МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра військової підготовки

Магістерська кваліфікаційна робота

на тему:

ДЕТЕРМІНІСТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНО ОБУМОВЛЕНИХ ФРОНТАЛЬНИХ ДІЛЯНОК НА ІЗОБАЧИНИХ ПОВЕРХНЯХ

Спеціальність 103 Науки про Землю
Спеціалізація «Метеорологія»
курсанта групи МВМ-19
Руслана КРУТЕНКА

Керівник:
Працівник ЗСУ Олександр ЄШАНУ
Рецензент: к.геогр.н.
Олена НАЖМУДІНОВА

Одеса – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра військової підготовки
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 103 Науки про Землю
(шифр і назва)
Спеціалізація Метеорологія
Освітня програма «Організація метеорологічного та геофізичного забезпечення Збройних Сил України»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник кафедри військової підготовки
полковник Олег ГРУШЕВСЬКИЙ

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

курсанту Крутенку Руслану
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Детерміністичне визначення циркуляційно обумовлених фронтальних ділянок на ізобаричних поверхнях».
керівник роботи Єшану Олександр Євгенійович, працівник ЗСУ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ректора ОДЕкУ від 16 жовтня 2020 року № 194-С
2.Строк подання курсантом роботи: 12 грудня 2020 року.
3. Вихідні дані до роботи: матеріалів архіву синоптичних карт за 2010 – 2015 р., даних об'єктивного аналізу полів метеорологічних величин.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) огляд сучасних технологій фронтологічного аналізу;

2) принципи проведення атмосферних фронтів у вітчизняній оперативній практиці;

3) сучасні методи фронтологічного аналізу, що впроваджуються у французькій гідрометслужбі на протязі двох останніх десятиріч;

4) опис методики порівняння особливостей розподілу значень температури та відносного вихору швидкості вздовж фронтальних зон у нижній тропосфері;

5) аналіз отриманих результатів комплексного дослідження полів температури та відносного вихору швидкості на ізобаричній поверхні ат-850 гпа за січень-лютий 2010-2015 р. Розгляд окремих випадків за січень-лютий 2015 р;

5. Перелік графічного матеріалу: графіки, таблиці, карти.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання: 27 жовтня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1.	Пошук літературних джерел за темою магістерської роботи	27.10-28.10.20	88	4
2.	Відпрацювання 1 та 2-го розділів роботи	29.10.-22.11.20	88	4
3.	Рубіжна атестація	23.11.20	86	4
4.	Обробка вхідних даних та розрахункової частини	24.11-01.12.20	88	4
5.	Відпрацювання 3-го розділу	02-08.12.20	90	5
6.	Відпрацювання вступної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків	09-10.12.20	84	4
7.	Перевірка роботи на плагіат, підготовка презентації, доповіді	10.12.20	88	4
8.	Подання роботи на рецензування	11.12.20	92	5
9.	Подання роботи до навчальної частини	12.12.20	88	4
10.	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)	12.12.20	88	4

Курсант _____ Руслан Крутенко
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник роботи працівник ЗСУ _____ Олександр Єшану
(підпис) (ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Магістерська кваліфікаційна робота курсанта Крутенка Р.В. на тему: «Детерміністичне визначення циркуляційно обумовленних ділянок фронту на ізобаричних поверхнях».

В даній магістерській кваліфікаційній роботі було зроблене комплексне дослідження полів температури та відносного вихору швидкості на ізобаричній поверхні АТ-850.

Актуальність обраної тематики обумовлена тим, що задопомогою даного дослідження ми взмозі з мінімальними затратами часу визначити положення атмосферного фронту з мінімальною кількістю помилок.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є оцінка існуючих технологій проведення фронтологічного аналізу й виявлення ефективних критеріїв та індикаторів фронтальних зон на предмет здатності їх втілення в оперативну практику.

Головними завданнями, що вирішувалися у рамках дослідження для досягнення мети:

– аналіз та прогноз фронтальних процесів;

– порівняння термічних та динамічних критеріїв фронтологічного аналізу;

– розрахунку статистичної обробки вихідних даних;

– синоптичні огляди за окремі дати періоду дослідження.

Об'єкт дослідження – атмосферний фронт.

Предмет дослідження – скоротити часові затрати на проведення атмосферних фронтів та зменшити кількість помилок.

Методи дослідження: при виконанні поставлених у роботі задач використовувалися: метод фронтологічного аналізу та метод дослідження полів температури та відносного вихору швидкості на різних ізобаричній поверхні АТ-850.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що наукові положення доведені до ступеню, придатного для практичного використання даного дослідження для проведення атмосферного фронту у метеорологічних підрозділах.

Дане дослідження дає змогу побачити положення атмосферного фронту на різних ізобаричних поверхнях.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– на основі даного долсідження було знайдено об’єктивні та кількісні критерії фронту (у вигляді фронтальних параметрів);

– дане дослідження дає змогу зменшити кількість помилок при проведенні атмосферного фронту;

– було досліджено критерії та індикатори фронтальних зон на предмет здатності їх втілення в оперативну практику.

Рекомендації щодо використання результатів роботи з зазначенням галузі застосування. В ході роботи досліджено поля температури та відносного вихору швидкості, який можна використовувати у метеорологічних підрозділах для проведення атмосферних фронтів.

Структура і обсяг роботи. Робота викладена на 54 сторінках машинописного тексту, містить у собі 36 рис., 2 таблиці, складається з вступу, 3-х розділів, висновків, списку використаних джерел (32 найм.) і 2-х додатків.

Ключові слова: атмосферний фронт, термічні та динамічні критерії, відносний вихор швидкості.

ABSTRACT

Master's qualification work of cadet Krutenko RV on the topic: "Deterministic definition of circulating sections of the front on isobaric surfaces".

In this master's qualification work, a comprehensive study of the temperature and relative vortex velocity fields on the isobaric surface of the AT-850 was made.

The relevance of the chosen topic is due to the fact that with the help of this study we are able with minimal time to determine the position of the atmospheric front with a minimum number of errors.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the master's qualification work is to assess the existing technologies of frontological analysis and identify effective criteria and indicators of frontal areas for the ability to implement them in operational practice.

The main tasks to be solved within the framework of the research to achieve the goal:

- analysis and forecast of frontal processes;
- comparison of thermal and dynamic criteria of frontological analysis;
- calculation of statistical processing of initial data;
- weather forecasts for individual dates of the study period.

The object of study is the atmospheric front.

The subject of the research is to reduce the time spent on conducting atmospheric fronts and reduce the number of errors.

Research methods: when performing the tasks set in the work, the following were used: the method of frontological analysis and the method of research of temperature fields and relative vortex velocity on different isobaric surfaces AT-850.

The practical significance of the obtained results is that the scientific provisions are brought to a degree suitable for the practical use of this study to conduct the atmospheric front in meteorological departments.

This study makes it possible to see the position of the atmospheric front on different isobaric surfaces.

The scientific novelty of the obtained results lies in the following:

- on the basis of this study, objective and quantitative criteria of the front were found (in the form of frontal parameters);

- this study makes it possible to reduce the number of errors in the atmospheric front;

- criteria and indicators of frontal zones were investigated for the ability to implement them in operational practice.

Recommendations for the use of the results of work with the designation of the field of application. In the course of the work, the fields of temperature and relative vortex velocity, which can be used in meteorological units for conducting atmospheric fronts, were investigated.

Structure and scope of work. The work is presented on 54 pages of typewritten text, contains 36 figures, 2 tables, consists of an introduction, 3 chapters, conclusions, a list of used sources (32 hires) and 2 appendices.

Key words: atmospheric front, thermal and dynamic criteria, relative vortex of velocity.

ЗМІСТ

Вступ 9
1 Огляд сучасних технологій фронтологічного АНАЛІЗУ 10
1.1 Принципи проведення атмосферних фронтів у вітчизняній оперативній практиці 11
1.2 Сучасні методи фронтологічного аналізу, що впроваджуються у французькій гідрометслужбі на протязі двох останніх десятиріч 15
2 Опис методики порівняння особливостей розподілу значень температури та відносного вихору швидкості вздовж фронтальних зон у нижній тропосфері 20
3. Аналіз Отриманих результатів комплексного дослідження полів температури та відносного вихору швидкості на ізобаричній поверхні ат-850 гпа за січень-лютий 2010-2015 р. Розгляд окремих випадків за січень-лютий 2015 р. 26
3.1 Статистичні характеристики поля відносного вихору швидкості нижньої тропосфери над Європою у січні-лютому 2010-2015 р. 26
3.2 Аналіз синоптичних ситуацій січня-лютого 2015 р. з використанням полів температури та вихору швидкості 34
Висновки 40
Перелік посилань 42
Додатки .....**Error! Bookmark not defined.**

ВСТУП

Концепція атмосферних фронтів, яка була заснована на ідеях метеорологів норвезької школи й потім отримала розвиток у роботі синоптиків, грає фундаментальну роль у синоптичній метеорології. Проблеми вивчення атмосферних фронтів включають цілий ряд направлень, які різняться конкретними об’єктами дослідження та підходом до розв’язання поставлених задач.

Аналіз та прогноз фронтальних процесів мають велике значення у прогностичній практиці й тісно пов’язані з оперативним прогнозуванням небезпечних гідрометеорологічних явищ. В останній час різко відчувається необхідність у розробці об’єктивних, кількісних, розрахункових методів прогнозів.

Актуальність теми дослідження зумовлюється:

1. Знаходженням об’єктивних, кількісних критеріїв фронту (у вигляді фронтальних параметрів), а на їх основі — перехід до комп’ютера під час фронтологічного аналізу.
2. Розробкою об’єктивних, кількісних, розрахункових методів прогнозів атмосферних фронтів.

Мета дослідження:

Метою курсового проекту є оцінка існуючих технологій проведення фронтологічного аналізу й виявлення ефективних критеріїв та індикаторів фронтальних зон на предмет здатності їх втілення в оперативну практику (для оцінки локалізації та інтенсивності атмосферних фронтів та пов’язаних з ними явищ погоди).

Завданнями, що вирішувалися у рамках дослідження для досягнення мети є:

- аналіз та прогноз фронтальних процесів;
- порівняння термічних та динамічних критеріїв фронтологічного аналізу;
- розрахунку статистичної обробки вихідних даних;
- синоптичні огляди за окремі дати періоду дослідження;

Предмет дослідження – полягає у тому щоб скоротити часові затрати на проведення атмосферних фронтів та зменшити кількість помилок.

Методи дослідження: при виконанні поставлених у роботі задач використовувалися: метод фронтологічного аналізу та метод дослідження полів температури геопотенціалу та відносного вихору швидкості на різних ізобаричних поверхнях.

Швидкий розвиток об'єктивного аналізу та чисельного прогнозу атмосферних полів призвів до появи у розпорядженні вітчизняного синоптика великої кількості прогностичних карт, супутникової інформації, але практично не змінив підхід до фронтологічного аналізу карт погоди, який до цих пір базується на досвіді та творчій інтуїції синоптика – прогнозиста. На даний момент постає задача знаходження об'єктивних, кількісних критеріїв фронтів (у вигляді фронтальних параметрів), а на їх основі – й переходу по допомогу до комп'ютера під час фронтологічного аналізу.

Магістерська робота виконана на основі використання літературних джерел на тему дослідження з залученням матеріалів архіву синоптичних карт за 2010 – 2015 р., даних об'єктивного аналізу полів метеорологічних величин.

Магістерська робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків та списку використаних джерел (32 позиції)

У першому розділі вивчаються класичні та сучасні методики виявлення атмосферних фронтів.

Другий розділ магістерської роботи присвячений опису методики порівняння термічних та динамічних критеріїв фронтологічного аналізу. Також тут міститься опис вихідних даних.

У третьому розділі наведені результати розрахунку й статистичної обробки вихідних даних, а також синоптичні огляди за окремі дати періоду дослідження.

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ФРОНТОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ

1.1 Принципи проведення атмосферних фронтів у вітчизняній оперативній практиці

Атмосферний фронт – вузька перехідна зона між сусідніми повітряними масами, яка характеризується різкими змінами метеорологічних величин [6]. Синонімами є терміни «фронтальна зона» та «фронтальний шар», оскільки у реальних умовах область переходу між повітряними масами має кінцеву ширину, яка у поверхні Землі має розміри у декілька десятків кілометрів, а у вільній атмосфері – декілька сотен кілометрів. Вертикальна протяжність фронтального шару складає декілька сотен метрів.

Не слід змішувати поняття фронтальної зони та висотної фронтальної зони (ВФЗ). Остання є областю переходу від високого холодного циклону до високого теплого антициклону. Горизонтальні градієнти температури та тиску у ній великі, але вони не зосереджені у невеликій по широті області, як у фронтальній зоні, а розподілені по значній території. Фронтальна зона краще виражена у нижній половині тропосфери, а ВФЗ – у середній та верхній її частині. Атмосферний фронт є складовим елементом ВФЗ [5].

Виникнення та існування фронтів, які зазвичай спостерігаються протягом декількох діб, можливе в області збіжності повітряних течій, що забезпечують зближення різнорідних за своїми характеристиками повітряних мас. Тому вони виникають та тривалий час існують в зонах пониженого тиску, тобто в циклонах та улоговинах. Ширина фронтального шару тим менш, чим інтенсивніше процес конвергенції повітряних течій, а оскільки він краще виражений у шарі приземного тертя, то фронтальний шар має меншу ширину поблизу поверхні Землі та більшу – у вільній атмосфері.

В зонах підвищеного тиску (антициклонах та гребнях), для яких характерна розбіжність повітряних течій, фронти тривалий час існувати, а тим більш формуватися не можуть. Спостерігаються вони на периферіях антициклонів, у полях метеорологічних величин. Як перехідні зони від однієї повітряної маси до іншої вони виражені значно гірше, ніж у зонах пониженого тиску.

Якщо уявити фронтальний шар у вигляді фронтальної поверхні, на ній значення метеорологічних величин, таких як температура та вологість, будуть стрибкоподібні. Під час переходу через фронтальну поверхню, різко змінює своє значення горизонтальний градієнт тиску та вітер.

Проведення фронтів на картах баричної топографії полегшує їх аналіз на приземній карті погоди та, крім цього, дозволяє скласти уявлення про деякі особливості просторової структури самого фронту: кут нахилу, положення верхніх компонент фронтів оклюзії, розподіл температури, вологості та вітру у зоні фронту [7], зміну контрасту температури з висотою, вертикальну потужність повітряних мас.

Основний вплив на визначення положення фронтів на висотах має поле температури. Поле геопотенціалу, вітер та розподіл вологи можуть буди лише додатковими ознаками.

Для аналізу фронтів необхідно викреслити на відповідній карті баричної топографії (в основному на карті AT_{850}) ізотерми – через 2°С (згідно з стандартами та рекомендаціями [12]), тому що при більшому інтервалі вони дають досить згладжену картину розподілу температури, яка часто не дозволяє вирішити питання про положення фронтів.

На висотах фронти мають вигляд більш чи менш широкої перехідної зони, тобто, не можуть бути представлені однією лінією. (До речі, наведене ствердження, що у вітчизняній практиці набуло вигляд аксіоми, іноді спростовується останніми мезомасштабними дослідженнями атмосферних фронтів: наприклад, в роботі [30] є опис океанічного холодного фронту, що характеризувався збільшенням своєї інтенсивності з висотою, бо горизонтальні термічні градієнти на висотах ~2 км майже вдвічі перевищували приземні.) Лінію фронту слід проводити всередині перехідної зони там, де горизонтальний градієнт температури найбільший. Звісно, що фронт на великій протяжності не може бути паралельний ізотермам, так як температура в теплій та холодній масах повітря на різних ділянках фронту різна. Ці відмінності обумовлені географічною широтою місця, впливом вертикальних рухів повітря, неоднорідним характером підстильної поверхні та хмарності на різних ділянках фронту [4, 5, 8]. Висхідні рухи повітря у циклоні та низхідні в антициклоні впливають на поле температури так, що на теплому фронті в області циклона виявляється тенденція ізотерм до повороту вправо від лінії

фронту, а на холодному фронті, у зоні низхідних впорядкованих рухів повітря, – вліво (якщо дивитися вздовж ізотерм, залишаючи низькі температури зліва).

Вплив неоднорідності підстильної поверхні на температуру на рівні 850 гПа особливо сильно виявляється у Полярному басейні поблизу межі льодів у океанічних узбереж та у гірських районах. Так, при повітрі північних румбів великі контрасти температури на поверхні 850 гПа часто спостерігаються над Баренцовим та Гренландським морями та північною частиною Норвезького моря під час відсутності фронту у поверхні Землі. Ще більший вплив має Гренландія. На південь від неї, над Північною Атлантикою, під час тривалого північного вітру контрасти температури зазвичай настільки великі, що створюють повне враження наявності основного фронту. Відрізнити їх від контрастів, пов'язаних з дійсним фронтом, дозволяє порівняння карт для двох-трьох послідовних строків спостереження. У випадку впливу орографії зона температурних контрастів залишається на тому ж місці, у випадку фронту вона зміщується разом з потоком.

Під час аналізу поля температури над гірськими районами необхідно враховувати висоти аерологічних станцій над рівнем моря. Якщо станція лежить на висоті приблизно 1000 м, тоді денне нагрівання та нічне вихолодження поверхні ґрунту у значній степені визначають температуру на рівні 850 гПа [4, 14, 17].

Для фронту оклюзії на поверхні 850 гПа характерним є гребінь тепла. Однак, виявивши його на карті, слід впевнитися (до проведення фронту оклюзії), що наявність цього гребня зобов'язана процесу оклюдування циклону. Уявлення про здатність оклюдування можна отримати завдяки приземній карті погоди.

Використання поля температури іноді може бути недостатнім для формулювання остаточного висновку про існування та положення фронту на поверхні 850 гПа. Тому під час аналізу фронтів слід у всіх випадках додатково розглядати поля вологи та вітру.

З двох характеристик вологи – точки роси та її дефіциту – краще уявлення про положення фронтів дає точка роси.

Зміни точки роси на даній ізобаричній поверхні у рухомому повітрі залежать в основному від вертикальних рухів повітря та процесів конденсації. Вплив турбулентного переносу водяної пари з поверхні Землі на зміни вологи вже на поверхні 850 гПа є послабленим, вище він виявляється ще слабшим.

Найбільш суттєвий вплив низхідних рухів [22]. Вони інколи настільки сильно знижують точку роси у теплому повітрі, що її значення у ньому на даній ізобаричній поверхні стає нижче, ніж у розташованому поруч холодному повітрі, яке не відчуває низхідні рухи. Висхідні рухи, які супроводжуються конденсацією, у меншій мірі змінюють точку роси, оскільки викликане ними збільшення вологи на даній висоті у тій чи іншій мірі компенсується впливом конденсації.

Еволюція циклона супроводжується еволюцією поля точки роси на висотах. Під час утворення хвилі у теплому повітрі на висотах виникає невелика за розмірами самостійна область підвищених значень точки роси. При подальшому розвитку циклону в його теплому секторі з'являється язик вологого повітря, витягнутий у передню частину циклону, з вершиною попереду лінії теплого фронту у поверхні Землі, приблизно збіжний з зовнішньою межею зони опадів цього фронту. Разом зі звуженням теплого сектору та пониженням у ньому температури звужується язик вологого повітря та зменшується точка роси. У подальшому найбільш високі значення точки роси спостерігаються вже далі від центру циклону, але витягнутий вперед за потоком язик вологого повітря зберігається. Його вісь розташовується поблизу холодного фронту.

Фронти, на яких випадають опади, характеризуються зоною великих контрастів точки роси [18]. Однак положення середньої частини цієї зони помітно змінюється в залежності від інтенсивності опадів та площі їх розповсюдження. Максимальний контраст точки роси спостерігається на фронті, якщо межа зони опадів приблизно співпадає з положенням фронту на даному рівні.

Фронт, незалежно від наявності чи відсутності на ньому опадів, характеризується довгою вузькою смугою підвищених значень точки роси, коли поблизу нього у теплому повітрі розташований потужній антициклон. При цьому фронт приблизно паралельний ізогіпсам, які окреслюють прилеглу до нього частину антициклону. З іншого боку від фронту спостерігаються низькі значення точки роси, характерні для холодного повітря. У таких випадках фронт звичайно ближче до зони великих контрастів точки роси, що розташована у холодному повітрі.

На фронтах горизонтальні градієнти температури та точки роси направлені у бік холодного повітря. У зоні великих контрастів точки роси,

обумовленій різницею у значеннях низхідних рухів всередині тієї ж самої повітряної маси, значення точки роси зменшуються від периферії антициклону до його центральної частини, температура помітно не змінюється чи зростає до центральної частини антициклону [6].

Для аналізу фронтів може бути використане й поле дефіциту точки роси ($T–T_d$), який в зоні фронту зазвичай мінімальний. Однак, слід пам'ятати про велику залежність дефіциту точки роси від процесів конденсації. Він близький до нуля усюди, у тому числі за фронтом, де на даному рівні випадають опади чи є хмарність з великою водністю. Розриви у значеннях дефіциту точки роси можуть бути й поза фронтом, наприклад на межі хмарності.

Вітер та його горизонтальний зсув не дають достатніх вказівок для проведення фронту на картах баричної топографії. Відмінність у нахилі поверхні фронту та ізобаричних поверхонь призводить до зміщення вісі улоговини в сторону холодного повітря, з висотою вона ще більш віддаляється від фронтальної зони. Тому на поверхні 850 гПа лише пологі фронти можуть характеризуватися зворотом вітру. На більш високих основних ізобаричних поверхнях, навіть на пологих фронтах, зворот вітру спостерігається або на периферії, або вже поза межами фронтальної зони. Відсутній й чіткий зв'язок між положенням фронту та розподілом швидкостей вітру у фронтальній зоні.

Коли на вісі улоговини на поверхні Землі лежить приземний фронт, зворот вітру з висот може викликати враження про наявність фронту на більш високих рівнях. Однак відсутність контрасту температури у таких випадках вказує на відсутність фронту на висотах.

1.2 Сучасні методи фронтологічного аналізу, що впроваджуються у французькій гідрометслужбі на протязі двох останніх десятиріч

Під час проведення атмосферних фронтів традиційно використовують поле температури як на земній поверхні, так і на картах баричної топографії нижніх рівнів (згідно з чинними міжнародними стандартами [25]).

Однак в останнє десятиліття під час фронтологічного аналізу використовують нові прийоми та методики, які значну увагу приділяють й полям вітру на різних рівнях [27, 28]. При цьому може застосовуватися

комплексний підхід та формуватися ієрархія методів дослідження, в основі якої може лежати певна концепція фронтологічного аналізу.

Розглянемо методологію, яку запропонували синоптики та наукові робітники гідрометеорологічної служби Франції.

З багатолітнього досвіду синоптичної практики відомо, що під час фронтологічного аналізу, крім приземної карти, необхідно використовувати карти верхніх рівнів (вказівки про це є у міжнародних документах ВМО, наприклад, [25]). Однак, отримані результати в галузі динамічної метеорології (припущення про баланс та постійність тропосферного потенційного вихору), свідчать про те, що у дійсності слід залучити лише один додатковий рівень. Більш того, деякі теореми прямо кажуть про те, які рівні слід обрати. Математичний результат складається в наступному: амплітуда відхилення від середнього чи кліматологічного потоку для полів потенційної температури, швидкості вітру, геопотенціалу, вихору (такі поля називаються «геострофічними»), є максимальною на межі. Тому найкраще відношення сигнал-шум для відображення цих полів буде спостерігатися поблизу земної поверхні та тропопаузи. Ці теореми дають чіткі вказівки стосовно того, які рівні є більш значні. Рівень тропопаузи, наприклад, визначається полями на карті поверхні для одного значення потенційного вихору: 1,5 pvu чи 2,0 pvu (1 pvu – одиниця вимірювання потенційного вихору: 1 pvu = 10^{-6} К м^2 кг$^{-1}$ с$^{-1}$). До речі, поля та розрізи потенційного вихору також використовують під час досліджень атмосферних фронтів в якості важливих індикаторів вертикальних рухів [30].

Дана методологія застосовується у першу чергу для широкої трансокеанської хмарної смуги [26].

Сучасний аналіз цих ситуацій пов’язує більшу частину смугових хмарних структур із горизонтальною зміною швидкості в струменевих течіях.

Нова концепція дозволяє надати сутнісне уявлення про течію та пов’язану з нею бароклинність, що призводить до якісно іншого сприйняття ситуації.

Першим етапом фронтологічного аналізу є визначення крупномасштабного режиму та потім значущих характеристик верхнього рівня. При цьому ідентифікують струменеві течії, а також деякі особливості розподілу градієнтів швидкості (зони дивергенції, конвергенції та ін.) та інші деталі поля вітру на верхньому рівні.

Для цього конструюють карту векторів швидкості вітру на рівні тропопаузи (яка визначається як поверхня потенційного вихору 1,5 pvu). На цю ж карту наносять геопотенціал висоти, потенційну температуру та відносний вихор швидкості. Таким чином, досліджують потік на рівні тропопаузи.

Після ідентифікації основного потоку ті самі поля можуть бути використані для локалізації значних аномалій верхніх рівнів. Тут значна увага повинна приділятися часовому масштабу тих полів, які вивчаються. Відокремити слід структури з мінімальним часом існуванням. Це потребує залучення даних з інших полів, наприклад, приземний аналіз та поля вертикальної швидкості на рівні 400 гПа чи нижче.

На наступному етапі виконується ідентифікація фронтальних зон та інших синоптичних структур лінійного масштабу. Основними для цього аналізу є низькорівневі поля (зазвичай, це рівень 850 гПа) потенційної температури за змоченим термометром (θ_w), вихору та векторів вітру з магнітудами.

Для реальних фронтів за останніми науковими дослідженнями найбільш придатним термічним параметром є волога потенційна температура (θ_e або θ_w). З цього випливає, що поле температури не може використовуватися окремо чи самостійно, коли потрібно відокремити фронтальну зону від бароклинної зони струменевої течії. Основні відмінності мають місце у полі вітру нижнього рівня. Реалістичні ідеалізовані моделі відокремлюють дві характерно виражені риси поля вітру, що пов’язане з фронтом [15, 16]:

1) наявність добре вираженого низькорівневого максимуму вихору швидкості;

2) наявність як мінімум однієї струменевої течії нижнього рівня, яка може знаходитися як на теплому або холодному боці, так і на обох боках.

Ці характерні особливості підтверджуються спостереженнями.

На думку французьких вчених (Joly та Santurette) фронтальні символи не повинні використовуватися при наявності характерних особливостей у полі однієї величини, наприклад, значного градієнту температури. Значимість нової концепції фронту полягає в тому, що він є збалансованою структурою, яка пов’язує характеристичні властивості декількох полів, в особливості полів вихору та вологої потенційної температури (“сухі” збалансовані фронти у синоптичному масштабі є рідким явищем). У цій площині,

мультипараметричний підхід до проведення фронту, запропонований гідрометслужбою Франції, сильно відрізняється від традиційних підходів у дусі норвезької школи. Традиційні підходи використовують лише термічний параметр, у той час як ведучі спеціалісти гідрометслужби (Joly та Santurette) наполягають на необхідності використовувати фронтологічні символи (тобто проводити лінію фронту) лише у тих місцях, де спостерігається поєднання характерних відмінностей термічних та вітрових полів. Існує уявлення, що в умовах суворо збалансованого потоку над однорідною водяною планетою, це не було б необхідністю. Однак, практика щоденного аналізу підтверджує наявність багаточисельних зон значних змін температури, які мало пов'язані чи взагалі не пов'язані з фронтами [13, 19, 20, 26].

У рамках цього підходу фронтальні потоки та струменеві течії повинні розглядатися як два різних «вида» з більш загального «сімейства» бароклинних зон. Для глибокого розуміння погодних процесів необхідно використовувати заходи для поділу цих двох типів структур.

Під час проведення фронту горизонтальний градієнт повинен бути узгоджений з фоновим градієнтом більш широкої бароклинної зони струменевої течії. Можуть бути задіяні також дані вертикальної швидкості у нижній тропосфері. Необхідно також розглядати хронологічну послідовність цих полів на предмет росту чи спаду активності фронту.

Області значного термічного градієнту, які не узгоджуються з полем вітру на нижніх рівнях, можуть бути охарактеризовані як так званий "псевдофронт". Псевдофронти можуть бути залишками фронтальної смуги та результатом процесів у граничному шарі атмосфери, які викликані змінами властивостей підстильної поверхні, орографією та ін. Псевдофронти пропонують використовувати також в якості проекції течії верхнього рівня на приземну поверхню.

Наступним етапом є ідентифікація активних зон фронтів. У якості основних полів для цього пропонують використовувати вертикальну швидкість на різних рівнях, інтенсивність опадів, а також доцільно залучати супутникові знімки.

Відмінною особливістю описаної методики фронтологічного аналізу є здатність знаходження фронтологічних зон, які не є досить інтенсивними, щоб бути термічними фронтами. Такий підхід можна розглядати як наслідок успішної комбінації усіх доступних засобів та даних, що дозволяє досягати

більшої об’єктивності та результативності у порівнянні з більш ранніми методиками фронтологічного аналізу (наприклад, [1]).

2 ОПИС МЕТОДИКИ ПОРІВНЯННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ЗНАЧЕНЬ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВІДНОСНОГО ВИХОРУ ШВИДКОСТІ ВЗДОВЖ ФРОНТАЛЬНИХ ЗОН У НИЖНІЙ ТРОПОСФЕРІ

Як вже згадувалося у розділі 1.2, відносний вихор швидкості входить у число рекомендованих критеріїв наявності атмосферного фронту на ізобаричній поверхні [25-29]. Як правило, це поверхня АТ-850 гПа.

В останніх наукових роботах зарубіжних вчених [30] під час досліджень мезомасштабної структури фронтальних розділів лінію фронту на заданій площині проводять шляхом з'єднання окремих очагів максимальних значень вертикальних складових відносного вихору. Це яскравий приклад використання полів вітру (точніше, диференціальних характеристик швидкості вітру та їх розподілу) під час фронтологічного аналізу.

У даній роботі для дослідження атмосферних фронтів буде використаний вихор швидкості.

Нижче розглянуто виведення формул для складових відносного вихору.

Характеристикою обертальної здатності поля швидкості у даній точці може слугувати щільність циркуляції, тобто границя відношення циркуляції вектора швидкості по замкненому контуру до площі, обмеженої цим контуром під час стягування його у точку:

$$\lim_{S\to 0}\frac{\int_L (\vec{V},\vec{dl})}{S} = \lim_{S\to 0}\frac{\int_L (udx+vdy+wdz)}{S}. \qquad (2.1)$$

У різних площинах, які проходять через дану точку поля, щільність циркуляції швидкості буде мати різну величину. У зв'язку з цим вираз (2.1) для щільності циркуляції у вільній обраній площині S доцільно перетворити за допомогою теореми Стокса, яка виражає криволінійний інтеграл по замкненому контуру через подвійний інтеграл по поверхні, обмеженій цим контуром.

Права частина отриманого виразу (2.4) є скалярним добутком деякого вектора $\vec{\Omega}$, який має назву вихору швидкості ($\vec{\Omega} = rot\vec{V}$), на одиничний вектор нормалі $\vec{n}$ до поверхні S.

Звідси випливає, що через дану точку проходить одна певна площина, в якій щільність циркуляції на даний момент часу має найбільше значення, яке дорівнює модулю вихору швидкості у цій точці. У всіх інших площинах щільність циркуляції буде мати меншу величину.

$$\int_L udx + vdy + wdz = \iint_s [(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z})cos(\vec{n}\widehat{\ } x) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) cos(\vec{n}\widehat{\ } y) + + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) cos(\vec{n}\widehat{\ } z)]dS, \quad (2.2)$$

де n – нормаль до поверхні S, в якій лежить контур L. Згідно з цією формулою вираз для щільності циркуляції (2.1) можна переписати у наступному вигляді:

$$\lim_{s\to 0}\frac{1}{S}\int_L (\vec{V}, \overrightarrow{dl}) = \lim_{s\to 0}\frac{1}{S}\iint_S [(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\ cos(\vec{n}, x)] + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) cos(\vec{n}, y) + + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) cos(\vec{n}, z)]dS. \quad (2.3)$$

Використовуючи теорему про середнє, зробивши скорочення на S та переходячи до границі, отримаємо:

$$\lim_{s\to 0}\frac{1}{S}\int_L (\vec{V}, dl) = (\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z})cos(\vec{n}, x) + \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) cos(\vec{n}, y) + + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) cos(\vec{n}, z). \quad (2.4)$$

$$\vec{n} = \vec{\imath} cos(\vec{n}, x) + \vec{j}\ cos(\vec{n}, y) + \vec{k}\ cos(\vec{n}, z). \quad (2.5)$$

Отже, проекції вихору швидкості на вісі координат будуть дорівнювати:

Щоб з’ясувати фізичний зміст вихору швидкості, розглянемо елементарний об’єм рідини чи газу. Радіус-вектор $\vec{r}$ будь-якої точки цього об’єму відносно початку координат буде мати проекції на координатні вісі, що дорівнюють x, y, z.

$$\Omega_x=\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z};\tag{2.6}$$

$$\Omega_y=\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x};\tag{2.7}$$

$$\Omega_z=\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y};\tag{2.8}$$

а сам вихор швидкості як вектор набуде вигляду:

$$\Omega=\vec{\imath}(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z})+\vec{\jmath}(\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x})+\vec{k}(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}).\tag{2.9}$$

У відповідності з формулою (2.9), вихор швидкості можна розглядати як векторний добуток символічного вектора «набла» на вектор швидкості:

$$\Omega=[\nabla,\vec{V}].\tag{2.10}$$

Вводячи вихор швидкості, формулу (2.4) для щільності циркуляції у заданій площині з нормаллю $\vec{n}$ можна переписати у наступному виді:

$$\lim_{S\to 0}\frac{\int_L(\vec{V},\vec{dl})}{S}=\Omega\cos(\vec{n},\vec{\Omega}).\qquad\ldots.\tag{2.11}$$

Нехай виділений об’єм обертається як тверде тіло відносно початку координат з постійною кутовою швидкістю $\vec{\omega}$. Тоді лінійна швидкість руху будь-якої точки виділеного об’єму буде дорівнювати векторному добутку кутової швидкості $\vec{\omega}$ на радіус обертання $\vec{r}$:

$$\bar{V}=[\bar{\omega},\vec{r}\,].\tag{2.12}$$

Таким чином, вихор швидкості буде дорівнювати подвійній кутовій швидкості обертання частинок рідини чи газу та є характеристикою обертальної здатності поля швидкості у даній точці.

Проектуючи останню рівність на вісі координат, знаходимо складові лінійної швидкості:

$$u=\omega_y z-\omega_z y,$$

$$v=\omega_z x-\omega_x z,$$

$$w=\omega_x y-\omega_y x. \qquad (2.13)$$

У зв'язку з цим складові вихору швидкості по вісям координат дорівнюють:

$$\Omega_x=\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}=\omega_x+\omega_x=2\,\omega_x,$$

$$\Omega_y=\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x}=\omega_y+\omega_y=2\omega_y,$$

$$\Omega_z=\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}=\omega_z+\omega_z=2\,\omega_z, \qquad (2.14)$$

отже, $\Omega=2\bar{\omega}$.

У метеорології частіше всього розглядається вертикальна складова вихору швидкості, що виражає властивості вихору горизонтального поля вітру та визначається формулою:

$$\Omega_z=\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}. \qquad (2.8):$$

Зауважимо також, що формулу (2.2), яка виражає теорему Стокса, можна записати у вигляді:

$$\int_L (\vec{V},\vec{dl})=\iint_S (\vec{\Omega},\vec{n})\,dS. \qquad (2.15)$$

Вона показує, що циркуляція швидкості по будь-якому замкненому контуру дорівнює потоку вихору швидкості через його контур. З цієї ж формули витікає, що якщо рух повітря є безвихровим, то циркуляція швидкості дорівнює нулю.

Виходячи з методичних рекомендацій гідрометслужби Франції, можна зробити висновок о наявності залежності між полем температури та полем відносного вихору швидкості, яка виражена у наступному: вздовж областей

підвищених горизонтальних градієнтів температури будуть розташовані максимуми відносного вихору (зокрема, на рівні АТ-850 гПа).

Загальновідомим є факт наявності річного ходу температури в помірних та високих широтах.

Суб'єктивний досвід синоптиків свідчить про те, що всередині зимового чи літнього сезону атмосферні фронти на поверхні АТ-850 гПа щодня розташовані вздовж певних ізотерм. Якщо це ствердження є справедливим, тоді для певних значень температури на АТ-850 гПа буде характерною наявність максимумів вертикальних складових відносного вихору.

У подальшому досліджується залежність відносного вихору Ω_{850} на ізобаричній поверхні АТ-850 від температури в °С на тій самій поверхні. Для цього необхідно виконати осереднення відносного вихору Ω_{850} по градаціям температури T_{850}. При цьому осереднення буде виконуватися в одноградусному інтервалі значень температур. Кожне осереднене значення вихору Ω_{850} віднесемо до середини відповідного інтервалу. Серединними значеннями інтервалів температури будуть її цілі значення. Отже, осереднення вихору швидкості Ω_{850} відносно кожного цілого значення T_{850} буде відбуватися, коли його значення опиниться у межах $T_{850} \pm 0{,}5$°С.

У даній роботі буде розглядатися полігон, обмежений по широті 30° пн.ш. та 80° пн.ш., а по довготі – 0° сх.д. та 60° сх.д.

Для дослідження використовуються дані, які відповідають серединам декад перших двох місяців календарного року: 5, 15, 25 січня; 5, 15, 25 лютого. Осереднення відбувається за період з 2010 р. по 2015 р. включно.

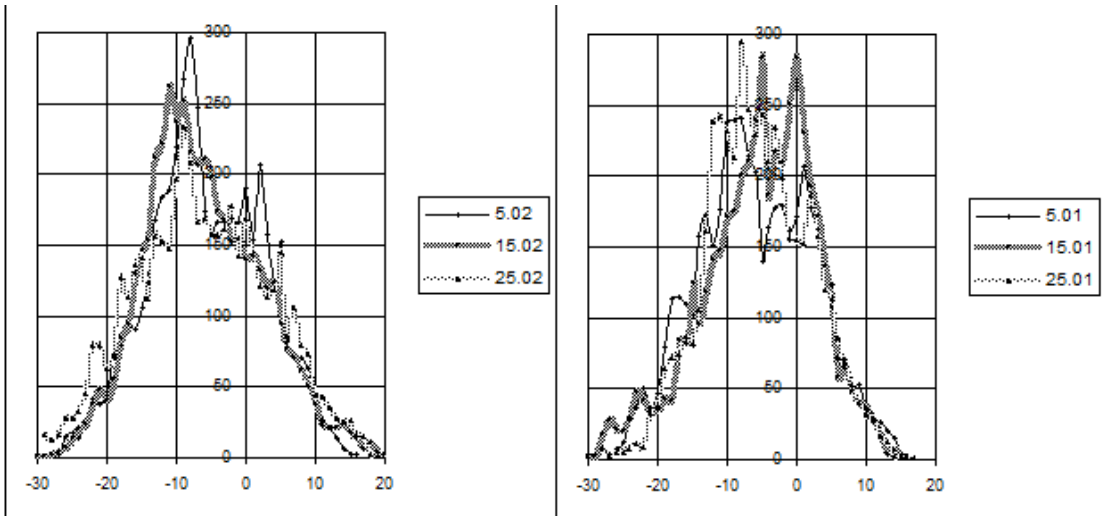
У якості вихідних даних використовуються карти приземного аналізу, абсолютної баричної топографії (АТ-850 гПа), а також дані реаналізу глобальних атмосферних полів Національного центру прогнозів США (NCEP/NCAR) – поля температури на поверхні 850 гПа та відносного вихору швидкості Ω_{850} на поверхні 850 гПа з просторовим розділенням 2,5°□2,5° по широті та довготі.

Проведення осереднення відбувається автоматично за допомогою комп'ютерних програм. Дані реаналізу для полів Ω_{850} та T_{850} були взяті в форматі довгота-широта-значення.

Під час підготовки вихідних даних для осереднення створювалися текстові файли, в яких записувалися два стовпця значень: перший стовбець –

T_{850}, а другий – Ω_{850}. При заданому розділенні сітки для кожного дня, який розглядається, буде взято 525 пар значень відносного вихору Ω_{850} та температури T_{850}. Під час використання дев'ятирічного періоду (з 2010 р. по 2015 р.), загальна кількість пар значень склала 4725. У результаті проведення за допомогою комп'ютерної програми осереднення кожному цілому значенню T_{850} буде відповідати осереднене значення Ω_{850}. На рис. 2.1 наводяться графіки, що містять відомості про кількість значень, що використовувалися для осереднення по всіх інтервалах температури у січні (а) та лютому (б) 20010-2015 р.

Методика осереднення відносного вихору швидкості по градаціям температури дає можливість встановити взаємозв'язок між існуючими областями підвищених горизонтальних градієнтів температури та величиною вертикальної складової вихору швидкості.



а) б)

Рис. 2.1 – Графіки розподілу кількості значень відносного вихору швидкості Ω_{850} (вздовж осі ординат), що потрапляють в одноградусні інтервали температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на рівні АТ-850 за січень (а) та лютий (б) 2010-2015 р.

3. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВІДНОСНОГО ВИХОРУ ШВИДКОСТІ НА ІЗОБАРИЧНІЙ ПОВЕРХНІ АТ-850 ГПА ЗА СІЧЕНЬ-ЛЮТИЙ 2010-2015 Р. РОЗГЛЯД ОКРЕМИХ ВИПАДКІВ ЗА СІЧЕНЬ-ЛЮТИЙ 2015 Р.

3.1 Статистичні характеристики поля відносного вихору швидкості нижньої тропосфери над Європою у січні-лютому 2010-2015 р.

За допомогою методики, яка описана у другому розділі, була виконана оцінка статистичного розподілу значення відносного вихору Ω_{850} відносно ізотерм T_{850} на ізобаричній поверхні АТ–850 гПа для дат, які відповідають серединам декад перших двох місяців календарного року: 5, 15, 25 січня; 5, 15, 25 лютого.

Використана методика дозволяє виявити кліматичні особливості поля відносного вихору Ω_{850} відносно поля температури T_{850} на тій самій ізобаричній поверхні.

На основі послідовного аналізу карт АТ–850 гПа та фактичних приземних карт у період дослідження 2010-2015 рр. було виявлено, що основні фронтальні розділи (арктичний та полярний фронти) на картах АТ-850 гПа розташовані у діапазоні температур від -10°С до 0°С.

Для цих шістьох дат побудовані графіки залежності Ω_{850} від T_{850}, які представлені на рис. 3.1–3.6. Для усіх залежностей характерна наявність максимумів відносного вихору у діапазоні температур від -10°С до 0°С. Це вказує на зв’язок між областями підвищених горизонтальних градієнтів температури та областями локалізації максимумів відносного вихору швидкості (причому ці максимуми лежать в області додатних значень відносного вихору, що зазвичай відповідає вісям баричних улоговин та центрам циклонів).

Максимуми відносного вихору швидкості, які попадають в інші діапазони температури АТ-850 гПа, не є стійкими. Тому очевидно, що вони не будуть пов’язані з основними фронтальними розділами.

У середині інтервалу температури [-20˚С; -10˚С] у січні та лютому також спостерігаються максимуми Ω_{850}, однак 15 січня він має погано виражений характер й знаходиться в області від'ємних значень $\Omega_{850.}$ У цьому діапазоні температур T_{850} часто спостерігається бароклинна зона, яку інколи кваліфікують як вторинний холодний фронт у тиловій частині циклону

Значення максимумів Ω_{850} та їх термічні координати для усіх трьох дат наводяться у табл. 3.1, яка узагальнює вміст відповідних графіків (рис. 3.1–3.6).

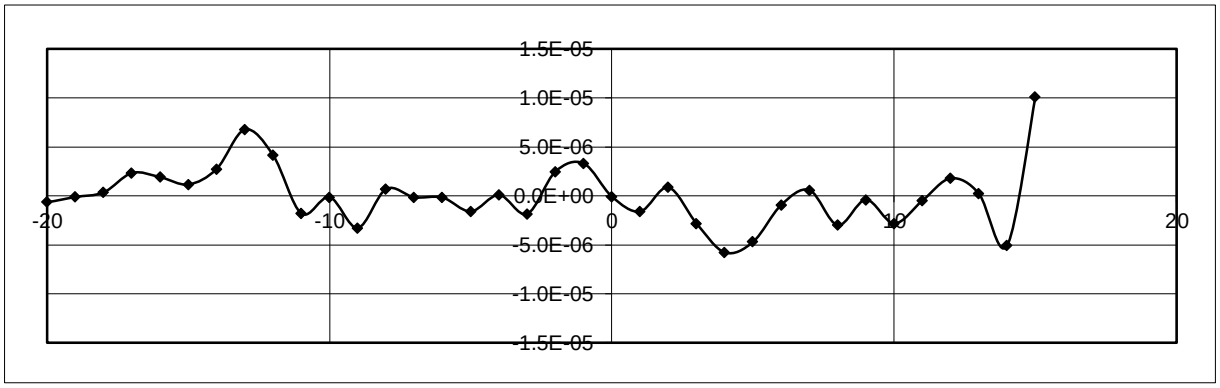


Рис. 3.1 – Графік розподілу осереднених значень відносного вихору швидкості Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на поверхні АТ-850 гПа 5 січня 2010-2015 р.

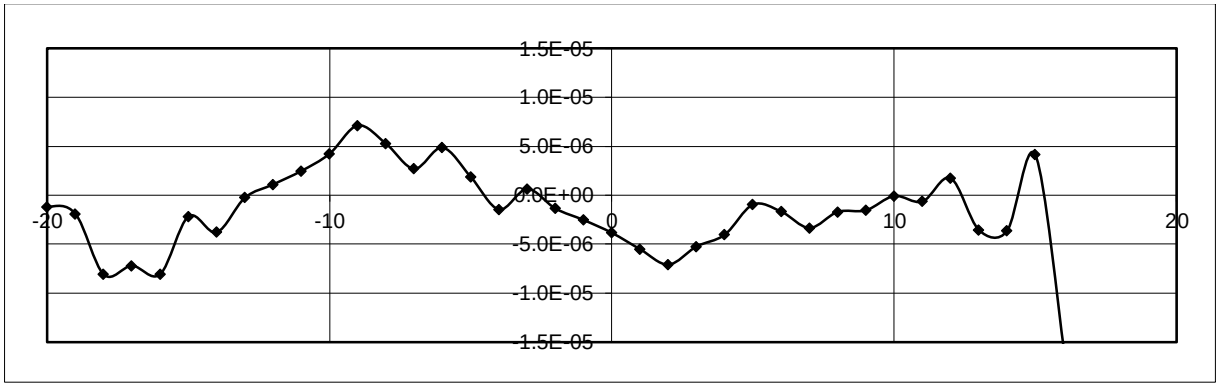


Рис. 3.2 – Графік розподілу осереднених значень відносного вихору швидкості Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на поверхні АТ-850 гПа 15 січня 2010-2015 р.

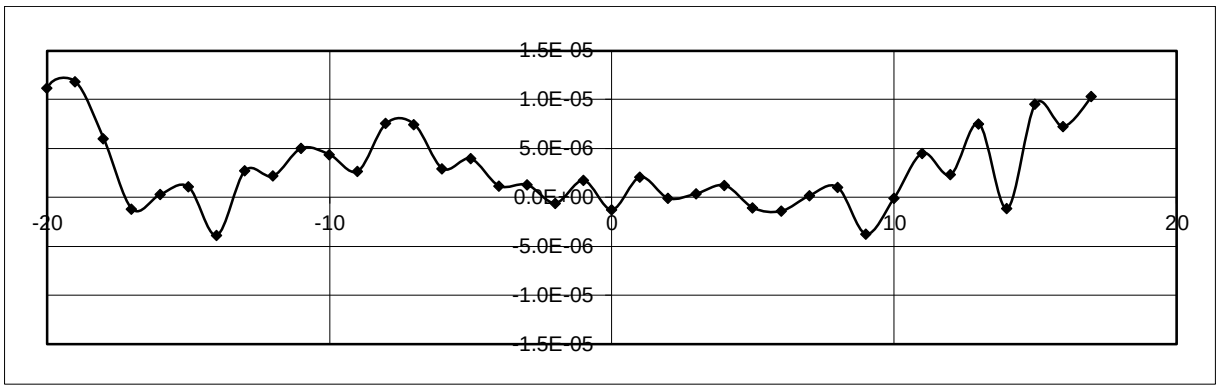


Рис. 3.3 – Графік розподілу осереднених значень відносного вихору швидкості Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на поверхні АТ-850 гПа 25 січня 2010-2015 р.

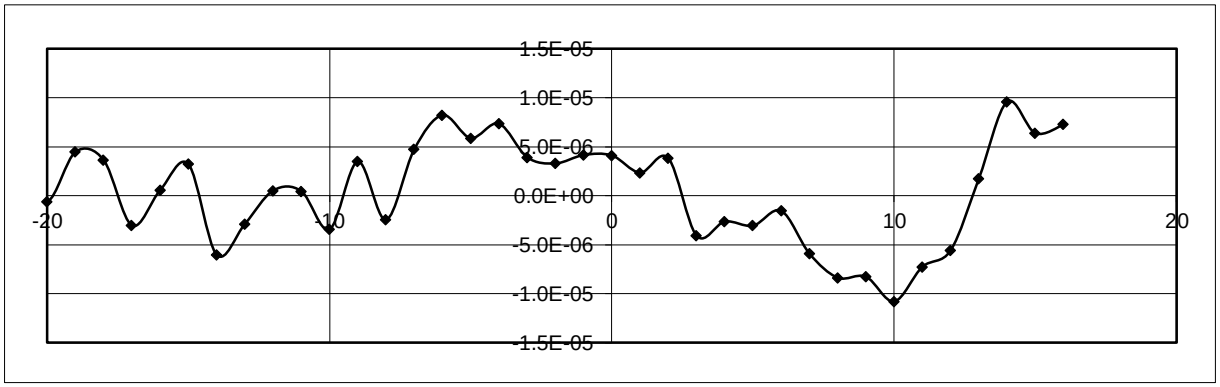


Рис. 3.4 – Графік розподілу осереднених значень відносного вихору швидкості Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на поверхні АТ-850 гПа 5 лютого 2010-2015 р.

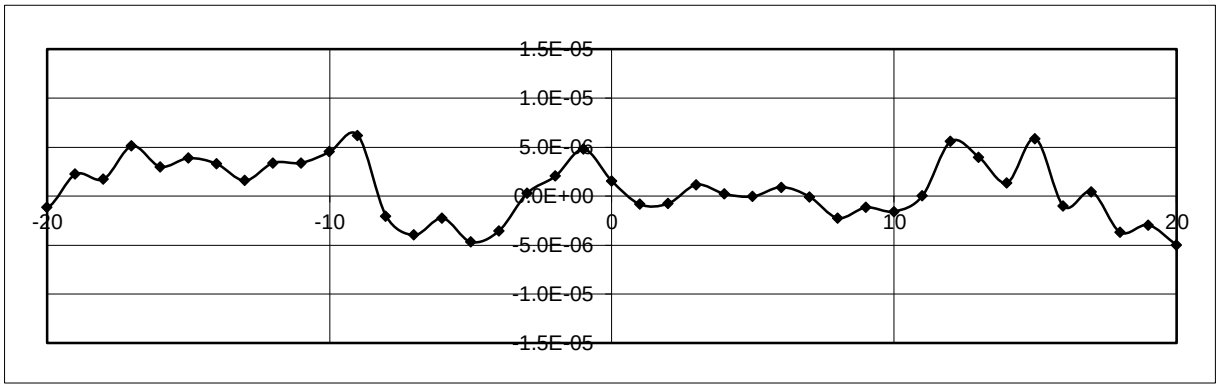


Рис. 3.5 – Графік розподілу осереднених значень відносного вихору швидкості Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на поверхні АТ-850 гПа 15 лютого 2010-2015 р.

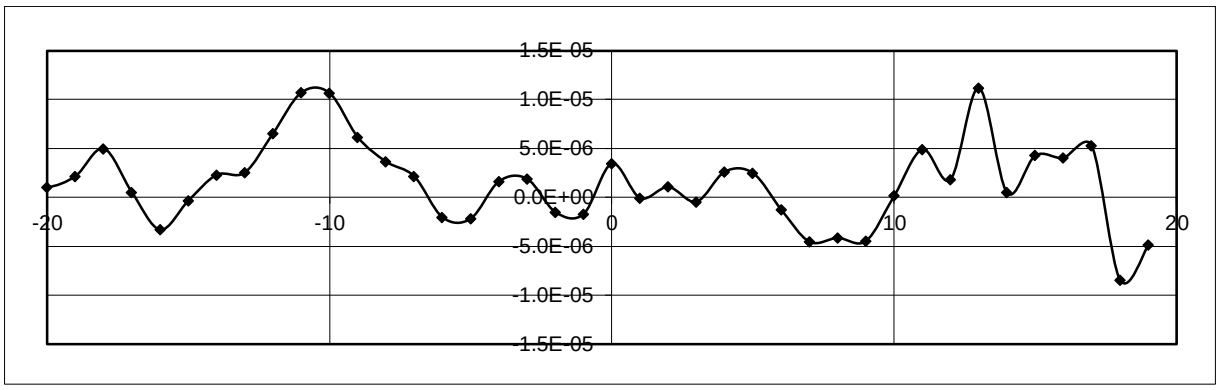


Рис. 3.6 – Графік розподілу осереднених значень відносного вихору швидкості Ω_{850} (вздовж осі ординат, c^{-1}) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на поверхні АТ-850 гПа 25 лютого 2010-2015 р.

Таблиця 3.1, що наведенна нище дозволяє виконати класифікацію отриманих максимумів Ω_{850} у залежності від їх термічних координат $T_{850.}$ Перший максимум знаходиться у діапазоні температур [-3˚С; 2˚С]. За емпіричними даними (приземної карти та карти АТ-850 гПа) він генетично пов’язаний з полярним фронтом на АТ-850 гПа. Другий максимум знаходиться у діапазоні температур [-11˚С; -6˚С] та емпірично пов’язаний з арктичним фронтом. Третій максимум Ω_{850} розташований приблизно у середині діапазону температур [-20˚С; -10˚С]. Він пов’язаний з вторинним холодним фронтом чи з третьою фронтальною системою, яку часто проводять у північних районах Європи на прогностичних картах особливих явищ погоди.

Рідко вздовж цієї зони на приземній карті у гідрометеорологічному центрі Росії проводять третю по рахунку фронтальну систему (це відбувається, коли з бароклинною зоною пов’язана смуга хмарності та зона опадів).

Важливу інформацію про фронтальні зони на рівні 850 гПа можна здобути, якщо отримати значення середнього квадратичного відхилення відносного вихору Ω_{850} для кожного одноградусного інтервала температури T_{850}. Для визначених дат січня та лютого побудовані графіки залежності, які представлені на рис. 3.7–3.12.

Характерною особливістю графіків є наявність двох-трьох основних максимумів середнього квадратичного відхилення відносного вихору. Один з максимумів на всіх графіках знаходиться у діапазоні [-2˚С; +2˚С]. Також стійкий максимум спостерігається приблизно всередині діапазона температур [-20˚С; -10˚С].

Таблиця 3.1 – Максимуми відносного вихору швидкості та їх локалізація

Характеристика максимумів Ω_{850} та їх термічні координати / Дата	Перший максимум		Другий максимум		Третій максимум	
	Ω_{850}, 10^{-5} $с^{-1}$	T_{850}, °C	Ω_{850}, 10^{-5} $с^{-1}$	T_{850}, °C	Ω_{850}, 10^{-5} $с^{-1}$	T_{850}, °C
5 січня	0,3 0,1	-1 2	0,1	-8	0,2 0,7	-17 -13
15 січня	0,1	-3	0,7 0,5	-9 -6	-0,2	-15
25 січня	0,1 0,2 0,2	-3 -1 1	0,5 0,8 0,4	-11 -8 -5	0,1 0,3	-15 -13
5 лютого	0,4 0,4	-1 2	0,4 0,8 0,7	-9 -6 -4	0,3	-15
15 лютого	0,5	-1	0,6	-9	0,5 0,4	-17 -15
25 лютого	0,2 0,3 0,1	-3 0 2	1,1 1,1	-11 -10	0,5	-18

Слід відмітити, що для окремих максимумів Ω_{850} наводяться два або навіть три значення вихору (та відповідно до них два або три значення температури T_{850}). Причиною такого вибіркового підходу до класифікації максимумів Ω_{850} є те, що деякі максимуми являються близько розташованими один до одного відносно ізотерм T_{850}. Тому такі максимуми можуть бути пов’язані з однією фронтальною зоною та є звичайними багатопіковими максимумами. У координатах температури T_{850} відстань між максимумами відносного вихору швидкості Ω_{850} складає 8˚С.

Характерною особливістю графіків є наявність двох-трьох основних максимумів середнього квадратичного відхилення відносного вихору. Один з максимумів на всіх графіках знаходиться у діапазоні [-2˚С; +2˚С]. Також

стійкий максимум спостерігається приблизно всередині діапазона температур [-20˚С; -10˚С]. Між цими максимумами розташовується ще один однопіковий чи двохпіковий максимум, положення якого в полі температури відрізняється мінливістю. Можливо, що наявні максимуми середнього квадратичного відхилення вказують на положення фронтальних зон у полі температури АТ-850 гПа.

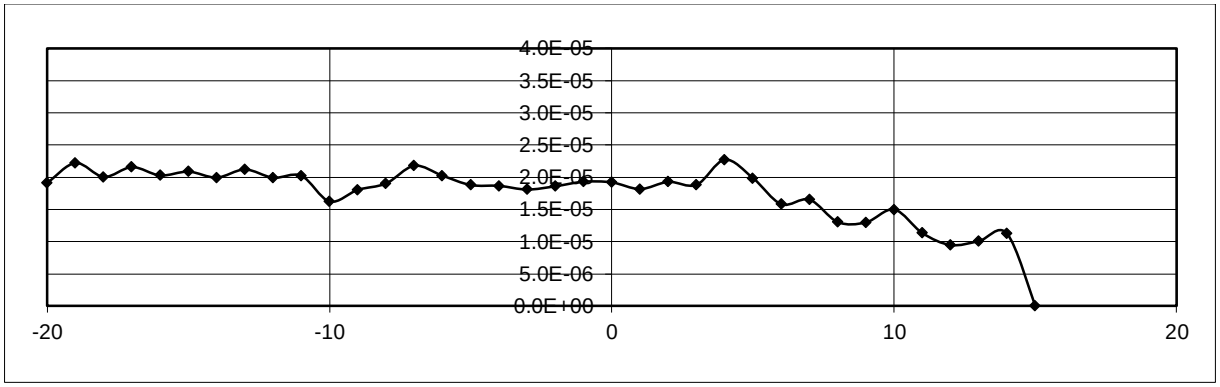


Рис. 3.7 – Графік розподілу середнього квадратичного відхилення відносного вихору Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на рівні АТ-850 гПа 5 січня 2010-2015 р.

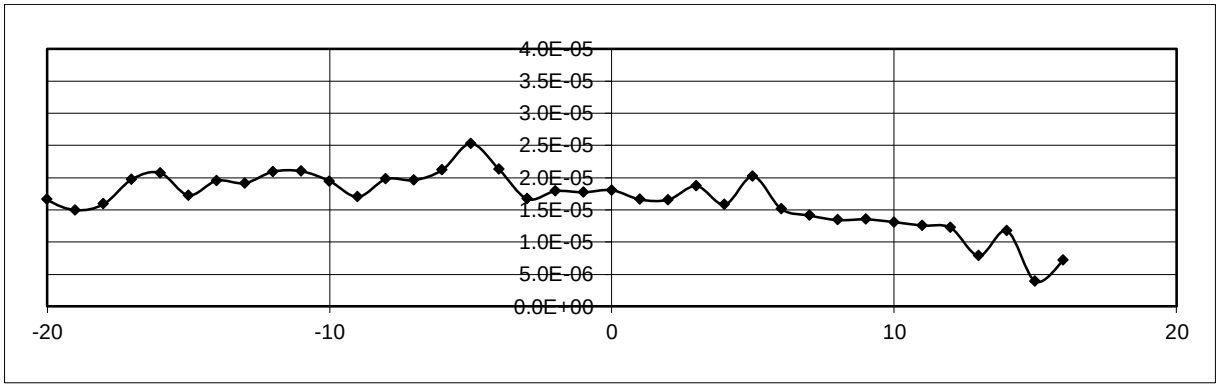


Рис. 3.8 – Графік розподілу середнього квадратичного відхилення відносного вихору Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на рівні АТ-850 гПа 15 січня 2010-2015 р.

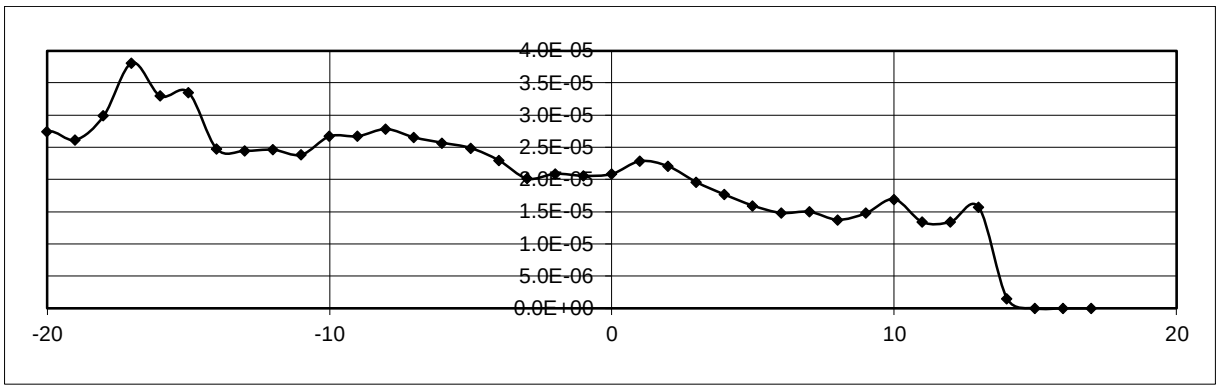


Рис. 3.9 – Графік розподілу середнього квадратичного відхилення відносного вихору Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на рівні АТ-850 гПа 25 січня 2010-2015 р.

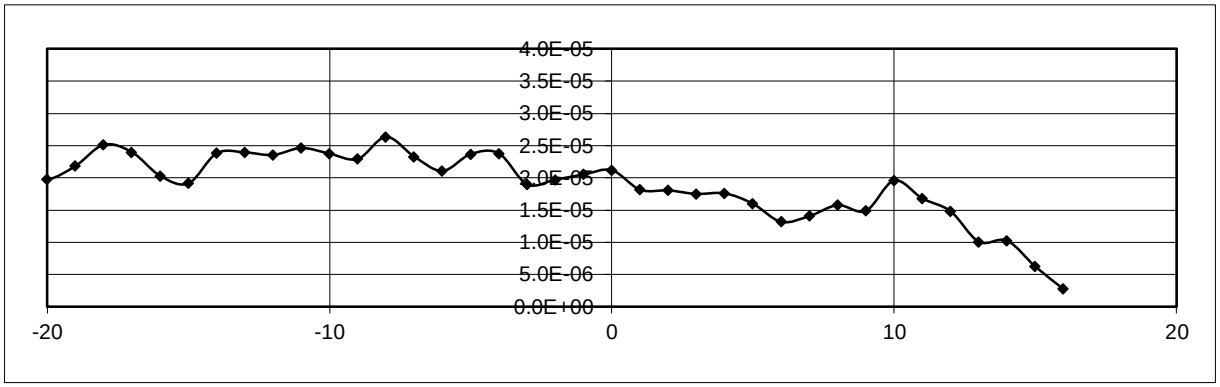


Рис. 3.10 – Графік розподілу середнього квадратичного відхилення відносного вихору Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на рівні АТ-850 гПа 5 лютого 2010-2010 рр.

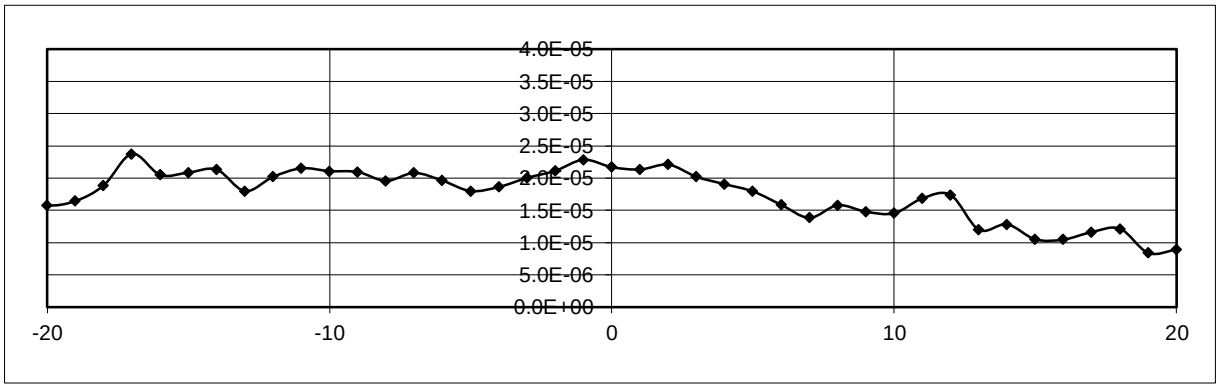


Рис. 3.11 – Графік розподілу середнього квадратичного відхилення відносного вихору Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на рівні АТ-850 гПа 15 лютого 2010-2015 р.

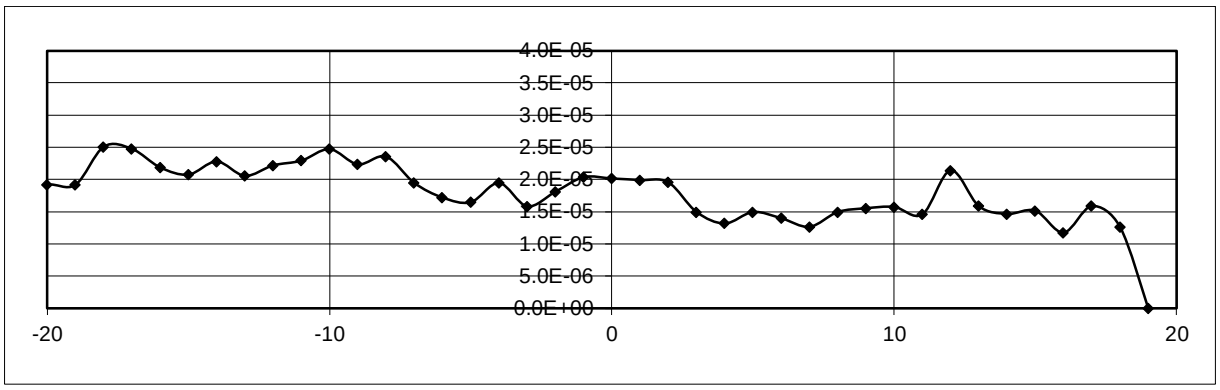


Рис. 3.12 – Графік розподілу середнього квадратичного відхилення відносного вихору Ω_{850} (вздовж осі ординат, $с^{-1}$) відповідно до температури T_{850} (вздовж осі абсцис, ˚С) на рівні АТ-850 гПа 25 лютого 2010-2015 р.

Великий вплив на інтенсивність фронтальних зон у нижній тропосфері над Європою мають сезонні регіональні особливості полів приземного тиску та геопотенціалу на поверхні АТ-850 гПа. В таблиці 3.2 для кожної визначеної дати січня та лютого наведені статистичні характеристики відносного вихору швидкості, які були отримані для всього об’єму вибірки по вихору (4725 значень). 5 та 15 січня середнє значення та медіана є від’ємними, за інші дати ці величини додатні. Це свідчить про те, що в перших двох декадах січня в Європі переважають антициклонічні вихори у нижній тропосфері, у подальшому переважає циклонічна циркуляція. Середнє квадратичне відхилення сягає свого максимуму ($2{,}42 10^{-5}$ $с^{-1}$) 25 січня, мінімум наявний 5 січня ($1{,}91 10^{-5}$ $с^{-1}$).

Таблиця 3.2 — Статистичні характеристики відносного вихору швидкості за період з січня по лютий 2010-2015 р.

Характеристика / Дата	Мінімальне значення Ω_{850}, 10^{-5} $с^{-1}$	Максимальне значення Ω_{850}, 10^{-5} $с^{-1}$	Середнє значення Ω_{850}, 10^{-5} $с^{-1}$	Медіана, 10^{-5} $с^{-1}$	Середнє квадратичне відхилення, 10^{-5} $с^{-1}$
5 січня	-7,14	6,88	-0,001	-0,11	1,91
15 січня	-6,49	7,16	-0,04	-0,12	1,94
25 січня	-9,07	9,56	0,27	0,05	2,42
5 лютого	-7,31	7,23	0,09	0,02	2,16
15 лютого	-5,71	8,09	0,08	0,01	2,00
25 лютого	-6,04	8,49	0,24	0,09	1,98

3.2 Аналіз синоптичних ситуацій січня-лютого 2015 р. з використанням полів температури та вихору швидкості

Для демонстрації комплексного використання полів температури (термічні критерії) та відносного вихору (динамічні критерії) під час фронтологічного аналізу розглянемо шість ситуацій: за 5, 15, 25 січня 2015 р. та 5, 15, 25 лютого 2015 р. Синоптичні карти наведенні у Додатку Б (Рис. Б.1 – Б.18).

5 січня (рис. Б.1-Б.3) характеризується переважанням циклонічної діяльності: у поверхні землі циклонічні центри розташовані над північною частиною Європи (мінімальний тиск склав 1000,0 гПа), північним заходом Росії (1003,5 гПа), південним заходом Європи (1001,7 гПа), сходом Каспійського моря (1006,4 гПа). Гребінь високого тиску орієнтований з півночі Африки на Самару (максимальний тиск складає 1027,3 гПа). Високим баричним утворенням є циклон над північною частиною Європи, інші баричні утворення є низькими. Арктичний та полярний фронти на всій своїй протяжності паралельні один одному. Горизонтальні градієнти температури на АТ-850 в обох фронтальних зонах приблизно однакові (2-4 °С/100 км). Обидва фронти (особливо вершини хвиль) переважно лежать у межах додатних значень завихреності (рис. 3.13), однак є зони $\Omega_{850} > 5 10^{-5}$ $с^{-1}$ на широтах 60-70° пн.ш., що не пов'язані з фронтальними системами, але являють собою центри старих оклюдованих циклонів.

Синоптична ситуація 15 січня (рис. Б.4-Б.7) характеризується переважанням антициклонічної діяльності у нижній тропосфері над Європою. Високий просторий антициклон розташований над Ригою (максимальний тиск 1030,7 гПа), в його відрозі над Самарою знаходиться невисокий антициклон (1029,3 гПа). Південь Європи знаходиться під впливом циклонів над Середземним (мінімальний тиск 1001,5 гПа) та Чорним (1012,1 гПа) морями. З цими циклонами пов'язаний полярний фронт. Арктичний фронт лежить на південній периферії антициклона та відокремлює собою два його центри на заході та сході. На АТ-850 градієнти температури для обох фронтів не перевищують 2 °С/100 км. Поле відносного вихору над Європою (рис. 3.14) має вигляд смуг, витягнутих у широтному напрямку, що згоджується з положенням фронтальних систем. При цьому арктичний фронт гірше

виражений у максимумах відносного вихору, у межі додатних його значень потрапляють в основному лише вершини фронтальних хвиль. Максимум $\Omega_{850} > 510^{-5}$ $с^{-1}$, який відмічається у районі Туніса, скоріше за все не пов'язаний з полярним фронтом, який розташований північніше.

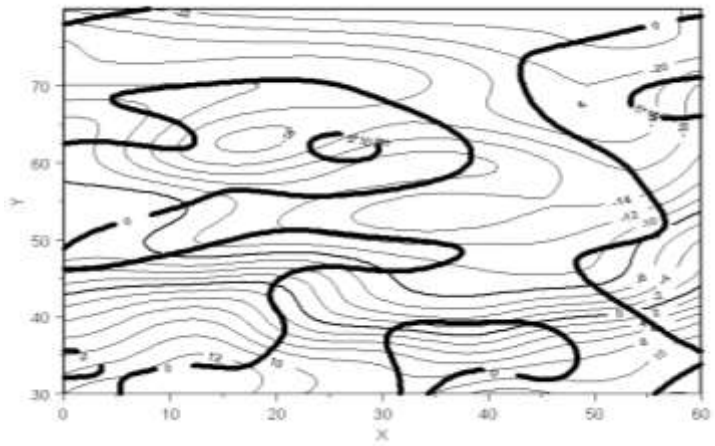


Рис. 3.13 – Поля відносного вихору швидкості Ω_{850}, $с^{-1}$ (товсті лінії) та температури T_{850}, ˚С (тонкі лінії) на рівні АТ-850 гПа за 00 СГЧ 5 січня 2015 р.

25.01.2015 р. у нижній тропосфері над Європою (рис. Б.8-Б.10) спостерігається переважання антициклонічної діятельності (максимальний тиск над Польщею склав 1043,5 гПа), однак у середній та верхній тропосфері прослідковується висотний циклон над Москвою. Над Близьким Сходом у поверхні землі знаходиться циклон (мінімальний тиск 1004,0 гПа). Зі згаданими циклонічними утвореннями пов'язані дві фронтальні системи, витягнуті паралельно одна іншій у широтному напрямку. Термічні градієнти АТ-850 для обох фронтів складають 2-4 °С/100 км (за виключенням тих ділянок арктичного фронту, які розмиваються в антициклонічному баричному полі). Найбільше значення $\Omega_{850} > 510^{-5}$ $с^{-1}$ (рис. 3.15) пов'язане з близькосхідним циклоном та хвилею полярного фронту у його центрі. В основному полярний фронт лежить у межах $\Omega_{850} > 0$, за виключенням розмитих ділянок у гребенях антициклонів. Аналогічно проявляє себе у полі відносного вихору арктичний фронт.

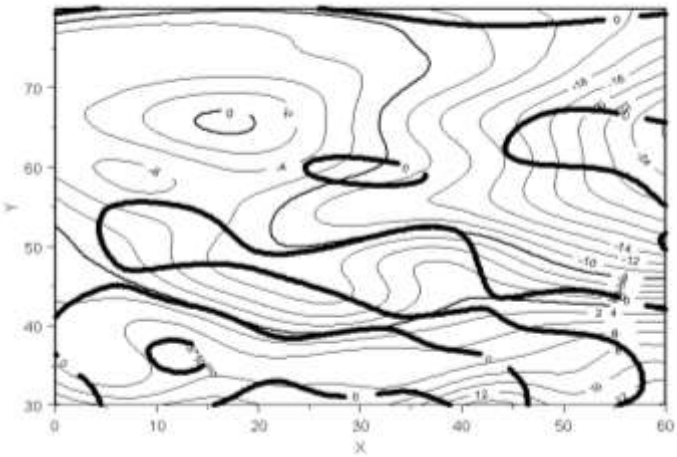


Рис. 3.14 – Поля відносного вихору швидкості Ω_{850}, c^{-1} (товсті лінії) та температури T_{850}, ˚С (тонкі лінії) на рівні АТ-850 гПа за 00 СГЧ 15 січня 2015 р.

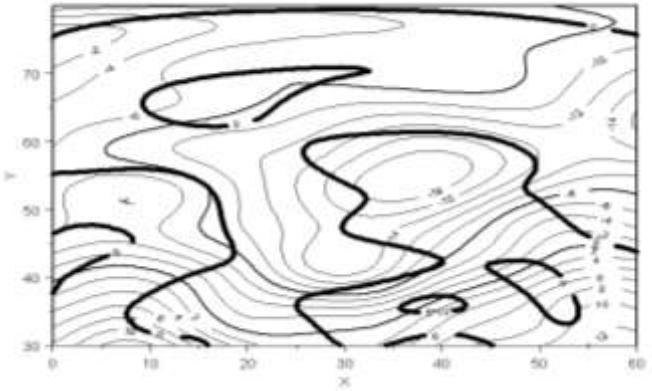


Рис. 3.15 – Поля відносного вихору швидкості Ω_{850}, c^{-1} (товсті лінії) та температури T_{850}, ˚С (тонкі лінії) на рівні АТ-850 гПа за 00 СГЧ 25 січня 2015 р.

5 лютого 2015 р. поле приземного тиску над Європою (рис. Б.10-Б.12) має два великі екстремуми: великий циклон з центром над західним узбережжям Ірландії (мінімальний тиск 979,6 гПа) та потужний антициклон над Приволзькою височиною (максимальний тиск 1052,5 гПа). Ще одна зона зниженого тиску розташовується на південь від Каспійського моря. Всі згадані вище баричні утворення є високими (простежуються до ізобаричної поверхні АТ-500 гПа включно). Атмосферні фронти орієнтовані з північного заходу на південний схід паралельно одне одному, відстань між ними складає 1000-1500

км. На найбільш активних ділянках фронтів термічні градієнти на АТ-850 гПа не перевищують 4 °С/100 км, у баричних гребенях градієнти температури знижуються до 1 °С/100 км. Арктичному фронту на більшості його ділянок відповідають від'ємні значення відносного вихору (рис. 3.16), за виключенням вершин хвиль; полярний фронт більш виявляється у зонах $\Omega_{850} > 0$.

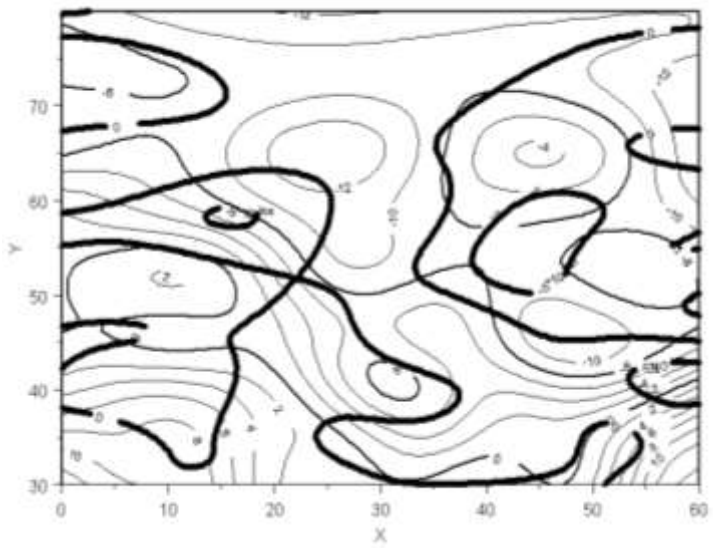


Рис. 3.16 – Поля відносного вихору швидкості Ω_{850}, $с^{-1}$ (товсті лінії) та температури $Т_{850}$, ˚С (тонкі лінії) на рівні АТ-850 гПа за 00 СГЧ 5 лютого 2015 р.

15 лютого 2015 р. поле приземного тиску над Європою (рис. Б.13-Б.15) має переважно циклонічний характер: центри циклонів знаходяться над Афінами (998,2 гПа), Норвезьким морем (999,5 гПа), Мурманськом (близько 1000 гПа). Всі циклони є високими баричними утвореннями. Арктичний фронт розташований вздовж 60˚ пн.ш. та характеризується порівняно невеликими градієнтами температури на ізобаричній поверхні 850 гПа (не більше 1-2 °С/100 км). Полярний фронт простягається по півдню Європи, на АТ-850 йому відповідає широка бароклинна зона з термічними градієнтами, що складають 2-3 °С/100 км. Обидва фронти знаходяться переважно у зонах додатних значень Ω_{850} (рис. 3.17). Найбільше значення $\Omega_{850} > 510^{-5}$ $с^{-1}$ пов'язане з висотним циклонічним центром над Мурманськом.

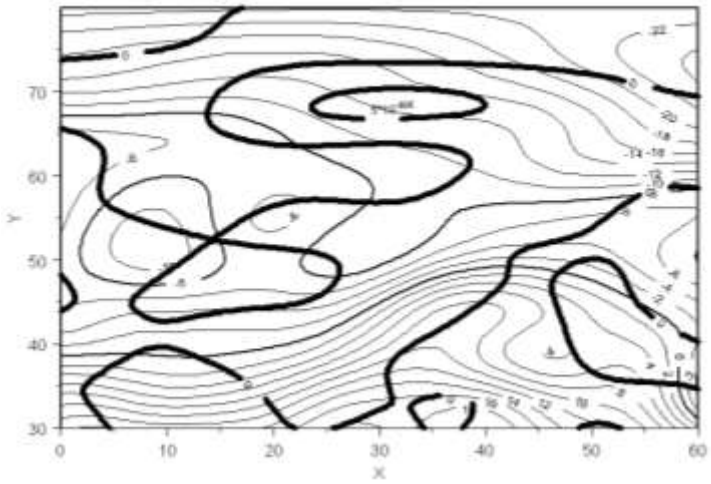


Рис. 3.17 – Поля відносного вихору швидкості Ω_{850}, $с^{-1}$ (товсті лінії) та температури T_{850}, ˚С (тонкі лінії) на рівні АТ-850 гПа за 00 СГЧ 15 лютого 2015 р.

25.02.2015 р. приземне баричне поле над Європою (рис. Б.16-Б.18) характеризується переважанням циклонічної діяльності: центри циклонів знаходяться над Лондоном (989,0 гПа), Мурманськом (995,1 гПа), Актюбінськом (1007,3 гПа) та Софією (1001,9 гПа). Арктичний фронт пов’язаний з першими трьома циклонами. Полярний фронт з’єднує лондонський та софійський циклонічні центри. Найбільші градієнти температури T_{850} спостерігаються в зоні арктичного фронту та сягають на деяких його ділянках 6 °С/100 км; в зоні полярного фронту термічні градієнти не перевищують 2 °С/100 км. У полі відносного вихору (рис. 3.18) краще виражений полярний фронт (більшість його ділянок знаходиться у зоні додатних значень Ω_{850}), на арктичному фронті лише вершини хвиль потрапляють в межі зони $\Omega_{850} > 0$. Як і в інших випадках (у січні та лютому), найбільші значення вихору $\Omega_{850} > 510^{-5}$ $с^{-1}$ безпосередньо не пов’язані саме з основними фронтальними зонами, ці максимуми Ω_{850} ідентифікують центри висотних циклонів (над Мурманськом та Актюбінськом).

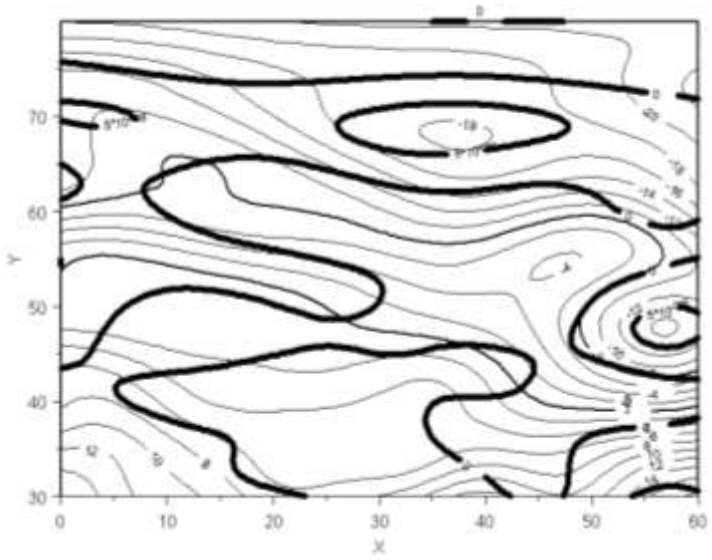


Рис. 3.18 – Поля відносного вихору швидкості Ω_{850}, c^{-1} (товсті лінії) та температури T_{850}, ˚С (тонкі лінії) на рівні АТ-850 гПа за 00 СГЧ 25 лютого 2015 р.

Комбінований аналіз побудованих полів температури та вихору швидкості за окремі випадки січня-лютого 2015 р. підтверджує необхідність поєднувати термічні (температура та горизонтальний градієнт температури) та динамічні критерії (наприклад, відносний вихор швидкості) під час фронтологічного аналізу. Дослідження виявило, що не всі фронти характеризуються підвищеними горизонтальними градієнтами температури, а поля відносного вихору також мають досить плямистий вигляд (додатні значення Ω_{850} розташовуються переважно поблизу вершин фронтальних хвиль).

ВИСНОВКИ

Вітчизняна школа метеорології рекомендує проведення атмосферних фронтів переважно з використанням термічних критеріїв, тобто по полю температур. Поле вітру при цьому враховується тільки якісно.

Зарубіжні гідрометеорологічні служби, використовуючи останні досягнення фізико-математичного моделювання атмосферних процесів, у своїх рекомендаціях велику увагу приділяють використанню динамічних критеріїв (диференційні характеристики поля вітру, у число яких входить відносний вихор швидкості) у додаток до термічних критеріїв.

У даній роботі здійснювалася комплексна перевірка термічних та динамічних критеріїв фронтологічного аналізу за допомогою статистичних методів обробки полів відносного вихору швидкості та температури на ізобаричній поверхні АТ-850 гПа.

Шляхом осереднення відносного вихору Ω_{850} по градаціям T_{850} була виявлена наявність взаємозв'язків між областями підвищених горизонтальних градієнтів температури та максимальними значеннями відносного вихору швидкості.

Показано, що термічні та динамічні критерії взаємно доповнюють один одного під час проведення фронтологічного аналізу. Була виявлена відповідність між піковими додатними значеннями відносного вихору та взаємними положеннями основних фронтальних розділів (арктичним та полярним фронтом) на рівні АТ – 850 гПа. Для середин декад перших двох місяців календарного року були знайдені критеріальні значення температури на рівні АТ – 850 гПа, які вказують на наявність фронтальних розділів.

Отримані результати свідчать про надійність динамічних критеріїв, що дозволяє їх використання в оперативній практиці поряд з термічними критеріями.

Виявлені критеріальні значення температури T_{850}, які відповідають фронтальним розділам на рівні 850 гПа, можуть бути важливим індикатором атмосферних фронтів для дат, які розглядалися (5, 15, 25 січня; 5, 15, 25 лютого).

Використання даної залежності під час фронтологічного аналізу, може скоротити часові затрати на проведення атмосферних фронтів та зменшити кількість помилок.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Антоненкова И.Л., Сонечкин Д.М. Объективный анализ фронтов в нижней тропосфере // Метеорология и гидрология. – 1972. – №6. – С. 32-41.

2. Аргучинцев В.К. Динамика атмосферы. – Иркутск, 2006. – 130 с.

3. Бачурина А. и Туркетти З. Атмосферные фронты — Л., ГИМНЗ — 1952. — 127 с.

4. Бугаев В.А., Песков Б.Е. О состоянии и перспективах оперативного прогнозирования особо опасных гидрометеорологических явлений // Метеорология и гидрология. – 1972. – №6. – С. 106-115.

5. Васильев А.А., Вильфанд Р.М. Прогноз погоды. – М., 2008. – 60 с.

6. Динамика погоды: Пер. с англ. / Под ред. С. Манабе. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 420 с.

7. Заморский А.Д. Атмосферные явления. — Москва, Гидрометеоиздат, 1954. — 93 с

8. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 711 с.

9. Ивус Г.П., Кивганов А.Ф., Тимофеев В.Е. Струйные течения нижних уровней атмосферы: Учеб. пособие. – К.: УМК ВО при Минвузе УССР, 1991. – 49 с.

10. Калашник М.В. Образование фронтальных волн при геострофическом приспособлении в непрерывно стратифицированной жидкости // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 34. – №6. – С. 785-792.

11. Калашник М.В. Геострофическое приспособление и фронтогенез в непрерывно стратифицированной жидкости // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 36. – №3. – С. 396-408.

12. Кислов А.В. Статистика и география тропического циклогенеза Восточного полушария // Метеорология и гидрология. – 2004. – №9. – С. 5-13.

13. Кислов А.В. Климатология завихрённости и циклогенез в атмосфере тропиков Северного полушария // Метеорология и гидрология. – 2004. – №12. – С. 41-46.

14. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования (издание 1992 г.). Том I (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). Глобальные аспекты. Дополнение №10 (октябрь 2005 г.). – ВМО – №485. – Секретариат Всемирной Метеорологической Организации – Женева – Швейцария, 2005. – 173 с.

15. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть I. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 703 с.

16. Шакина Н.П. О мезомасштабной структуре фронтов и циклонов средних широт // Метеорология и гидрология. – 1978. – №3. – С. 109-116.

17. Шакина Н.П. Неустойчивость в атмосфере // Метеорология и гидрология. – 1979. – №6. – С. 106-112.

18. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 263 с.

19. Шакина Н.П., Калугина Г.Ю., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Субъективный и объективный анализы атмосферных фронтов. I. Объективные характеристики фронтов, проведенных синоптиками // Метеорология и гидрология. – 1998. – №7. – С. 19-30.

20. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // Метеорология и гидрология. – 2000. – №7. – С. 5-16.

21. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Беркович Л.В., Ткачева Ю.В. Диагностические исследования и моделирование процессов циклогенеза, фронтогенеза и погодных условий на различных стадиях развития циклонов // Труды гидрометцентра России. – 2000. – Вып 335. – С. 3-25.

22. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Калугина Г.Ю. Субъективный и объективный анализы атмосферных фронтов. II. Объективное выделение зон фронтов // Метеорология и гидрология. – 1998. – №8. – С. 5-15.

23. Элиассен А. Об образовании фронтов в атмосфере // Атмосфера и океан в движении. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 157-172.

24. Eliassen A. On the vertical circulation in frontal zones // Geophys. Publ. – 1962. – V. 24. – №4. – P. 147-160.

25. Hoskins B.J. Atmospheric frontogenesis models: some solutions // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. – 1971. – V. 97. – №412. – P. 139-153.

26. Hoskins B.J., Bretherton F.P. Atmospheric frontogenesis models: Mathematical formulation and solutions // J. Atmos. Sci. – 1972. – V. 29. – №1. – P. 11-37.

27. Manual on the global data-processing and forecasting system (1992 edition). Vol. I (Annex IV to the WMO Technical Regulations). Global aspects. Supplement No. 11 (Nov. 2007). – WMO – No. 485. – Secretariat of the World Meteorological Organization – Geneva – Switzerland, 2007. – P. 153.

28. Meteorology at the millennium / Edited by Pearce R.P. – International geophysics series, 2002. – Vol.83. – P. 330.

29. Wakimoto R.M., Bosart B.L. Airborne radar observations of a cold front during FASTEX // Monthly weather review. – 2000. – Vol. 128. – P. 2447-2468.

30. Wakimoto R.M., Bosart B.L. Airborne radar observations of a warm front during FASTEX // Monthly weather review. – 2001. – Vol. 129. – P. 254-274.

31. Wakimoto R.M., Cai H. Airborne observations of a front near a col during FASTEX // Monthly weather review. – 2002. – Vol. 130. – P. 1898-1912.

32. Wakimoto R.M., Murphey H.V. Airborne doppler radar and sounding analysis of an oceanic cold front // Monthly weather review. – 2008. – Vol. 136. – P. 1475-1491.

ДОДАТКИ

Додаток А

ДОВІДКА
кафедри військової підготовки
до магістерської роботи
курсанта МВМ-19 Руслана Крутенка
на тему:
«Детерміністичне визначення циркуляційно обумовлених фронтальних ділянок на ізобаричних поверхнях»

1. Доповідь на науковій конференції молодих вчених 29 травня 2020 р. за темою: «Детерміністичне визначення циркуляційно обумовлених фронтальних ділянок на ізобаричних поверхнях».

2. Доповідь на Всеукраїнській конференції молодих вчених «Детерміністичне визначення циркуляційно обумовлених фронтальних ділянок на ізобаричних поверхнях» та публікація матеріалів доповіді за результатами інтернет-конференції у Збірнику матеріалів Всеукраїнської конференції молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії» (31 жовтня 2020 р., Переяслав, Україна).

Керівник магістерської роботи
Працівник ЗСУ Олександр ЄШАНУ

Додаток Б

Синоптичні карти за січень-лютий 2015 р.

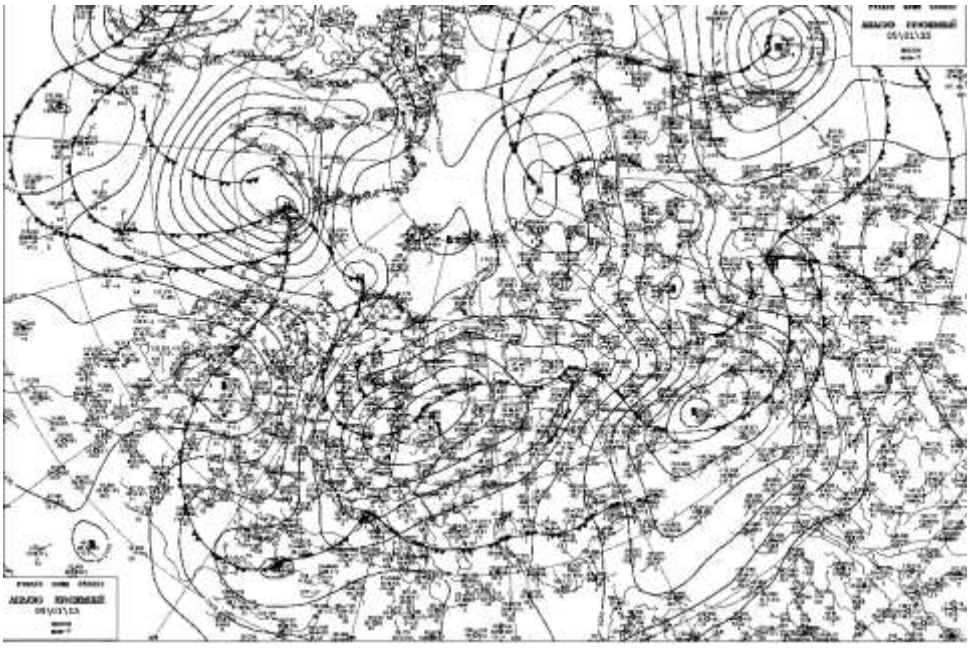


Рис. Б.1 – Аналіз приземний за 05.01.2015 р.

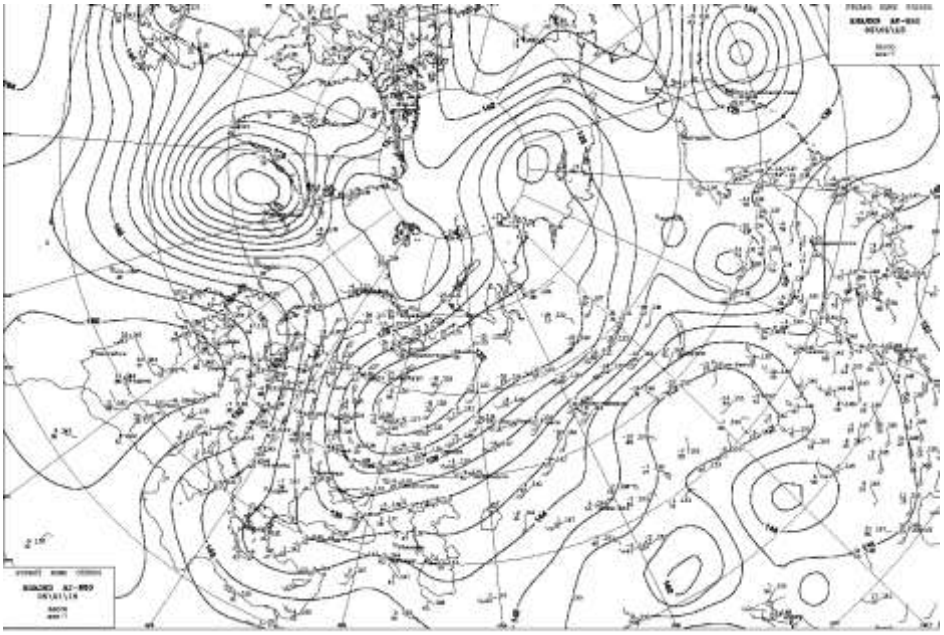


Рис. Б.2 – Карта АТ-850 за 05.01.2015 р.

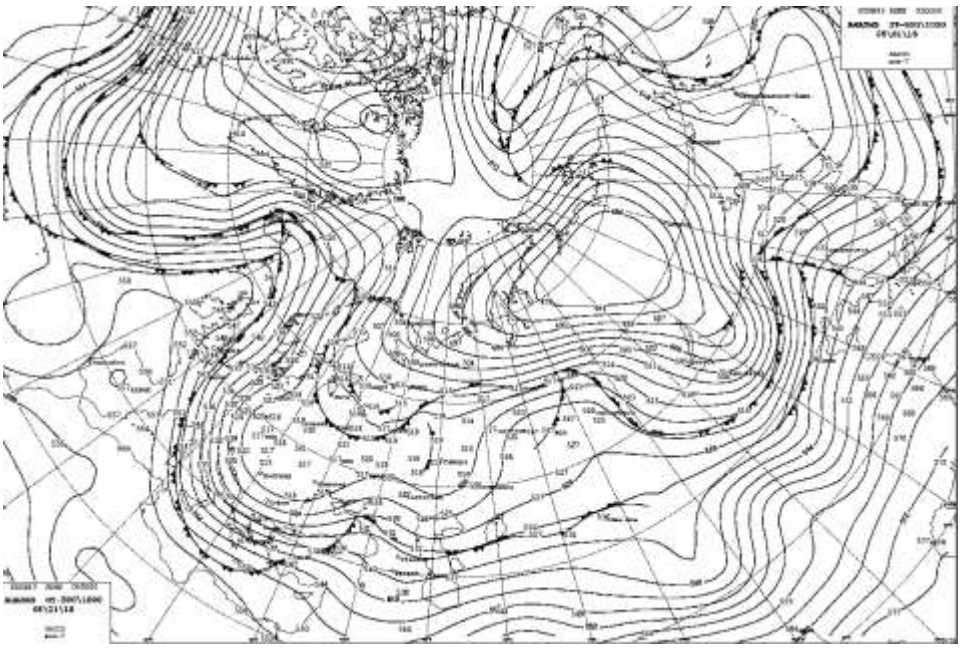


Рис Б.3 – Карта відносної топографії 500/1000 за 05.01.2015 р.

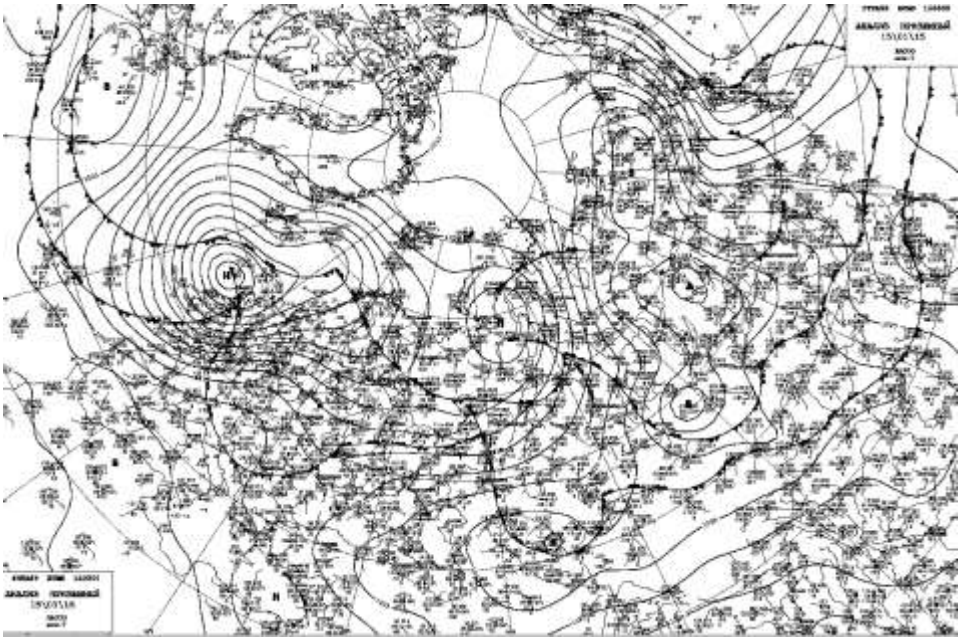


Рис. Б.4 – Аналіз приземний за 15.01.2015 р.

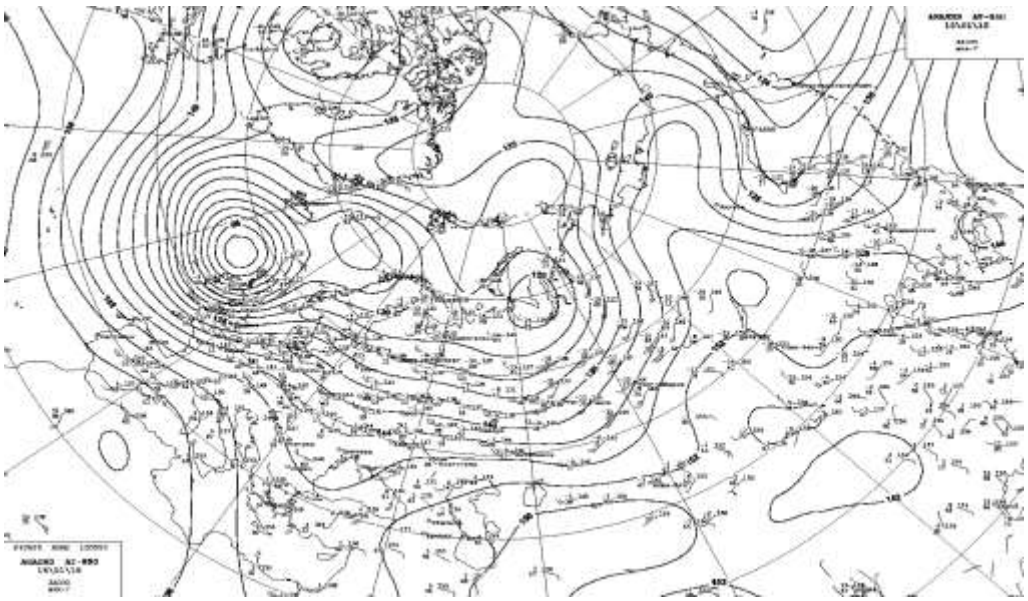


Рис. Б.5 – Карта АТ-850 за 15.01.2015 р.

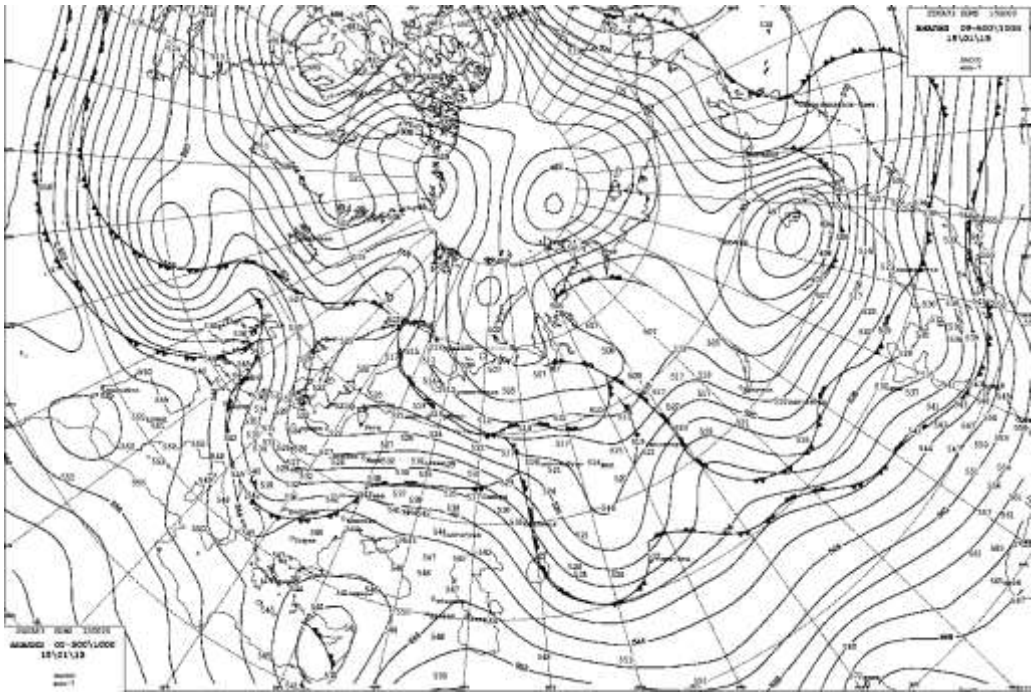


Рис. Б.6 – Карта відносної топографії 500/1000 за 15.01.2015 р.

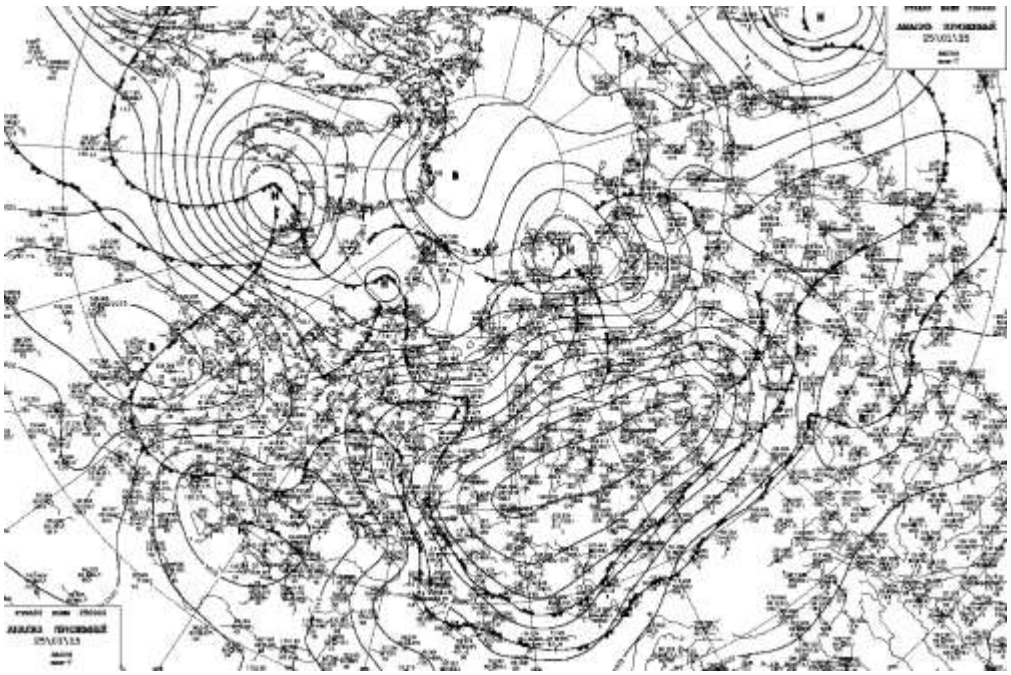


Рис. Б.7 – Аналіз приземний за 25.01.2015 р.

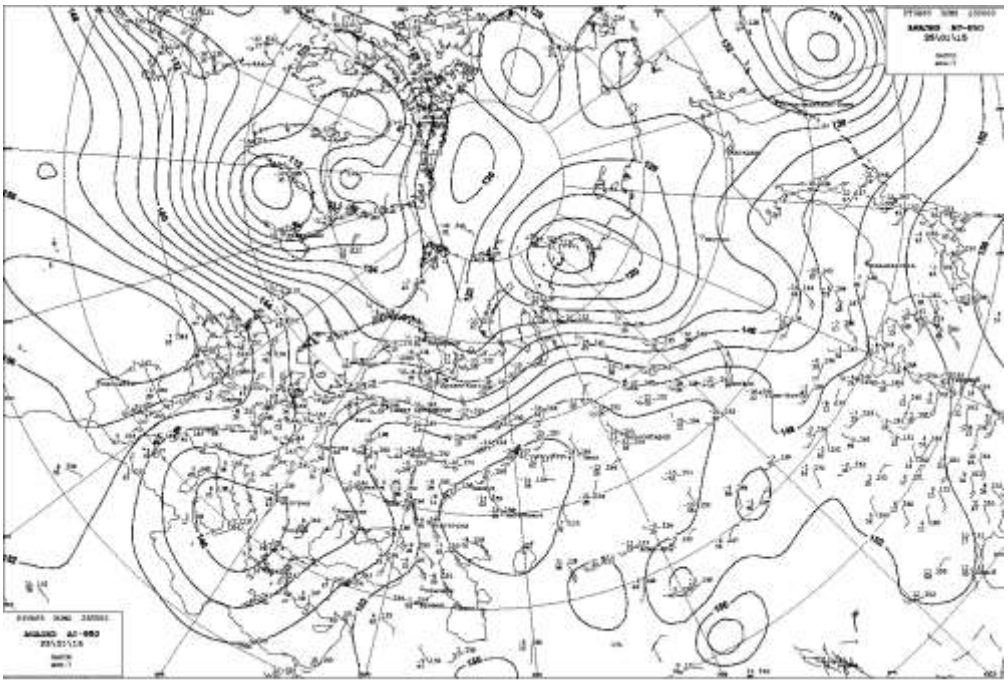


Рис. Б.8 – Карта АТ-850 за 25.01.2015 р.

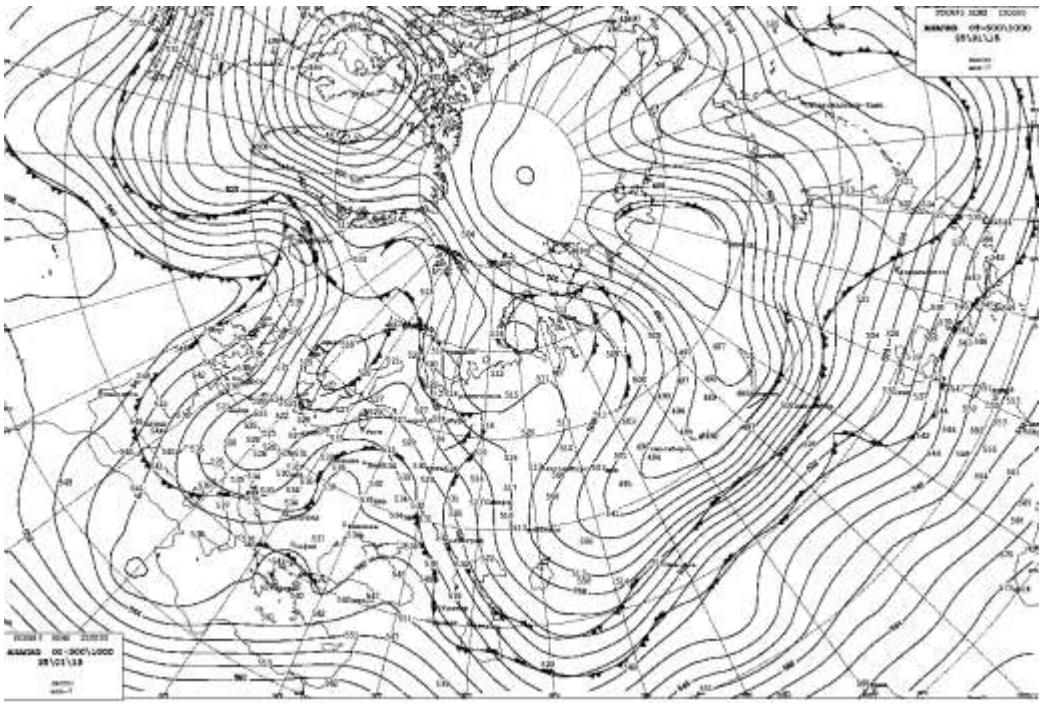


Рис. Б.9 – Карта відносної топографії 500/1000 за 25.01.2015 р.

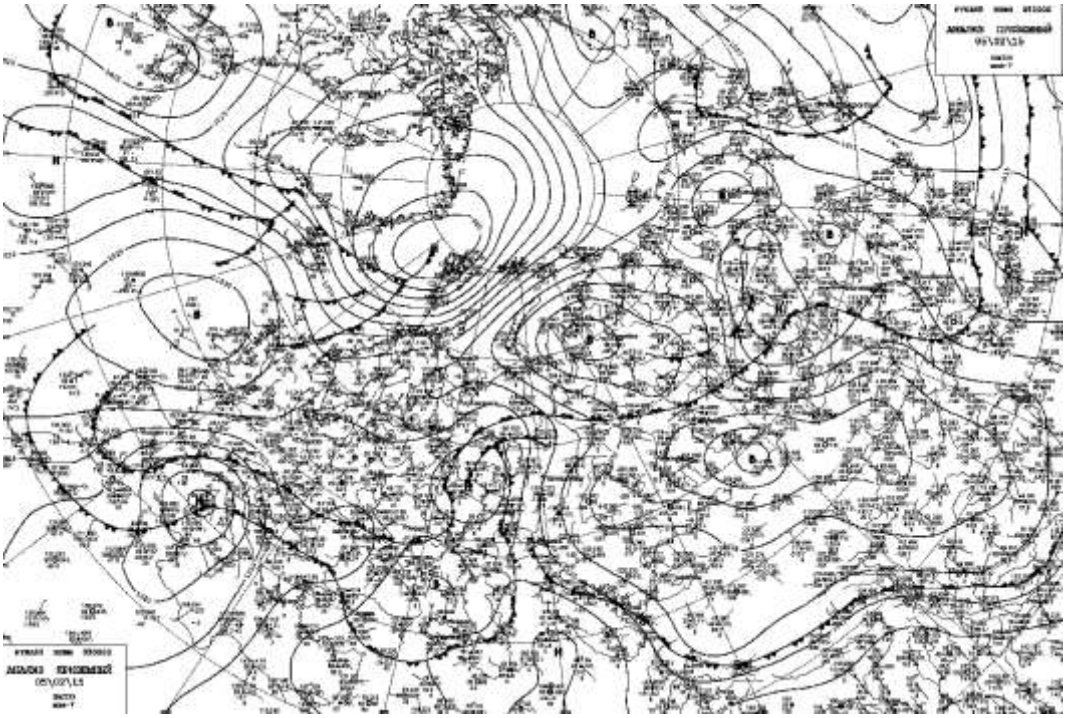


Рис. Б.10 – Аналіз приземний за 05.02.2015 р.

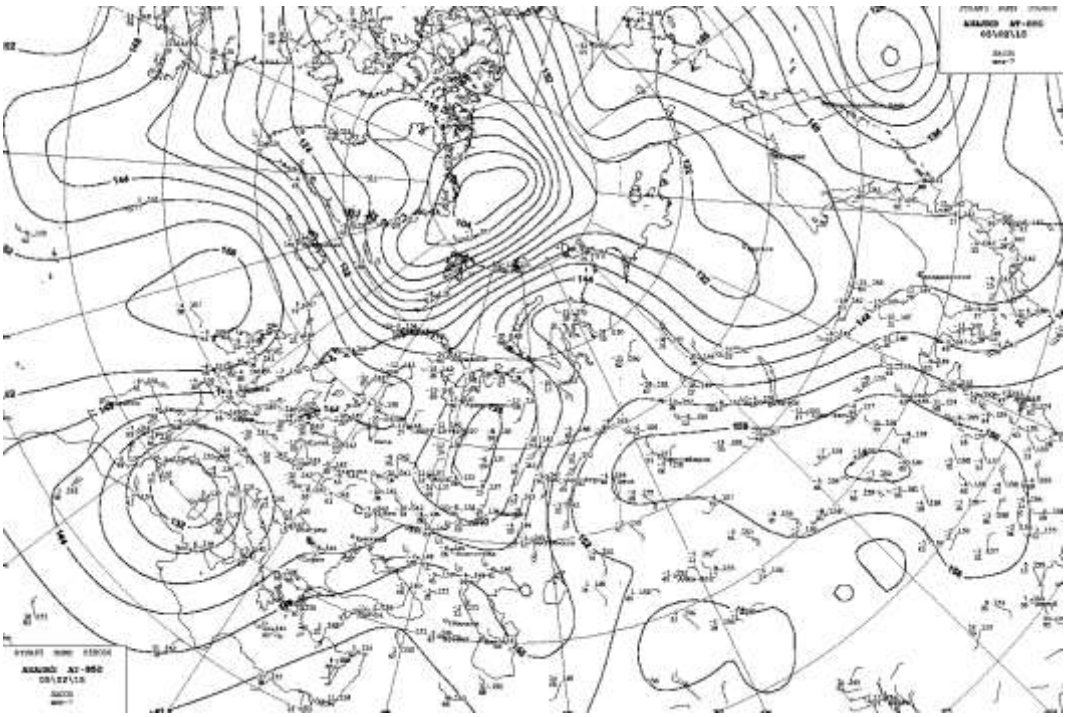


Рис. Б.11 – Карта АТ-850 за 05.01.2015 р.

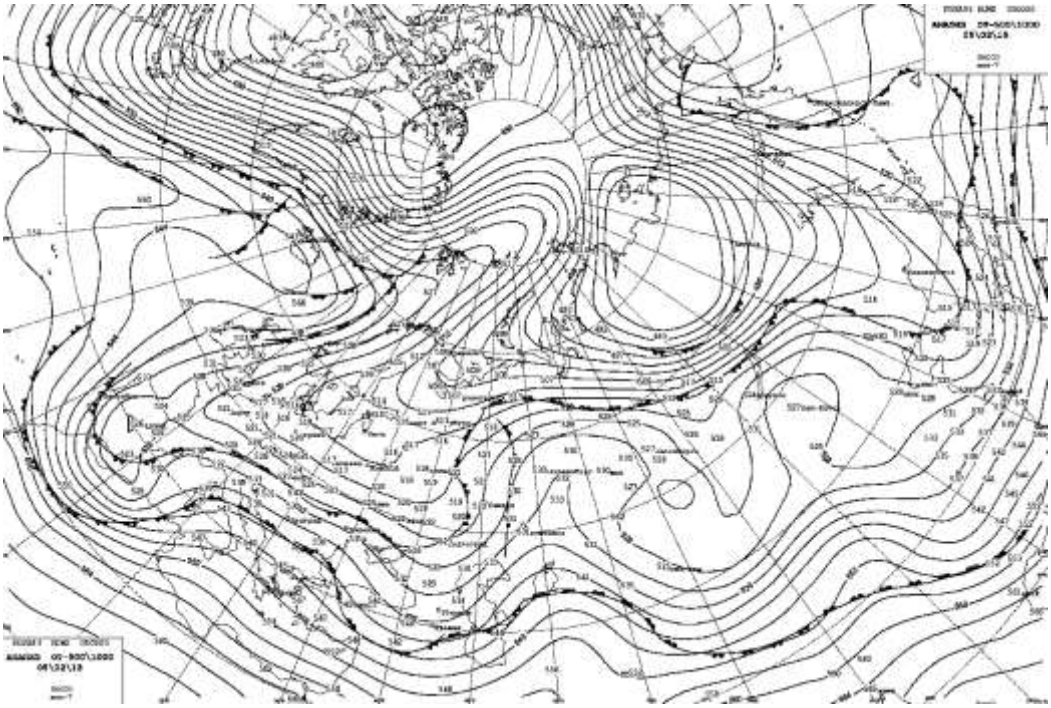


Рис. Б.12 – Карта відносної топографії 500/1000 за 05.02.2015 р.

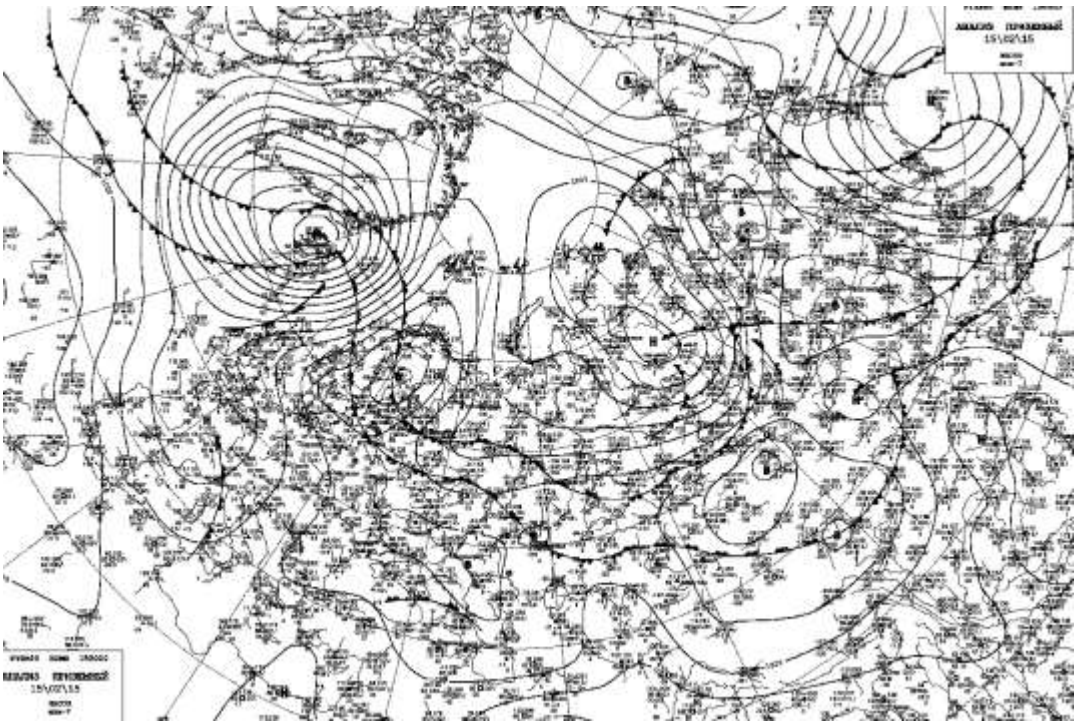


Рис. Б.13 – Аналіз приземний за 15.02.2015 р.

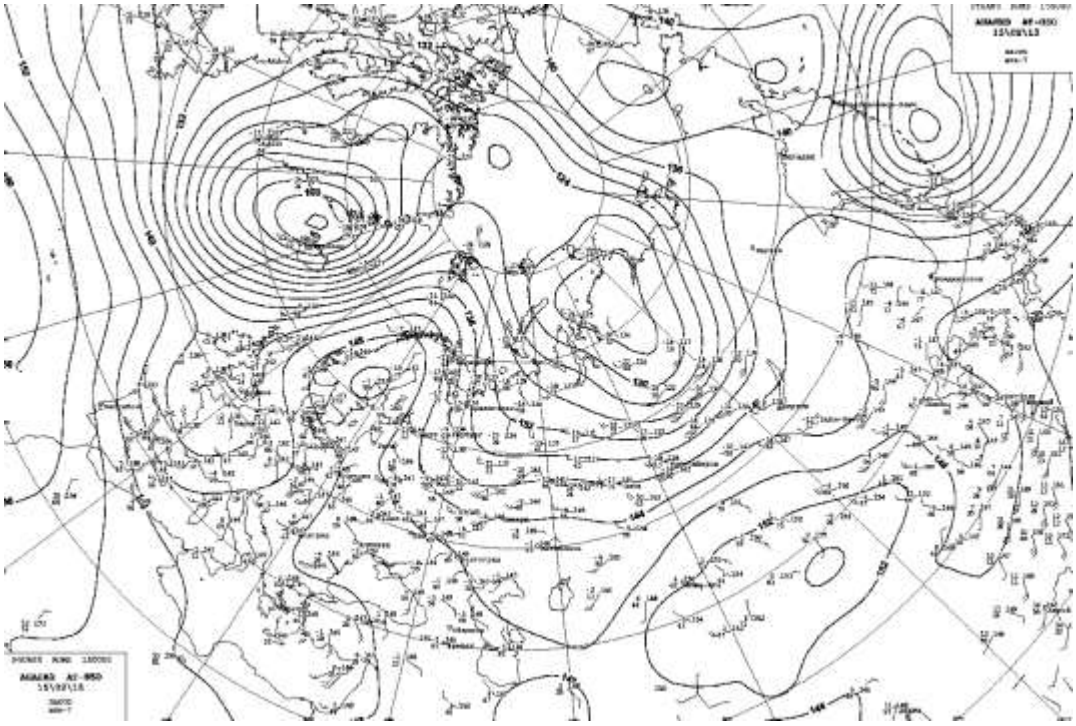


Рис. Б.14 – Карта АТ-850 за 15.02.2015 р.

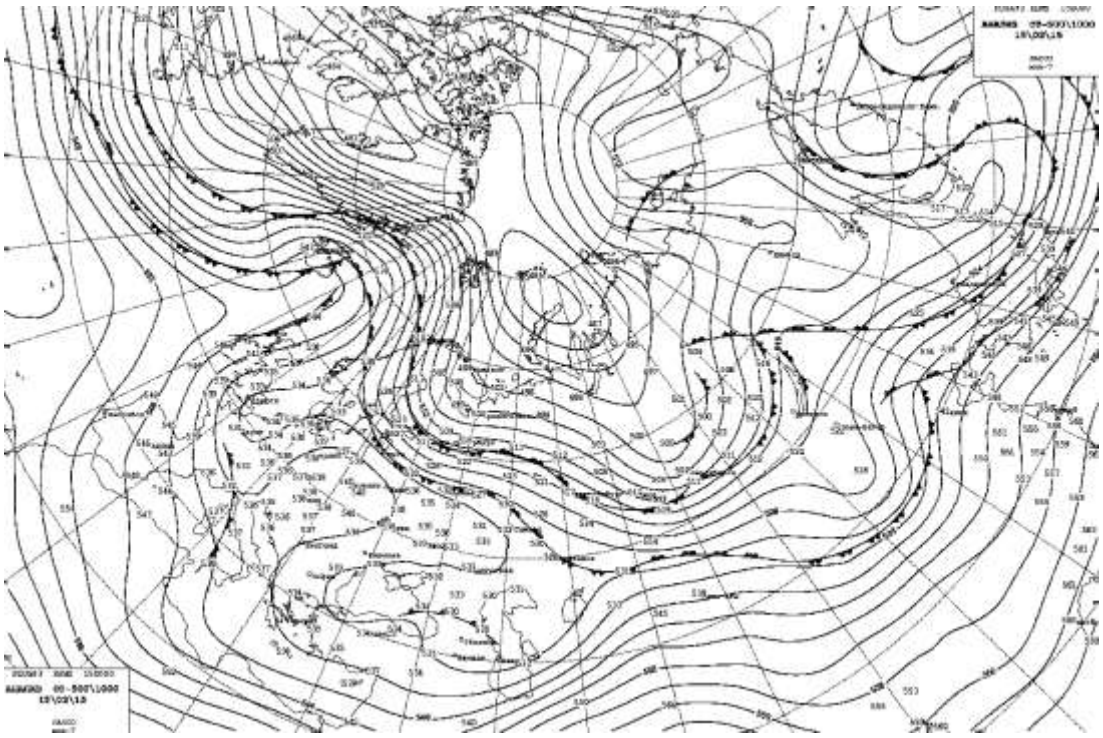


Рис. Б.15 – Карта відносної топографії 500/1000 за 15.02.2015 р.

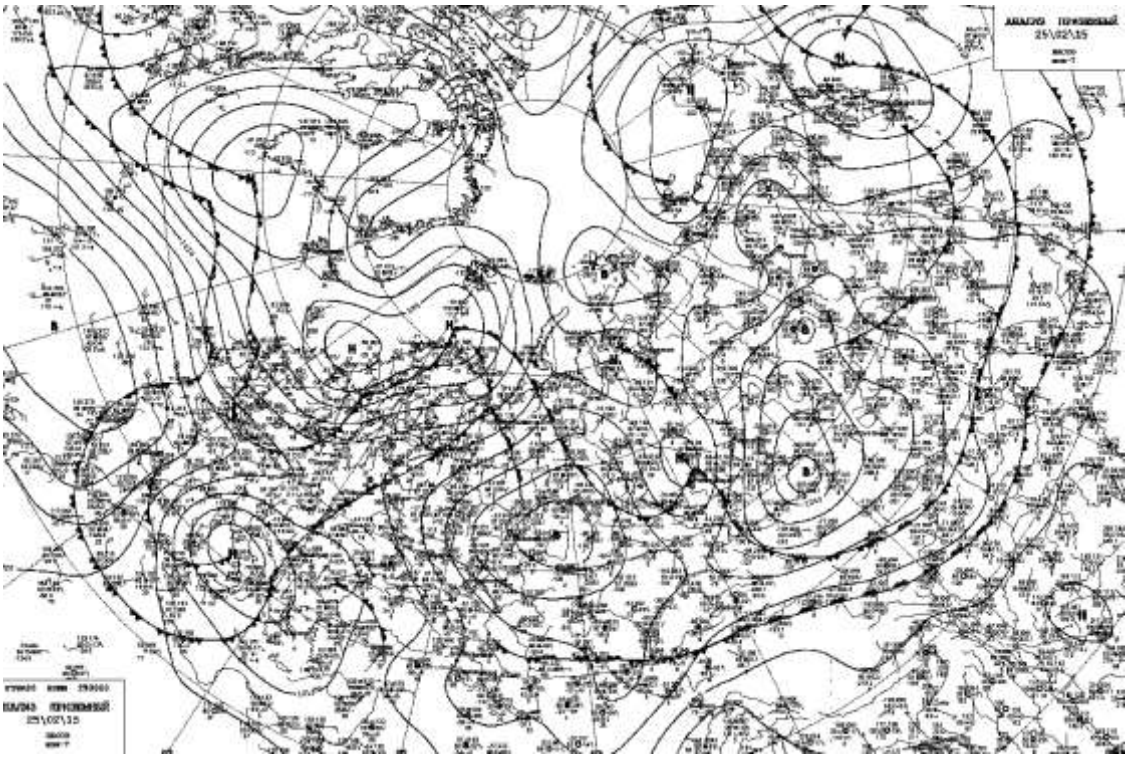


Рис. Б.16 – Аналіз приземний за 25.02.2015 р.

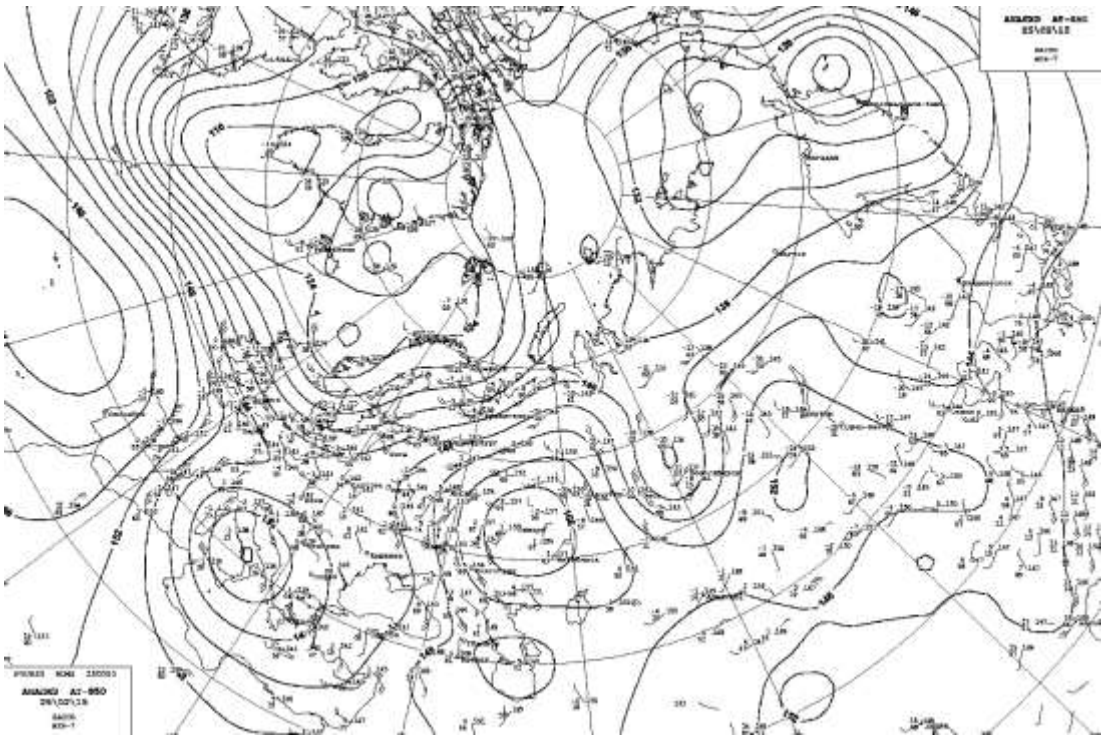


Рис. Б.17 – Карта АТ-850 за 25.02.2015

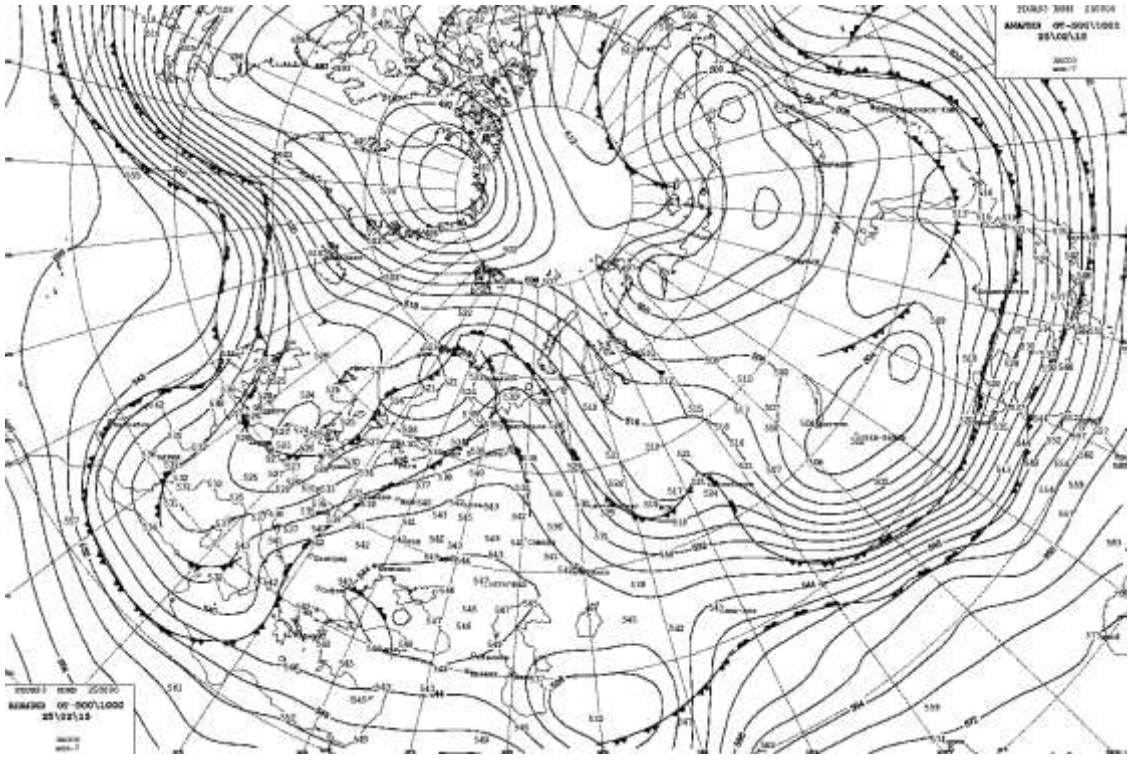


Рис. Б.18 – Карта відносної топографії 500/1000 за 25.02.2015 р.