типу, в якому повітря виносилось з Північної Африки.

В останньому епізоді 2010 р., коли спостерігалась найінтенсивніша хвиля тепла з усіх розглянутих, повітря виносилась з Кавказьких гір. Найвищі температури і найбільший дефіцит вологи в даному випадку може бути обумовлений дуже тривалим існуванням антициклону, впродовж всього періоду існування якого повітря нагрівалось і ставало ненасиченим завдяки одночасному впливу декількох чинників: винесення повітря з кавказьких гір (ефект фену), з південних районів і вплив низхідних рухів.

Якщо розглянути аномалії зональної швидкості вітру над районом дослідження на рівні 200 гПа впродовж всіх епізодів хвиль тепла (рис. 3.14), то можна побачити, що над територією, над якою спостерігалась аномальна спекотна погода, переважають від'ємні аномалії зональної швидкості порівняно з кліматичною нормою. Від'ємні аномалії можуть сягати суттєвих значень аж до  $-25$  м/с. Оскільки область підвищеного тиску розташовується зазвичай північніше області, охопленою хвилею тепла (рис. А.1 – 11 в), то зазвичай центр антициклону знаходиться в перехідній зоні між додатними і від'ємними аномаліями. Додатні аномалії можуть сягати також суттєвих значень – до 25 м/с, що вказує разом з суттєвим зменшенням зональної швидкості в інших районах на переміщення зони струминної течії, оскільки потік на рівні 200 гПа визначається лише зональною складовою швидкості. Таким чином, можна зробити висновок, що струминні течії переміщуються в північну частину антициклону.

Найбільші аномалії зональної швидкості вітру у струминних течіях, пов'язаних з антициклонами, спостерігаються в епізодах 1996, 2007, 2010 рр. і в епізоді 30 червня – 11 липня 2012, з яких найбільш інтенсивним є хвиля тепла 2010 р., що вказує на необов'язковість великих додатних аномалій для інтенсивних хвиль тепла.

### 3.3 Вертикальні рухи і низхідні вітри

Вертикальні перерізи можуть надати інформацію щодо тривимірної структури атмосферної циркуляції, пов'язаної з епізодами інтенсивних хвиль тепла. Висотно-довготні перерізи впродовж аномально спекотної погоди уздовж широт, на яких було зареєстровано максимальні аномалії середньої добової температури біля поверхні землі на території України, представлено на рис. 3.15 – 3.17. Висотно-широтні перерізи протягом інтенсивних хвиль тепла було побудовано уздовж довгот, на яких на території України спостерігались максимальні аномалії середньої добової температури біля поверхні землі (рис. 3.18 – 3.20).

Вертикальні перерізи багаторічних середніх значень і аномалій температури, осереднених за періоди хвиль тепла, уздовж широт представлено на рис. 3.15 і на рис. 3.18 – уздовж довгот.

Всі хвилі тепла є досить добре вираженими у перерізах уздовж довготи, і уздовж широти: додатні аномалії температури охоплювали всю товщу тропосфери до 300 гПа, найбільші аномалії, зазвичай, концентрувались в нижній тропосфері до 700 гПа.

Найбільш яскраво вираженим є випадок 2010 р. Додатні аномалії середньодобової температури сягали  $10^{\circ}\text{C}$  в нижній частині граничного шару, що можна побачити на вертикальному перерізі уздовж довготи  $37^{\circ}$  (рис. 3.18 е). На перерізі уздовж широти  $52^{\circ}$  додатні аномалії температури охоплювали навіть нижню стратосферу, але вже не над осередком хвилі тепла біля поверхні землі.

Досить яскраво вираженими є епізоди 1994 р., 2002 р., 2007 р., 30.06 – 11.07.2012 р. і 2015 р. у висотно-довготному (рис. 3.15 б, г, д, ж, к) і висотно-широтному перерізах (рис. 3.18 б, г, д, ж, к). Значні додатні аномалії температури (до  $+8^{\circ}\text{C}$ ) охоплюють значну частину нижньої тропосфери і у довготному, і у широтному напрямках, утворюючи своєрідне склепіння над осередком хвилі біля поверхні землі.

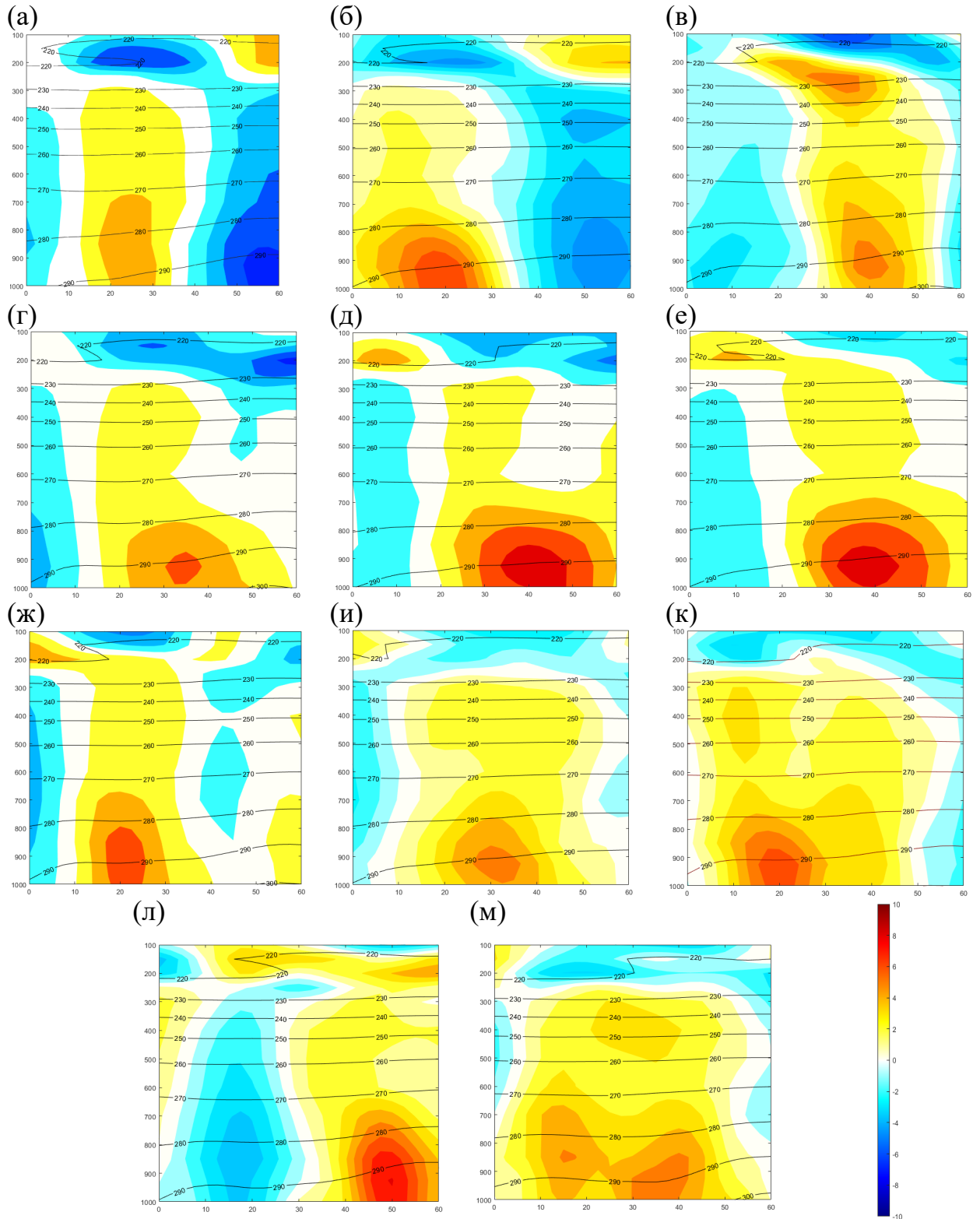


Рисунок 3.15 – Осереднені вертикальні перерізи багаторічних середніх добових значень (суцільні чорні лінії) і аномалій температури (градієнтна заливка), уздовж  $\varphi = 52^\circ$  за 13 – 28.06.1964 р. (а),  $\varphi = 50^\circ$  за 25.07 – 9.08.1994 р. (б),  $\varphi = 49^\circ$  за 3 – 17.07.1996 р. (в),  $\varphi = 48^\circ$  за 3 – 15.07.2002 р. (г),  $\varphi = 50^\circ$  за 18 – 27.08.2007 р. (д),  $\varphi = 52^\circ$  за 17.07 – 18.08.2010 р. (е),  $\varphi = 48^\circ$  за 30.06 – 11.07.2012 р. (ж),  $\varphi = 51^\circ$  за 25.07 – 7.08.2012 р. (и),  $\varphi = 49^\circ$  за 4 – 16.08.2015 р. (к),  $\varphi = 48^\circ$  за 17 – 28.06.2016 р. (л),  $\varphi = 47^\circ$  за 10 – 27.06.2019 р. (м)

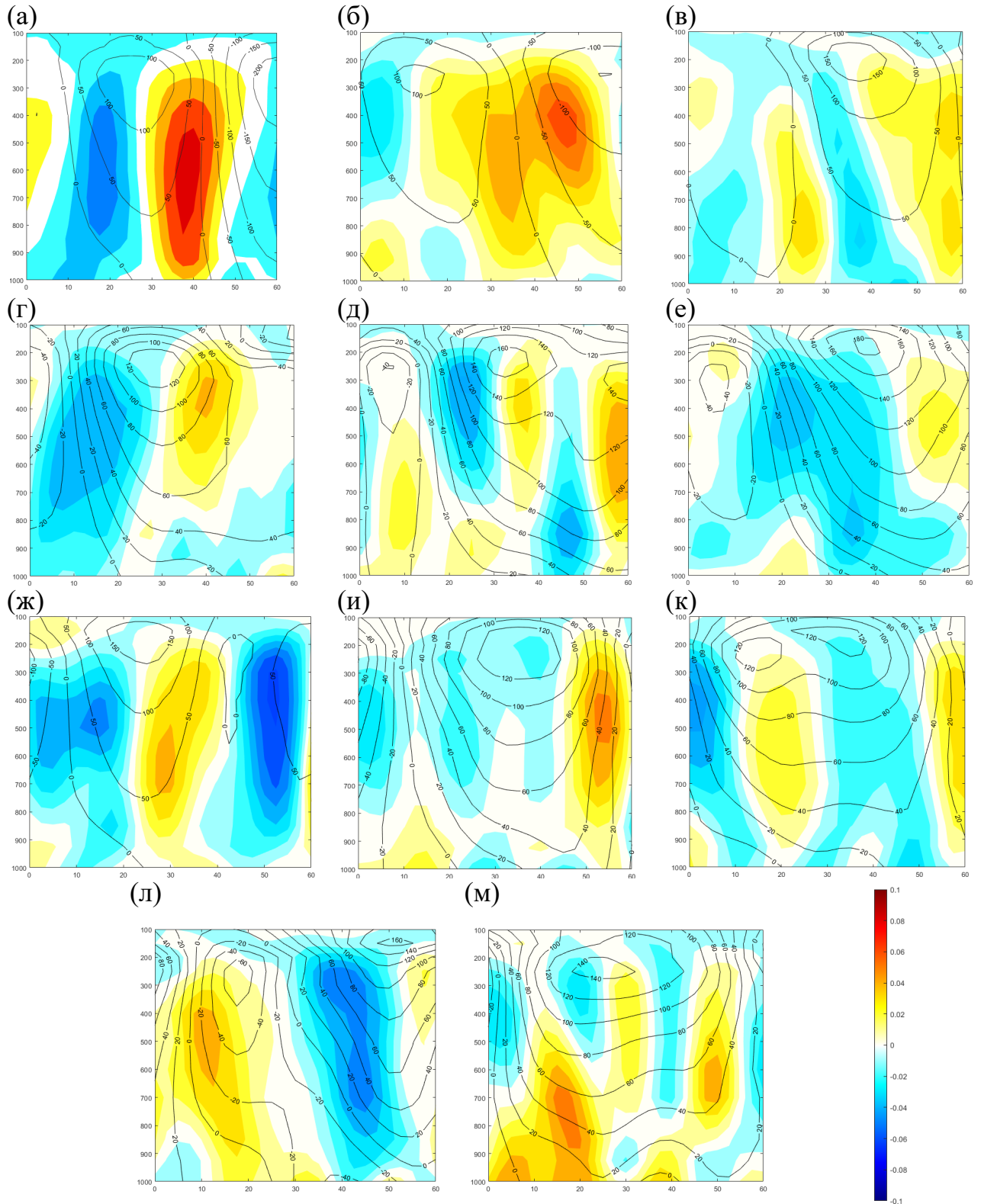


Рисунок 3.16 – Осереднені вертикальні перерізи аномалій геопотенціальної висоти (суцільні чорні лінії) і вертикальних рухів (градієнтна заливка) уздовж  $\varphi = 52^\circ$  за 13 – 28.06.1964 р. (а),  $\varphi = 50^\circ$  за 25.07 – 9.08.1994 р. (б),  $\varphi = 49^\circ$  за 3 – 17.07.1996 р. (в),  $\varphi = 48^\circ$  за 3 – 15.07.2002 р. (г),  $\varphi = 50^\circ$  за 18 – 27.08.2007 р. (д),  $\varphi = 52^\circ$  за 17.07 – 18.08.2010 р. (е),  $\varphi = 48^\circ$  за 30.06 – 11.07.2012 р. (ж),  $\varphi = 51^\circ$  за 25.07 – 7.08.2012 р. (и),  $\varphi = 49^\circ$  за 4 – 16.08.2015 р. (к),  $\varphi = 48^\circ$  за 17 – 28.06.2016 р. (л),  $\varphi = 47^\circ$  за 10 – 27.06.2019 р. (м)

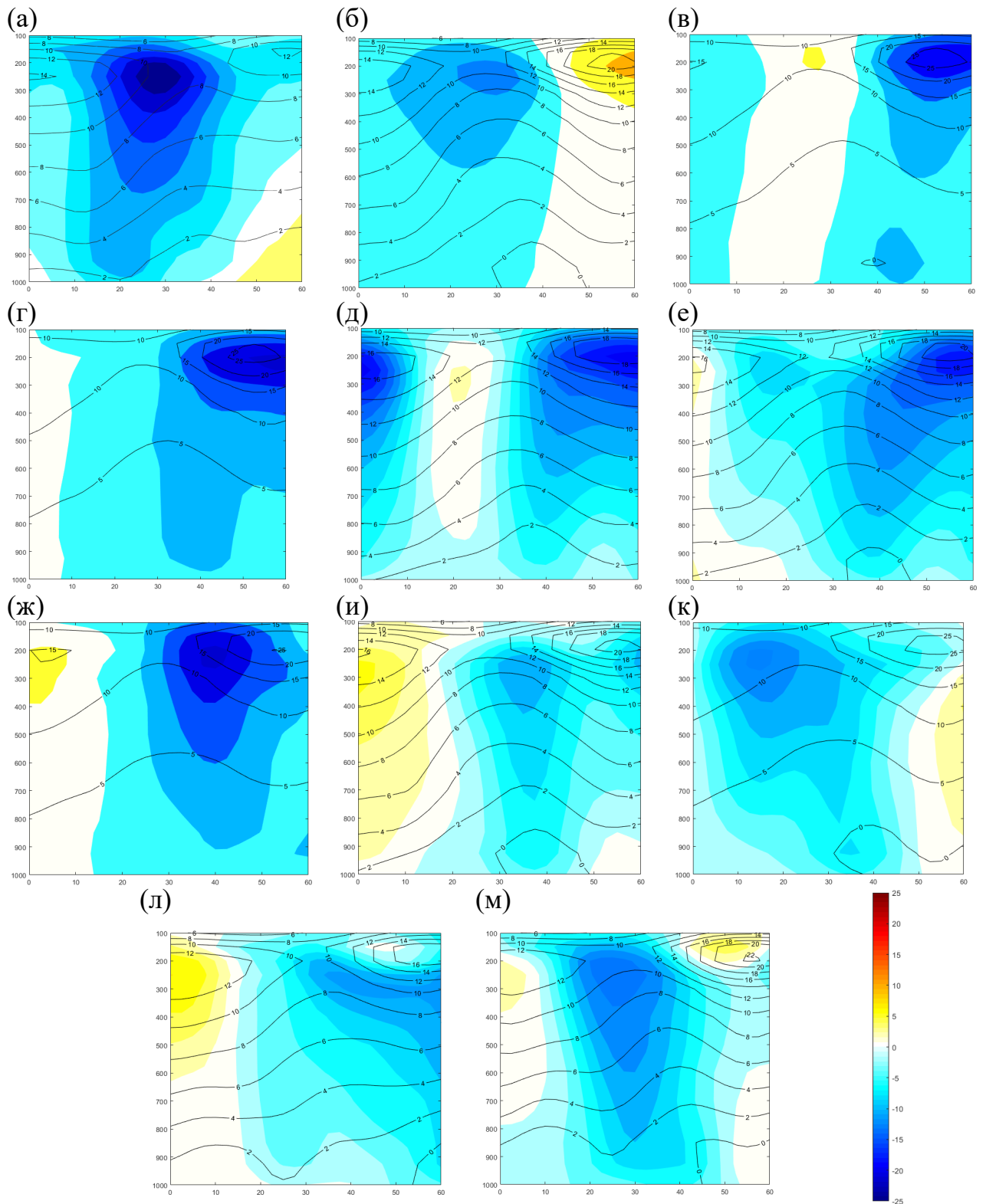


Рисунок 3.17 – Осереднені вертикальні перерізи багаторічних середніх добових значень (суцільні чорні лінії) і аномалій зональної швидкості вітру (градієнтна заливка) уздовж  $\varphi = 52^\circ$  за 13 – 28.06.1964 р. (а),  $\varphi = 50^\circ$  за 25.07 – 9.08.1994 р. (б),  $\varphi = 49^\circ$  за 3 – 17.07.1996 р. (в),  $\varphi = 48^\circ$  за 3 – 15.07.2002 р. (г),  $\varphi = 50^\circ$  за 18 – 27.08.2007 р. (д),  $\varphi = 52^\circ$  за 17.07 – 18.08.2010 р. (е),  $\varphi = 48^\circ$  за 30.06 – 11.07.2012 р. (ж),  $\varphi = 51^\circ$  за 25.07 – 7.08.2012 р. (и),  $\varphi = 49^\circ$  за 4 – 16.08.2015 р. (к),  $\varphi = 48^\circ$  за 17 – 28.06.2016 р. (л),  $\varphi = 47^\circ$  за 10 – 27.06.2019 р. (м)

Всі розглянуті вище випадки, коли теплове шатро накриває всю охоплену аномально спекотною погодою територію, є епізоди з найбільшими хвилями тепла (табл. 3.1), виключаючи випадок 30.06 – 11.07.2012 р., який за магнітудою набагато менш інтенсивний.

Іншу структуру поля температури має випадок 1964 р., який також відноситься до мегахвиль (табл. 3.1, рис. 3.4, рис. 3.15 а, 3.18 а): аномалії температури простежуються до 300 гПа, але осередок є більш локалізованим і менш інтенсивним (аномалії температури сягають  $+4^{\circ}\text{C}$ ), але в цьому випадку як і в епізоді 2010 р. спостерігаються такі саме інтенсивні аномалії у верхній тропосфері як і у нижній, але тільки уздовж довготи.

Слід зауважити, що також в 2015 р. шатро інтенсивних додатних аномалій простежувалося аж до висоти 300 гПа як в довготному так і в широтному напрямку, а у верхній тропосфері спостерігались окремі осередки додатних аномалій температури.

Інші випадки хвиль тепла 1996 р., 25.07 – 7.08.2012 р., 2016 р. і 2019 р., виключаючи випадок 2012 р., є не настільки інтенсивними, але в усіх цих випадках теплове шатро також охоплювало всю тропосферу над територією, на якій спостерігалась аномально спекотна погода, і в усіх чотирьох випадках мають місце два осередки тепла – в нижній в верхній тропосфері.

Випадок 2016 р. дуже добре був виражений біля поверхні землі у широтному напрямку і погано у меридіональному, хоча з рис. 3.10 можна бачити, що на рівні 2 м аномалії середньої добової температури повітря спостерігались у досить широкій зоні, але вони простягались вище приземного шару.

На рис. 3.16 і 3.19 представлено вертикальні перерізи аномалій геопотенціальної висоти (м) і вертикальних рухів (Па/с) уздовж широт (рис. 3.16) і довгот (рис. 3.19).

В усіх випадках в області антициклону або баричного гребеню мають місце додатні аномалії геопотенціалу, які сягають іноді досить високих значень. Найбільші аномалії геопотенціалу під час хвиль тепла мають місце у верхній тропосфері і нижній стратосфері і їх значення коливаються в межах від 60 до 200 геоп.м.



Найбільші аномалії геопотенціалу – до 200 м (рис. 3.16 е і рис 3.19 е) спостерігались в епізоді 2010 р., проте з антициклоном не були пов'язані найбільші аномалії низхідних рухів, навпаки практично всю область антициклону уздовж широти  $52^{\circ}$  охопили від'ємні аномалії вертикальних рухів, а уздовж довготи  $37^{\circ}$  – по периферії осередку аномально спекотної погоди спостерігаються аномалії низхідних рухів, а в самому центрі тепла мають місце аномалії висхідних рухів.

В епізоді 2015 р., другому за інтенсивністю, аномалії геопотенціальної висоти також сягали найвищих значень – до 200 м (рис. 3.16 к, 3.19 к). Досить значну роль відіграли у встановленні спекотної погоди відіграли аномалії низхідних рухів: можна бачити, що над всією територією, охопленою хвилею тепла, мають місце додатні аномалії вертикальних рухів, що вказує на їх низхідний характер.

Найбільші аномалії геопотенціалу також були пов'язані з випадком 2019 р., середня амплітуда якого виявилась найменшою: на рівні 200 гПа геопотенціальна висота була вища кліматичну норму на 140 – 200 м, і хоча в меридіональному напрямку не спостерігаються додатні аномалії, які відповідають посиленню низхідних або послабленню висхідних рухів, то в широтному напрямку мають місце додатні аномалії, які могли підтримувати антициклональну циркуляцію і аномально спекотну погоду впродовж всього періоду існування хвилі тепла.

Наступна за інтенсивністю після епізоду 2015 р. хвиля тепла – епізод 1994 р. – також підтримувався досить додатними аномаліями вертикальних рухів. Аномалії геопотенціалу в цьому випадку сягали не більше 100 гПа, але додатні аномалії вертикальних рухів охоплювали всю територію, яку займала аномально спекотна погода і їх значення сягали 0,07-0,08 Па/с.

В епізоді 1964 р., четвертому за інтенсивністю, аномалії геопотенціалу сягають 100 – 150 м, а додатні аномалії вертикальних рухів мають місце не над всією територією, охопленою антициклоном і хвилею тепла, тільки над північною і східною периферією, але аномалії вертикальних рухів є найбільшими з усіх випадків, які розглядаються, і сягають 0,1 Па/с.

Епізод 2002 р., який є сьомим за інтенсивністю, був добре вираженим в полі додатних аномалій геопотенціалу і низхідних вертикальних рухів.

Протягом інших епізодів поле геопотенціалу в області антициклону мало додатні аномалії порівняно з кліматичною нормою, але аномалії низхідних рухи досить часто чергувались з аномаліями висхідних рухів.

Окремої уваги заслуговує випадок 2016 р., в якому в області гребеня мали місце невеликі аномалії геопотенціалу або навіть від'ємні, але слід зауважити, що від'ємні значення аномалій геопотенціалу охоплювали тільки периферію гребеня. Основна частина гребеня була зайнята від'ємними аномаліями вертикальних рухів, що вказує на посилення висхідних рухів або на послаблення низхідних.

На рис. 3.17 і 3.20 представлено висотно-широтні і висотно-довготні перерізи добових багаторічних значень і аномалій зональної швидкості вітру, осереднені за періоди існування хвиль тепла.

Зазвичай хвилі тепла спостерігаються в антициклональному полі, а низхідні рухи, які дуже часто мають місце в антициклонах, підсилюють антициклональну циркуляцію і посушливу аномально спекотну погоду, оскільки, опускання повітря сприяє його адіабатичному нагріванню, а, отже, і підвищенню температури.

Можна бачити, що у висотно-меридіональних перерізах уздовж певної широти практично вся досліджувана територія охоплена від'ємними аномаліями зональної швидкості вітру (рис. 3.17), тобто уздовж широти суттєво знижується інтенсивність струминних течій. Осередки від'ємних аномалій зональної швидкості знаходяться на рівні 200 – 300 гПа, від них часто поширюються області менш інтенсивних від'ємних аномалій, які розповсюджуються іноді до рівня 1000 гПа. Послаблення струминних течій на висотах розташовується зазвичай саме над осередком найбільших аномалій температури біля поверхні землі. Від'ємні аномалії зональної швидкості вітру можуть сягати  $-25$  м/с, що таким чином може суттєво вплинути на струминні течії і знищити її.

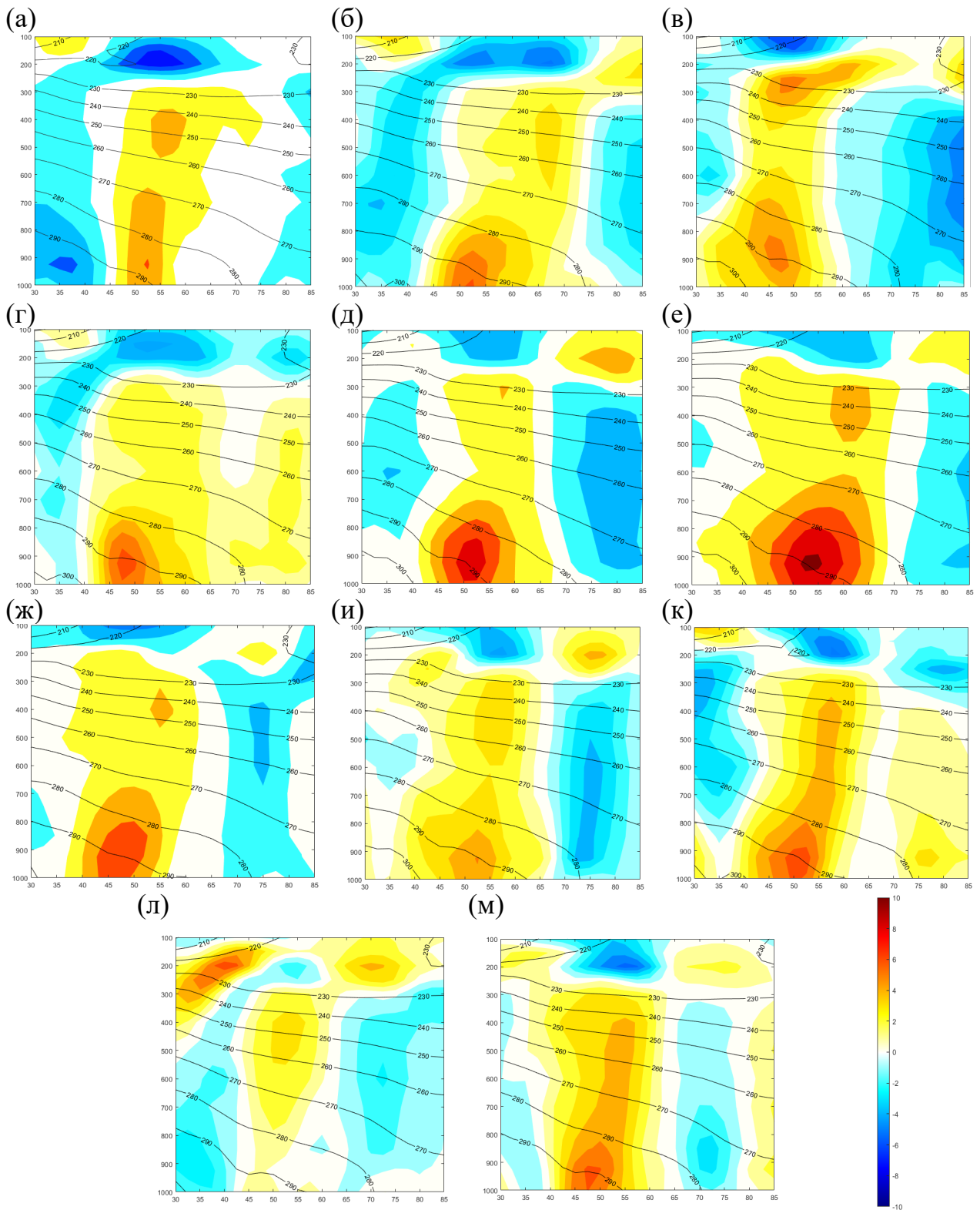


Рисунок 3.18 – Осереднені вертикальні перерізи багаторічних середніх добових значень (суцільні чорні лінії) і аномалій температури (градієнтна заливка) уздовж  $\lambda = 28^\circ$  за 13 – 28.06.1964 р. (а),  $\lambda = 26^\circ$  за 25.07 – 9.08.1994 р. (б),  $\lambda = 37^\circ$  за 3 – 17.07.1996 р. (в),  $\lambda = 34^\circ$  за 3 – 15.07.2002 р. (г),  $\lambda = 37^\circ$  за 18 – 27.08.2007 р. (д),  $\lambda = 37^\circ$  за 17.07 – 18.08.2010 р. (е),  $\lambda = 37^\circ$  за 30.06 – 11.07.2012 р. (ж),  $\lambda = 37^\circ$  за 25.07 – 7.08.2012 р. (и),  $\lambda = 25^\circ$  за 4 – 16.08.2015 р. (к),  $\lambda = 34^\circ$  за 17 – 28.06.2016 р. (л),  $\lambda = 32^\circ$  за 10 – 27.06.2019 р. (м)

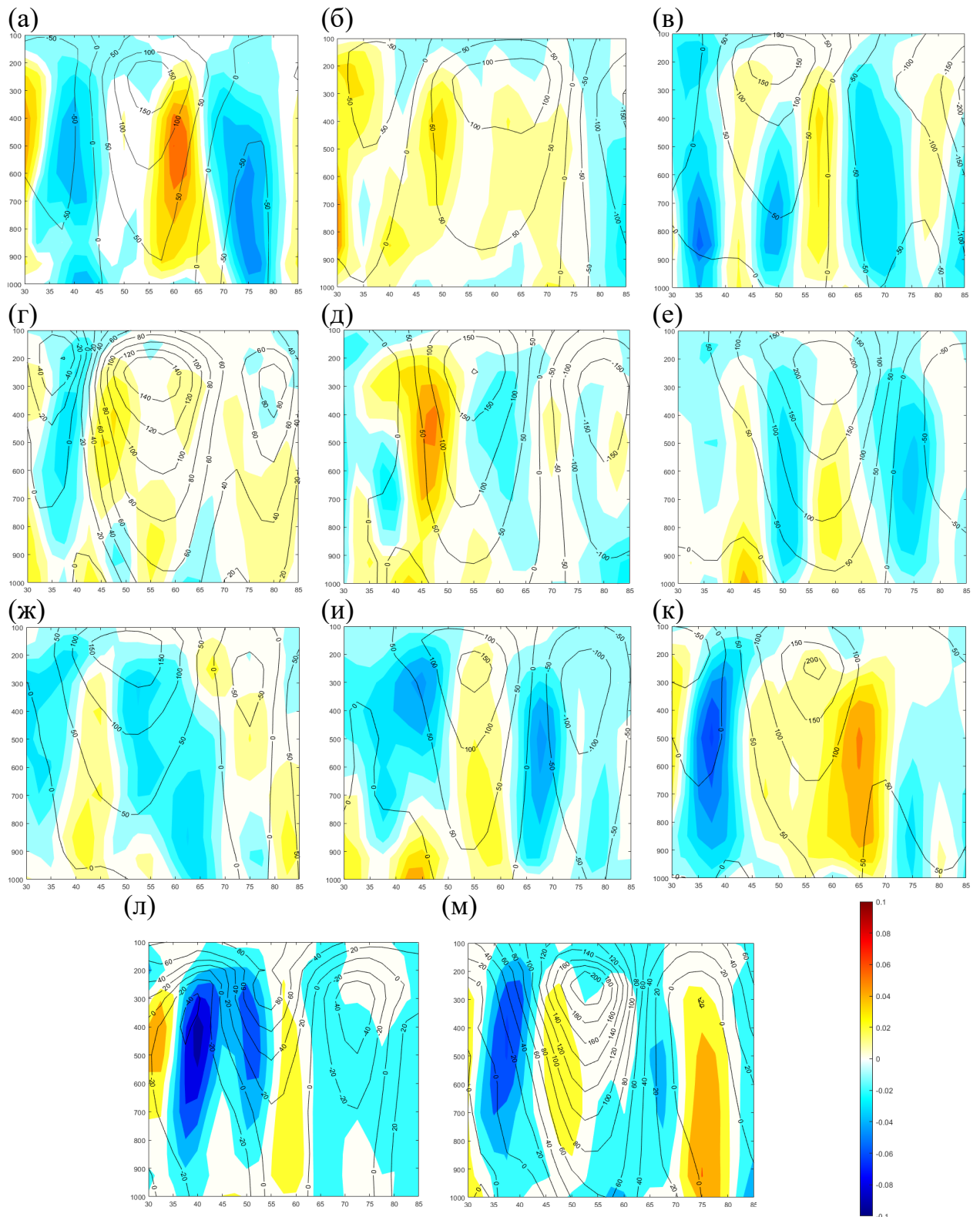


Рисунок 3.19 – Осереднені вертикальні перерізи аномалій геопотенціальної висоти (суцільні чорні лінії) і вертикальних рухів (градієнтна заливка) уздовж  $\lambda = 28^\circ$  за 13 – 28.06.1964 р. (а),  $\lambda = 26^\circ$  за 25.07 – 9.08.1994 р. (б),  $\lambda = 37^\circ$  за 3 – 17.07.1996 р. (в),  $\lambda = 34^\circ$  за 3 – 15.07.2002 р. (г),  $\lambda = 37^\circ$  за 18 – 27.08.2007 р. (д),  $\lambda = 37^\circ$  за 17.07 – 18.08.2010 р. (е),  $\lambda = 23^\circ$  за 30.06 – 11.07.2012 р. (ж),  $\lambda = 37^\circ$  за 25.07 – 7.08.2012 р. (и),  $\lambda = 25^\circ$  за 4 – 16.08.2015 р. (к),  $\lambda = 34^\circ$  за 17 – 28.06.2016 р. (л),  $\lambda = 32^\circ$  за 10 – 27.06.2019 р. (м)

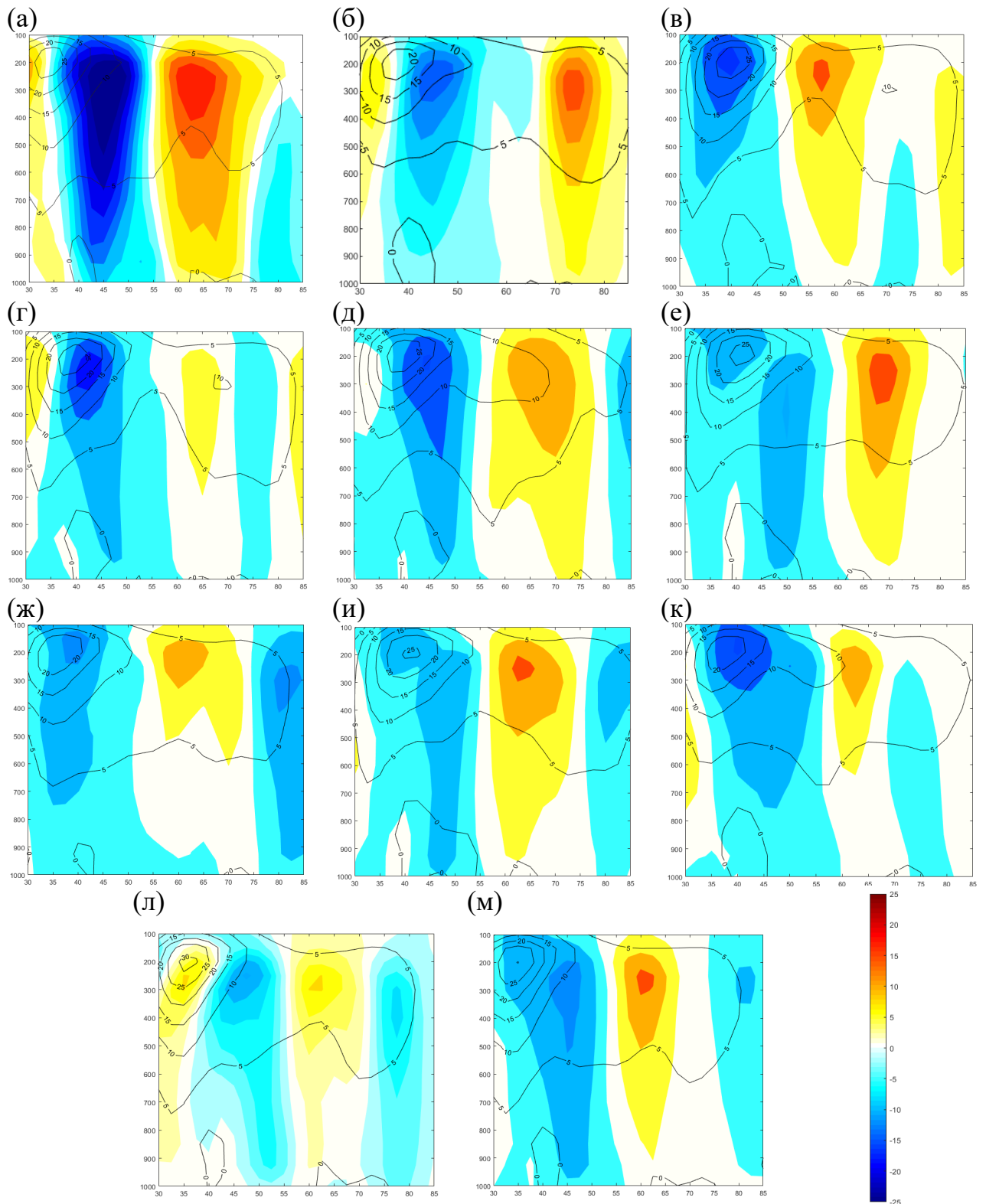


Рисунок 3.20 – Осереднені вертикальні перерізи багаторічних середніх добових значень (суцільні чорні лінії) і аномалій зональної швидкості вітру (градієнтна заливка) уздовж  $\lambda = 28^\circ$  за 13 – 28.06.1964 р. (а),  $\lambda = 26^\circ$  за 25.07 – 9.08.1994 р. (б),  $\lambda = 37^\circ$  за 3 – 17.07.1996 р. (в),  $\lambda = 34^\circ$  за 3 – 15.07.2002 р. (г),  $\lambda = 37^\circ$  за 18 – 27.08.2007 р. (д),  $\lambda = 37^\circ$  за 17.07 – 18.08.2010 р. (е),  $\lambda = 23^\circ$  за 30.06 – 11.07.2012 р. (ж),  $\lambda = 37^\circ$  за 25.07 – 7.08.2012 р. (и),  $\lambda = 25^\circ$  за 4 – 16.08.2015 р. (к),  $\lambda = 34^\circ$  за 17 – 28.06.2016 р. (л),  $\lambda = 32^\circ$  за 10 – 27.06.2019 р. (м)

Від'ємні аномалії зональних течій в нижній тропосфері вказують на низхідні рухи, які можуть додатково підвищувати температуру і знижувати вологість біля поверхні землі.

Від всіх випадків відрізняється суттєво епізод 25 липня – 7 серпня 2012 р., впродовж якого в смузі від 0 до 20° сх.д. мали місце додатні аномалії зональної швидкості, а над іншою частиною території, хоча і домінували від'ємні аномалії, але незначні. Цей епізод взагалі суттєво відрізняється від всіх інших випадків, мабуть, через те, що відноситься до адвектино-радіаційного типу, де було набагато більше задіяні адвективні чинники, ніж радіаційні.

З рис. 3.20, на якому представлено висотно-широтні перерізи багаторічних середньодобових значень і аномалій зональної швидкості вітру вказують на суттєве підвищення зональної швидкості вітру у північних широтах (аномалії можуть сягати 25 м/с), але над осередком хвилі тепла завжди переважають від'ємні аномалії зональної швидкості.

Найбільш інтенсивними від'ємні аномалії є у випадках 1964 р., 1996р., 2002 р., 2007 р., 2010 р. і 30 червня – 11 липня 2012 р. Можна побачити, що цим більшими є додатні аномалії зональної швидкості на півночі, ти зазвичай є сильнішими від'ємні аномалії над осередками хвиль тепла. Слід зауважити, що з усіх розглядуваних епізодів також вирізняється випадок 2016 р., для якого є характерними незначні і додатні, і від'ємні аномалії зональної швидкості вітру.

## ВИСНОВКИ

В роботі було розглянуто 11 найінтенсивніших хвиль тепла, які спостерігались в період 1961 – 2019 рр.

Хвилі тепла було класифіковано за двома типами такими як радіаційно-адвективний, в якому найважливішу роль відіграє радіаційний фактор і адвективно-радіаційний, в якому найбільшу роль відіграє адвективний чинник. Більшість хвиль тепла (10 епізодів) належить до радіаційно-адвективного типу, що вказує на те, що в формуванні аномально спекотної погоди, найбільшу роль відіграє радіаційний фактор. Лише один з епізодів було віднесено до адвективно-радіаційного типу, хвилю тепла з 25 липня по 7 серпня 2012 року, коли спостерігалась адвекція теплого повітря на рівні 850 гПа з Північної Африки, а біля поверхні землі повітря надходило з півострова Малої Азії і Кавказьких гір.

Радіаційно- адвективний тип зазвичай пов'язаний з добре розвиненим антициклоном, який простежується до верхніх шарів атмосфери і якому на рівні 300 гПа відповідає зазвичай добре розвинена хвиля Росбі з відсіченим антициклоном у разі реалізації підтипу A1 і струминна течія орієнтована з південного заходу на північний схід Європи, якщо має місце другий підтип.

Зазвичай хвилі тепла реалізуються при додатних аномаліях поля тиску біля поверхні землі і на висоті 500 гПа в добре розвинених гребенях і відрогах. Найчастіше антициклони, які викликають інтенсивні хвилі тепла, формуються в гребенях, які поширюються від Азорського максимуму. Повітря, яке в цьому випадку надходить з акваторії Атлантики або Північної Африки, через вплив низхідних рухів, пов'язаних з антициклональною циркуляцією, нагрівається, а його вологість зменшується.

На рівні 200 гПа аномалії зональної швидкості вітру вказують на розташування струминної течії зазвичай в північній частині антициклону, в той самий час на його південній периферії спостерігаються знижені порівняно з кліматичною нормою швидкості. Області додатних аномалій температури

розташовані зазвичай в перехідній зоні між аномаліями зональної швидкості вітру різного знаку.

Всі хвилі тепла є досить добре вираженими у перерізах уздовж довготи, і уздовж широти: додатні аномалії температури охоплювали всю товщу тропосфери до 300 гПа, найбільші аномалії, зазвичай, концентрувались в нижній тропосфері до 700 гПа.

В усіх випадках в області антициклонів або баричного гребеню, де спостерігаються додатні аномалії температури, мають місце додатні аномалії геопотенціалу, які сягають іноді досить високих значень. Найбільші аномалії геопотенціалу під час хвиль тепла мають місце у верхній тропосфері і нижній стратосфері і їх значення коливаються в межах від 60 до 200 геоп.м.

Зазвичай хвилі тепла спостерігаються в антициклональному полі, а низхідні рухи, які дуже часто мають місце в антициклонах, підсилюють антициклональну циркуляцію і посушливу аномально спекотну погоду, оскільки, опускання повітря сприяє його адіабатичному нагріванню, а, отже, і підвищенню температури.



**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Бабіченко В. М. Максимальна температура повітря на території України в умовах сучасного клімату/ В.М. Бабіченко, Н.В. Ніколаєва, С.Ф.Рудішина, Л. М. Гущина//Український географічний журнал. – 2010. – №3.
2. Глобальный климат. 2001–2010 годы. Десятилетие экстремальных климатических явлений. Краткий доклад. ВМО – № 1119.
3. Динаміка температури повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень/В.І.Осадчий, В.М.Бабіченко, Ю.Б.Набиванець, О.Я.Скриник. 2013. – 256 с.
4. Климатология/ Под ред. проф., д.геогр.н. Дроздова О.А. и проф., д.геогр.н. Кобышевой Н.В. – Л.:Гидрометеиздат, 1989, 568 с.
5. Клімат України. За редакцією В.М. Липинського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко /Видавництво Раєвського. – Київ, 2003. – 343 с.
6. Логинов К.Т. Опасные явления погоды на Украине/ К.Т. Логинов, В.Н. Бабиченко, М. Ю. Кулаковская. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 236с.
7. Оцінка вразливості до змін клімату: Україна/ О.Г.Шевченко та ін. – Муфлаер, Київ, 2014. – 62 с.
8. Рудишина С. Ф. Высокие температуры воздуха на Украине/ С.Ф. Рудишина, В. Н. Бабиченко//Труды УкрНИГМИ. – 1971. – Вып. 98. – С. 53 – 61.
9. Слизька К.П. Підходи до вивчення високих температур повітря на території України в контексті сучасних змін клімату// Журнал Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – С. 860-866.
10. Температура воздуха на Украине /под ред. В.Н. Бабиченко. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 398с.
11. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 11. – с. 5-19.
12. Шевченко О. Г. Характеристика хвилі тепла літнього сезону 2010 р. на території України / О.Г. Шевченко // Наукові праці УкрНДГМІ. – 2012. – Вип.262. – С.59-70.
13. Шевченко О.Г. Характеристика синоптических процессов над территорией Украины во время волны тепла в июле-августе 2010г./ О.Г. Шевченко, Е.В. Самчук, С.И. Снежко// Ученые записки. Метеорология. – 2013 – №29. – С. 85 – 94.

14. Barriopedro D, Fischer EM, Luterbacher J, Trigo R, Garcia-Herrera R (2011) The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science* 332:220–224
15. Brunner, L.; Hegerl, G.; Steiner, A. Connecting Atmospheric Blocking to European Temperature Extremes in Spring. *J. Clim.* 2017, 30, 585–594.
16. Cassou C, Terray L, Phillips AS (2005) Tropical Atlantic influence on European heat waves. *J Clim* 18:2805–2811
17. Coumou, D., Robinson, A., & Rahmstorf, S. (2013). Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures. *Climatic Change*, 118(3–4), 771–782. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0668-1>
18. Christidis N, Jones GS, Stott PA (2015) Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nat Clim Change* 5:46–50
19. Davis, R. E., Knappenberger, P. C., Michaels, P. J., & Novicoff, W. M. (2003). Changing heat-related mortality in the United States. *Environmental Health Perspectives*, 111(14), 1712–1718. <https://doi.org/10.1289/ehp.6336>
20. Della-Marta, P.M.; Luterbacher, J.; vonWeissenfluh, H.; Xoplaki, E.; Brunet, M.; Wanner, H. Summer heat waves over western Europe 1880–2003, their relationship to large-scale forcings and predictability. *Clim. Dyn.* 2007, 29, 251–275.
21. Ding, T., Qian, W., & Yan, Z. (2009). Changes in hot days and heat waves in China during 1961–2007. *International Journal of Climatology*, 30(10), 1452–1462. <https://doi.org/10.1002/joc.1989>
22. Easterling DR, Meehl GA, Parmesan C et al (2000) Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science* 289:2068–2074
23. Elvidge, A. D., & Renfrew, I. A. (2016). The causes of Foehn warming in the lee of mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(3), 455–466. <https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00194.1>
24. Feudale L, Shukla J (2007) Role of Mediterranean SST in enhancing the European heat wave of summer 2003. *Geophys Res Lett* 34:L03811. doi:10.1029/2006GL027991
25. Feudale, L.; Shukla, J. Role of Mediterranean SST in enhancing the European heat wave of summer 2003. *Geophys. Res. Lett.* 2007, 34, L03811.
26. Fink, A. H., Brücher, T., Krüger, A., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G. and Ulbrich, U. (2004) The 2003 European summer heatwaves and drought? Synoptic diagnosis and impacts. *Weather*, 59 (8). pp. 209–216. ISSN 0043-1656 doi: <https://doi.org/10.1256/wea.73.04>

27. Fischer EM, Seneviratne SI, Lüthi D, Schär C (2007) Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophys Res Lett* 34:L06707. doi:10.1029/2006GL029068
28. Fischer EM, Seneviratne SI, Vidale PL, Lüthi D, Schär C (2007) Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *J. Clim* 20:5081–5099
29. Graczyk, D., Kundzewicz, Z.W., Choryński, A. et al. Heat-related mortality during hot summers in Polish cities. *Theor Appl Climatol* 136, 1259–1273 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2554-x>
30. Hann, J. (1901). In J. von Hann (Ed.), *Lehrbuch der Meteorologie*. Leipzig: Chr. Herm. Tauchnitz.
31. <https://www.weather.gov/ama/heatindex>
32. IPCC, 2013. *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
33. Jung T, Ferranti L, Tompkins AM (2006) Response of the summer of 2003 mediterranean SST anomalies over Europe and Africa. *J Clim* 19:5439–5454
34. Karl TR, Knight RW (1997) The 1995 Chicago heat wave, how likely is a recurrence? *Bull Am Meteorol Soc* 78:1107–1119
35. Kysely, J. Influence of the persistence of circulation patterns on warm and cold temperature anomalies in Europe: Analysis over the 20th century. *Glob. Planet. Change* 2008, 62, 147–163.
36. Kwon, M. (2005). Decadal change in relationship between east Asian and WNP summer monsoons. *Geophysical Research Letters*, 32, L16709. <https://doi.org/10.1029/2005GL023026>
37. Large Scale Extreme Events in Surface Temperature during 1950–2003: An Observational and Modeling Study. Available online: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1168779> (accessed on 15 November 2016).
38. Lhotka, O., & Kysely, J. (2015). Characterizing joint effects of spatial extent, temperature magnitude and duration of heat waves and cold spells over Central Europe. *International Journal of Climatology*, 35(7), 1232–1244. <https://doi.org/10.1002/joc.4050>
39. Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., & Wanner, H. (2004). European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, 303(5663), 1499–1503. <https://doi.org/10.1126/science.1093877>
40. Meehl, G.; Tebaldi, C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* 2004, 305, 994–997

41. Miralles DG, Teuling AJ, van Heerwaarden CC, de Arellano JV-G (2014) Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. *Nat Geosci* 7:345–349
42. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 1994, updated monthly. NCEP/NCAR Global Reanalysis Products, 1948-continuing. Research Data Archive at NOAA/PSL: /data/gridded/data.ncep.reanalysis.html.
43. Noone, D., and I. Simmonds, 1999, Barras, V., and I. Simmonds, 2009
44. Palecki, M.A.; Changnon, S.A.; Kunkel, K.E. The Nature and Impacts of the July 1999 heat wave in the Midwestern United States: Learning from the lessons of 1995. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2001, 82, 1353–1367.
45. Park, C.-K., & Schubert, S. D. (1997). On the nature of the 1994 East Asian summer drought. *Journal of Climate*, 10(5), 1056–1070. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1056:OTNOTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1056:OTNOTE>2.0.CO;2)
46. Pezza, A.-B.; van Rensch, P.; Cai, W. Severe heat waves in the Southern Australia: Synoptic climatology and large scale connections. *Clim. Dyn.* 2012, 38, 209–224.
47. Poumadere M, Mays C, LeMer S, Blong R (2005) The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. *Risk Anal* 25:1483–1494
48. Robine, J. M., Cheung, S. L., Le Roy, S., van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J. P., & Herrmann, F. R. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 331(2), 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001>
49. Russo S., J. Sillmann and E.M. Fischer, 2015, Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environ. Res. Lett.* 10, 124003
50. Schär C, Jendritzky G (2004) Climate change: hot news from summer 2003. *Nature* 432:559–560
51. Schär C, Vidale PL, Luthi D et al (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427:332–336
52. Schär, C., Lüthi, D., Beyerle, U., & Heise, E. (1999). The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model. *Journal of Climate*, 12(3), 722–741.
53. Seibert, P. (1990). South Foehn studies since the ALPEX experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 43(1–4), 91–103. <https://doi.org/10.1007/BF01028112>
54. Sfiică, Lucian, Adina-Eliza Croitoru, Iulian Iordache, and Antoniu-Flavius Ciupertea. 2017. "Synoptic Conditions Generating Heat Waves and Warm Spells in Romania" *Atmosphere* 8, no. 3: 50. <https://doi.org/10.3390/atmos8030050>

55. Shevchenko O., Lee H., Snizhko S., Mayer H. Long-term analysis of heat waves in Ukraine. – *International Journal of Climatology*, Vol. 33, Issue 15. – P. 104 - 115.
56. Stefanon, M., D'Andrea, F., & Drobinski, P. (2012). Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014023>
57. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project: March, 1996 *BAMS*
58. Tibaldi S. and F. Molteni, 1990, On the operational predictability of blocking. *Tellus*, 42A, 343-365
59. Trigo R. M., I. F. Trigo , C. C. DaCamara and T. J. Osborn, 2004, Climate impact of the European winter blocking episodes from the NCEP/NCAR Reanalyses. *Climate Dynamics* (2004) 23: 17–28.
60. Tomczyk, A.M.; Bednorz, E. Heat waves in Central Europe and their circulation conditions. *Int. J. Climatol.* 2016, 36, 770–782.
61. Unkašević, M.; Tošić, I. An analysis of heat waves in Serbia. *Glob. Planet. Change* 2009, 65, 17–26.
62. Unkašević, M.; Tošić, I. Seasonal analysis of cold and heat waves in Serbia during the period 1949–2012. *Theor. Appl. Climatol.* 2015, 120, 29–40
63. Vautard R, Yiou P, D'Andrea F et al (2007) Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit. *Geophys Res Lett* 34:L07711. doi:10.1029/2006GL028001
64. Wang, P., Tang, J., Wang, S., Dong, X., & Fang, J. (2017). Regional heatwaves in China: A cluster analysis. *Climate Dynamics*, 50(5–6), 1901–1917
65. Zaitchik BF, Macalady AK, Boneau LR, Smith RB (2006) Europe's 2003 heat wave: a satellite view of impacts and land-atmosphere feedbacks. *Int J Climatol* 26:743–769

## Додаток А

Таблиця А.1 – Список конференцій та публікацій

<b>Вид наукової роботи (теми наукових робіт, автор, керівник роботи)</b>	<b>Кількість кредитів</b>
Участь у I етапі Всеукраїнського конкурсу наукових студентських робіт зі спеціальності «Науки про Землю (гідрометеорологія)» 2020-2021 н.р.	0,25
Призове перше місце у I етапі Всеукраїнського конкурсу наукових студентських робіт зі спеціальності «Науки про Землю (гідрометеорологія)» 2021-2022 н.р.	1,25
<b>Університетські конференції, семінари, гуртки (інші):</b>	
Конференції молодих вчених ОДЕКУ, 26-30 квітня 2021 р., м. Одеса. Доповідь на тему: «Інтенсивні хвилі тепла над територією України та їхній зв'язок з атмосферним блокінгом».	0,25
Виступ на студентському семінарі кафедри метеорології та кліматології на тему «Оцінка вразливості міста Києва до змін клімату»	0,25
Доповідь на студентському науковому семінарі на тему «Вразливість міста Київ до поточних і майбутніх змін клімату»	0,25
<b>Опубліковані тези конференцій:</b>	
Приходько Н.О., Хоменко І.А. Інтенсивні хвилі тепла над територією України та їхній зв'язок з атмосферним блокінгом. Матеріали XX наукової конференції молодих вчених Одеського державного екологічного університету. 26-30 квітня 2021 р. С. 188-189	0,25
<b>Всього</b>	<b>2,50</b>