

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет гідрометеорологічний інститут  
Кафедра метеорології та кліматології

## Магістерська кваліфікаційна робота

на тему: Особливості циркуляційних атмосферних процесів в регіоні  
Антарктичного півострова

Виконала студентка 2 курсу групи МЗК-19  
спеціальності 103 - “Науки по Землю”  
Куляс Катерина Андріївна

Керівник к.геогр.н., доцент  
Недострелова Лариса Василівна

Рецензент к.геогр.н., доцент  
Барсукова Олена Анатоліївна

Одеса 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Гідрометеорологічний інститут  
Кафедра метеорології та кліматології  
Рівень вищої освіти магістр  
Спеціальність 103 “Науки про Землю”  
(шифр і назва)  
Освітньо-професійна програма Кліматологія

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

Прокоф'єв О.М.

“ 26 ” жовтня 2020 року

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

Куляс Катерині Андріївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Особливості циркуляційних атмосферних процесів в регіоні Антарктичного півострова»

керівник роботи Недострелова Лариса Василівна, к. геогр. н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 16 жовтня 2020 р. № 124-С

2. Строк подання магістром роботи 7 грудня 2020р.

3. Вихідні дані до роботи

Середньомісячні значення атмосферного тиску на рівні моря за період 2000-2018 рр. західної частини Південної полярної області (50°- 80° півд.ш.; 110°-10° зах.д.) проекту ERA-Intherim.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Дослідити особливості циркуляційних процесів у регіоні Антарктичного півострову. Проаналізувати поля середніх та середньоквадратичних відхилів атмосферного тиску на рівні моря. Виділити головні компоненти

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

Поля середніх значень та середньоквадратичних відхилів атмосферного тиску. Часові ряди головних компонент атмосферного тиску на рівні моря

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 26 жовтня 2020р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
<b>1</b>	Вивчення літературних джерел за темою магістерської роботи	26.10-30.10. 2020р.	100	відмінно
<b>2</b>	Підготовка даних ре-аналізу спостережень до обробки	31.10-05.11. 2020р.	100	відмінно
<b>3</b>	Побудова та аналіз полів середніх значень атмосферного тиску	06.11-10.11. 2020р.	100	відмінно
<b>4</b>	Побудова та аналіз полів середніх квадратичних відхилень атмосферного тиску	11.11-14.11. 2020р.	100	відмінно
<b>5</b>	Отримані та проаналізовані власні значення і власні вектори матриці кореляції для 11-ти (крім грудня) місяців року	15.11-16.11. 2020р	100	відмінно
<b>6</b>	Рубіжна атестація	17.11.2020р.	100	відмінно
<b>7</b>	Аналіз головних компонент атмосферного тиску у регіоні Антарктичного півострова	18.11-25.11. 2020р.	100	відмінно
<b>8</b>	Оформлення магістерської роботи	26.11-06.12. 2020р.	100	відмінно
<b>9</b>	Підготовка комп'ютерної презентації та доповіді до захисту магістерської роботи	07.12-16.12. 2020р.	100	відмінно
<b>10</b>	Попередній захист магістерської роботи	18.12.2020р.	100	відмінно
<b>11</b>	<b>Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)</b>		<b>100</b>	<b>відмінно</b>

Студент


  
(підпис)
Куляс К.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Недострелова Л.В.

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

**Тема:** «Особливості циркуляційних атмосферних процесів в регіоні Антарктичного півострова»

**Автор:** Куляс Катерина Андріївна.

**Актуальність** проведеного дослідження визначається необхідністю постійного дослідження гідрометеорологічного режиму Південної полярної області, де розташована Українська антарктична станція «Академік Вернадський», та його динаміки в світі сучасних кліматичних змін.

**Метою** даного дослідження є дослідження особливостей великомасштабних циркуляційних атмосферних процесів в західній частині Південної полярної області на початку ХХІ-го століття.

Відповідно до поставленої мети розв'язано наступні задачі:

- побудовані та проаналізовані середні поля і поля середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску для центральних місяців чотирьох основних сезонів року;
- реалізована повна проблема власних значень матриці кореляції середньомісячного атмосферного тиску та отримані власні значення і власні вектори матриці кореляції для 11-ти (крім грудня) місяців року;
- отримані головні компоненти, що вичерпують більше 80% сумарної дисперсії полів, що розглядаються;

**Предмет дослідження:** середньомісячні значення атмосферного тиску на рівні моря за період 2000-2018 рр. проекту ERA-Interim.

**Об'єктом дослідження** є великомасштабні циркуляційні атмосферні процеси в регіоні Антарктичного півострова.

**Методи дослідження:** компонентний аналіз.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в комплексному статистичному дослідженні просторово-часових особливостей великомасштабних циркуляційних процесів в регіоні Антарктичного півострова в умовах змін глобального клімату.

**Практичне значення** отриманих результатів. Застосовані принципи статистичного дослідження та одержані результати можуть бути використані при вивченні змін глобального клімату, а також при розробці фізикостатистичних моделей довгострокових прогнозів погоди для Південної півкулі. Магістерська кваліфікаційна робота в обсязі 71 сторінки складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку посилань з 34 джерел, 2-х додатків, містить 25 рисунків та 1 таблицю.

**Ключові слова:** атмосферний тиск, головні компоненти, власні вектори, глобальний клімат, Антарктичний півострів.

## ANNOTATION

**Theme:** "Features of circulating atmospheric processes in the region of the Antarctic Peninsula".

**Author:** Kulas Kateryna.

**The relevance of the study** is determined by the need for constant monitoring of the meteorological regime of the South polar region, where the Ukrainian Antarctic Station "Academician Vernadsky" is located, and its dynamics in the world of modern climate change.

**The purpose of this study** is to study the features of large-scale circulating atmospheric processes in the western part of the Antarctic at the beginning of the XXI century. According to the goal, the following tasks were solved:

- constructed and analyzed average and mean square deviations of atmospheric pressure for the central months of the four major seasons of the year;
- the complete problem of eigenvalues of the correlation matrix of the average monthly atmospheric pressure is realized and the eigenvalues and eigenvectors of the correlation matrix are obtained for the 11th (except December) months of the year;
- obtained the main components, which exhaust more than 80% of the total dispersion of the fields under consideration;

**The subject of the study:** the average monthly value of atmospheric pressure at sea level for the period 2000-2018 of the ERA-Interim project.

**The object of study** is large-scale circulating atmospheric processes in the Antarctic Peninsula.

**Methods of research:** component analysis.

**The scientific novelty** of the obtained results lies in a comprehensive statistical study of the spatiotemporal features of large-scale circulatory processes in the region of the Antarctic Peninsula in the context of global climate change.

**The practical significance of the obtained results.** The principles of statistical research applied and the results obtained can be used in the study of global climate change, as well as in the development of physical and statistical models of long-term weather forecasts for the Southern Hemisphere. The 71-page master's qualification consists of an introduction, three sections, conclusions, a list of links from 34 sources, 2 appendix, contains 25 figures and 1 tables.

**Keywords:** atmospheric pressure, major components, eigenvectors, global climate, Antarctic Peninsula.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОСОБЛИВОСТІ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ АТМОСФЕРНИХ ПРОЦЕСІВ ПІВДЕННОЇ ПІВКУЛІ.....	10
1.1 Кліматичні зміни Південної полярної області.....	10
1.2 Сучасний регіональний клімат Антарктичного півострова.....	15
1.3 Загальні особливості атмосферних процесів. Центри дії атмосфери.....	17
1.4 Особливості атмосферних процесів в районі Антарктичного півострова.....	23
2 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНОЇ СТРУКТУРИ ПОЛІВ ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ.....	26
2.1 Методика дослідження та вихідні дані.....	26
2.2 Особливості полів середніх значень та мінливості приземного атмосферного тиску.....	31
3 КОМПОНЕНТНИЙ АНАЛІЗ ПОЛІВ ПРИЗЕМНОГО ТИСКУ.....	40
3.1 Алгоритм дослідження.....	40
3.2 Власні значення та власні вектори матриці коваріації.....	44
3.3 Часові ряди головних компонент полів атмосферного тиску.....	50
ВИСНОВКИ.....	54
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	56
ДОДАТОК А.....	60
ДОДАТОК Б.....	66

## ВСТУП

Кліматичні зміни, які відбувалися протягом минулого століття, з'явилися свого роду стимулом, який привів до значного зростання зусиль фахівців у вивченні процесів взаємодії різних ланок кліматичної системи, особливо найбільш енергоємних з них - атмосфери і океану. Незважаючи на значні успіхи, досягнуті світовим гідрометеорологічним науковим співтовариством, залишається ще багато нез'ясованих питань щодо особливостей структури великомасштабних атмосферних процесів, з одного боку, і чинників що їх визначають, з іншого. Особливо це відноситься до Південної півкулі, велика частина якої покрита Південним океаном і в якій розташовується найбільш значний за площею та інтенсивності «холодильник», за висловом Шулейкіна, «теплової машини першого роду» - Антарктида.

Дослідження гідрометеорологічного режиму Антарктиди і його впливу на циркуляцію атмосфери, починаючи з середини минулого століття, проводяться вченими багатьох країн під егідою Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО). У ці дослідження активно включилися і українські вчені, після того як Україна отримала у володіння антарктичну науково-дослідницьку станцію Академік Вернадський, яка розташовується в районі Антарктичного півострова.

У Резолюції Міжнародної конференції «Україна в Антарктиці – національні пріоритети та глобальна інтеграція (Київ, 23-25 травня 2008 р)» вказується, що «...наукові дослідження в Антарктичному регіоні є серед головних пріоритетів світової науки... Продемонстрований на Конференції науковий потенціал українських дослідників та запропоновані учасниками з різних країн напрямки міжнародної кооперації, дозволяють з оптимізмом дивитися на перспективу участі України у майбутніх антарктичних дослідженнях»

*Метою* даної кваліфікаційної роботи є комплексне дослідження особливостей циркуляційних процесів в західній частині Південної полярної області на початку XXI-го століття.

*Актуальність теми* проведеного дослідження визначається необхідністю постійного моніторингу метеорологічного режиму Південної полярної області, де розташована Українська антарктична станція «Академік Вернадський», та його динаміки в світі сучасних кліматичних змін.

*Предмет дослідження* – середньомісячні значення атмосферного тиску на рівні моря за період 2000-2018 рр. проекту ERA-Intherim.

*Об'єкт дослідження* – великомасштабні циркуляційні атмосферні процеси режиму в регіоні Антарктичного півострова.

*Основними задачами наукового дослідження є:*

- підготувати базу даних про атмосферний тиск у вузлах регулярної сітки точок сектору Південної півкулі, що розглядається;
- отримати багаторічні значення атмосферного тиску на рівні моря;
- побудувати та проаналізувати середні поля і поля середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску для центральних місяців чотирьох основних сезонів року;
- реалізувати повну проблему власних значень матриці кореляції середньомісячного атмосферного тиску та отримати власні значення і власні вектори матриці кореляції для 11-ти (крім грудня) місяців року;
- провести розкладання полів атмосферного тиску в базисі ортонормованих власних векторів та отримати головні компоненти, що вичерпують більше 80% сумарної дисперсії полів, що розглядаються.

Дослідження баричного режиму вказаної області проводилося за даними проекту ERA-Intherim Європейського Центру середньострокових прогнозів погоди (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Рідінг, Великобританія. Вихідні дані представляють собою середньомісячні значення атмосферного тиску на рівні моря в вузлах регулярної мережі  $2,5^\circ$  на  $2,5^\circ$  в секторі Південної полярної області, а саме:  $50^\circ$ - $80^\circ$  півд. ш.;  $110^\circ$ - $10^\circ$  зах. д. Реалізація перелічених задач наукового дослідження проводилася за допомогою методів багатовимірного статистичного аналізу та методів дослідження нестационарних випадкових процесів.



Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, 3-х розділів, висновків, переліку посилань з 34 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи 95 сторінок друкованого тексту, включаючи 35 рисунків, 3 таблиці та 2 додатки.

У першому розділі дається огляд літературних джерел щодо загальної циркуляції атмосфери полярних широт у тропосфері та стратосфері, а також описуються географічні особливості району дослідження.

У другому розділі роботи розглядаються сучасні кліматичні зміни в районі Західної Південної полярної області та представлені багаторічні середні поля та поля середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску на рівні моря.

Третій розділ присвячено викладенню основних положень відносно розкладання метеорологічних об'єктів по природних ортогональних функціях. В ньому аналізуються результати розв'язання задачі стиску вихідної інформації про поля атмосферного тиску в районі визначеного сектору Південної півкулі.

Для реалізації статистичного дослідження баричного режиму визначеної географічної області Південної півкулі використовувалося комп'ютерне програмне забезпечення: «Microsoft Office Excel», «Paint», «Metnew».

За результатами магістерської роботи була підготовлена наукова робота на тему «Особливості циркуляційних атмосферних процесів в регіоні Антарктичного півострова».

# 1 ОСОБЛИВОСТІ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ АТМОСФЕРНИХ ПРОЦЕСІВ ПІВДЕННОЇ ПІВКУЛІ

## 1.1 Кліматичні зміни Південної полярної області

В наш час, детально обговорюються та прогнозуються зміни стану льодяного покриву Антарктики, які відбуваються в сучасності. [1-4]. Останні дані відносно змін розміру та об'єму льодяного панцира Антарктиди (рис. 1.1) свідчать, що тільки льодяний покрив Антарктичного півострова в сучасний час відображає зміни клімату. Найбільше суттєве скорочення льодяного покриву фіксується у Західній Антарктиці, особливо в районі моря Амундсена [5]. Дослідження, які ґрунтуються на дистанційному зондуванні, не представляють однозначних свідчень відносно балансу маси Східноантарктичного льодяного щита. Результати дослідників щодо скорочення крайової зони зледеніння різняться.

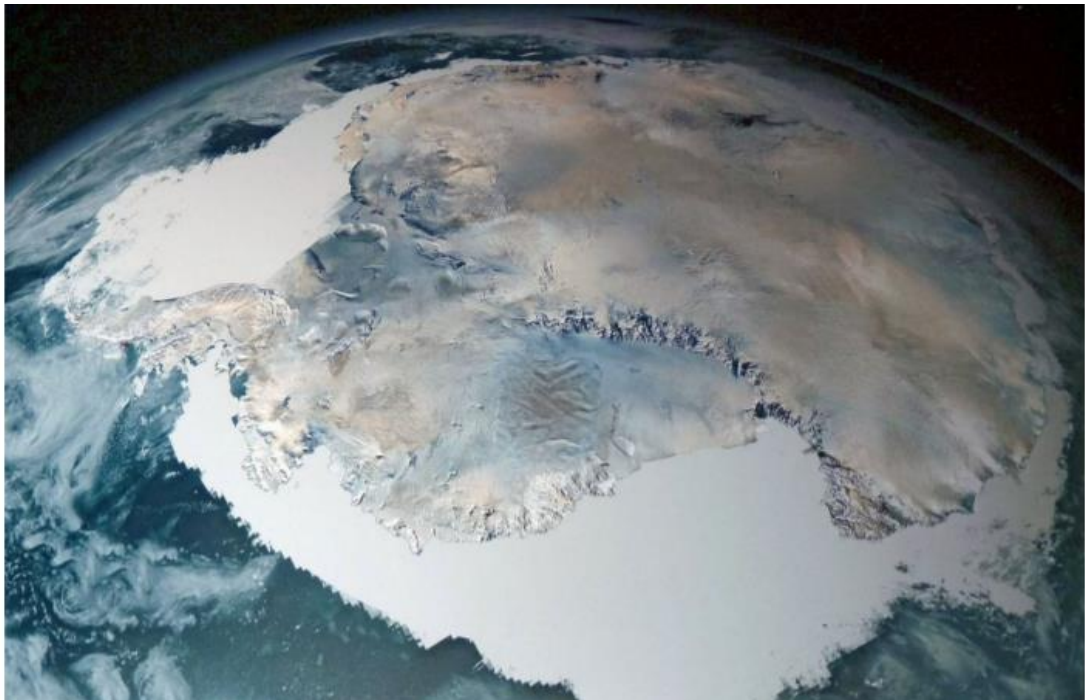


Рисунок 1.1 – Знімок Антарктиди з космосу (NASA)

Льодовиковий щит Антарктиди залишається одним з найбільших та найунікальніших скупчень природного льоду на Землі, яке зародилося в результаті стійкого похолодання 25-26 млн. років тому. За минулий геологічний час утворився могутній льодовиковий купол з максимальною товщиною в центральній частині – 4800 м та об'ємом – від 25 до 30 млн.км<sup>3</sup>. Не зменшуючись в розмірах після утворення, за час свого існування антарктичний льодовиковий покрив завдяки своїм розмірам та запасам холоду є могутнім кліматоутворювальним фактором, який визначає радіаційні, метеорологічні, циркулярно-синоптичні умови не тільки в межах Південної полярної області Південної півкулі, але й всієї Планети, оскільки являється зоною інтенсивного стоку енергії (де альbedo сягає 90-95%) у Світовий простір. Науково доведено, що Антарктичний льодовиковий купол являється планетарним холодильником та могутнім центром дії атмосфери, який визначає багато рис баричної топографії, циркуляції повітряних мас у Південній полярній області та особливості температурно – вологісного режиму не тільки тропосфери а й нижньої стратосфери з характерним інверсійним розподілом температури в прольотному шарі до 80 км. Завдяки даним умовам, над Антарктидою протягом усього року переважає стійкий антициклонльний вихор в системі приполюсного циркуляційного осередку де переважають низхідні вертикальні потоки вихолодженого сухого та щільного повітря. В приземному шарі це повітря набуває горизонтальної складової та визначає зародження стокових (катабатичних) вітрів, які радіально розповсюджуються від району Південного полярного плато до узбережжя континенту.

Враховуючи риси природи Антарктиди, вона являє собою важливу структурну ланку загальнопланетарної кліматичної системи та сама по собі визначає регіональну кліматичну систему з усіма особливостями балансу тепла та вологи, масоенергообміну з суміжними океанічними просторами та безпосереднього впливу на них.

Умови існування Антарктичного льодовикового щита забезпечують в напрямку від центру льодяного покриву до його кромки: зменшення прямої та сумарної радіації, збільшення поглиненої радіації, зростання значень радіаційного

балансу (від від'ємних значень), збільшення температури повітря, підвищення вологовмісту повітря та зростання випаровування та конденсації.

Умови акумуляції визначаються режимом твердих гравітаційних опадів, які на більшій частині Антарктиди дорівнюють акумуляції. Крім того в суму акумуляції входять наростаючі опади, кількість яких коливається в значних межах (від 6-10 до 50%) від загальної суми, в залежності від ступеня океанічності клімату та вологовмісту повітряних мас. За даними [6-7] наростаючі опади в районі Антарктичного півострова складають до 50% загальної суми опадів, а в глибинних районах континенту – не більш 10 %.

Доведено, що зміни річного балансу маси льодовика пов'язані з кліматом, та, перш за все, зі змінами атмосферної циркуляції та аномаліями опадів і температури повітря. Враховуючи цей факт, не завжди вдається виділити чіткі закономірності. Наприклад, зростання середньорічної температури повітря підвищує абляцію та зменшує річний баланс маси. Відповідно до цього може зростати кількість твердих опадів, що в свою чергу призведе до збільшення балансу. Дані випадки спостерігались на льодовиках в південній частині Скандинавії, та в зволжених районах Альп. Для району Антарктиди зміни річного балансу маси льодовикового покриву напряду пов'язані зі змінами атмосферної циркуляції, та аномаліями атмосферних опадів і температури повітря.

Можна бачити, що існує взаємозв'язок між зледенінням та атмосферою, сушею і океаном. Атмосфера являється найбільш мінливою, з нею напряду пов'язані сезонні зміни об'єму льодовиків, коливання з різною мінливістю льодовиків. Існує велика кількість факторів, які вказують на періодичний характер коливань льодовиків, який пов'язаний з сонячними циклами. Дані цикли, а також пов'язані з ними кліматичні коливання впливають на інтенсивність переміщення льодовиків, однак простежується досить яскрава інерція в прояві впливу атмосфери на коливання льодовиків, яка чинить труднощі у виявленні зв'язку поведінки льодовиків з коливаннями клімату. А також, перешкоди виникають внаслідок накладення коливань з різними кліматичними періодами.

Виявлений цикл змін клімату з періодом 2,5 тис. років, який пов'язаний з сонячною радіацією, що чинив вплив на поведінку багатьох льодовиків. Пов'язані з ним холодні фази були 7,8; 5,3; 2,8 тис. та 300 років тому. Але не всі фази проявлялись однаково. В період 8-5 тис. років тому середні температури повітря були вище сучасних, які відобразились у зменшенні зледеніння, 5-3 тис. років тому простежувалось зниження глобальних температур та зростання зледеніння. X-XII ст. нашої ери мало ознаки більш теплого клімату (цей період зветься другим кліматичним оптимумом голоцену). У теперішній та майбутній час спостерігалися короткочасні коливання зледеніння з 11-, 22-, 35- та 80-річними циклами, які мали вплив на інтенсивність переміщення льодовиків під час малого льодовикового періоду та на інтенсивність відходження льодовиків в останньому сторіччі.

Щодо автоколивань зледеніння в системі земна поверхня-атмосфера як основного механізму чергування льодовикових епох була висловлена гіпотеза в 1930 р. капітаном Е.С. Гернетом. Згідно цієї гіпотези, переміщення льодовиків не завжди може бути пов'язане зі змінам коливання клімату на які чинять вплив зовнішні фактори, а самі льодовики в ході зростання можуть чинити вплив на клімат. Зі збільшенням площі зледеніння зменшується кількість тепла, яке отримує Земля при збільшенні альbedo на покритих снігом та льодом поверхнях, що спричиняє зниженню температури підстильної поверхні, а також повітря яке сприяє подальшому розповсюдженню льоду, до тих пір, поки не стане відчутним дефіцит атмосферної вологи, яка сприяє насиченню льодовиків. Е.С. Гернет встановив, що льодовикові явища в планетарному масштабі є частковий перехід Землі із стану без льоду в стан зледенілий, та що лід, розповсюдившись на Землі, сам являється причиною свого збереження [8].

Беручи до уваги той факт, що, головним джерелом насичення льодовикового щиту Антарктиди є опади, одним з найважливіших являється питання за спостеріганням кількості опадів в Південній полярній зоні. Наростаючі опади за своєю абсолютною величиною наближаються до випаровування снігу при різних за знаком температур повітря (без переходу через рідку фазу). При розрахунках водного-льодового балансу, вони врівноважуються.

Просторовий розподіл опадів, майже дорівнює акумуляції, представлений на рис. 1.2. Аналіз швидкості акумуляції снігу показав, плямистість в розподілі даної характеристики [9].

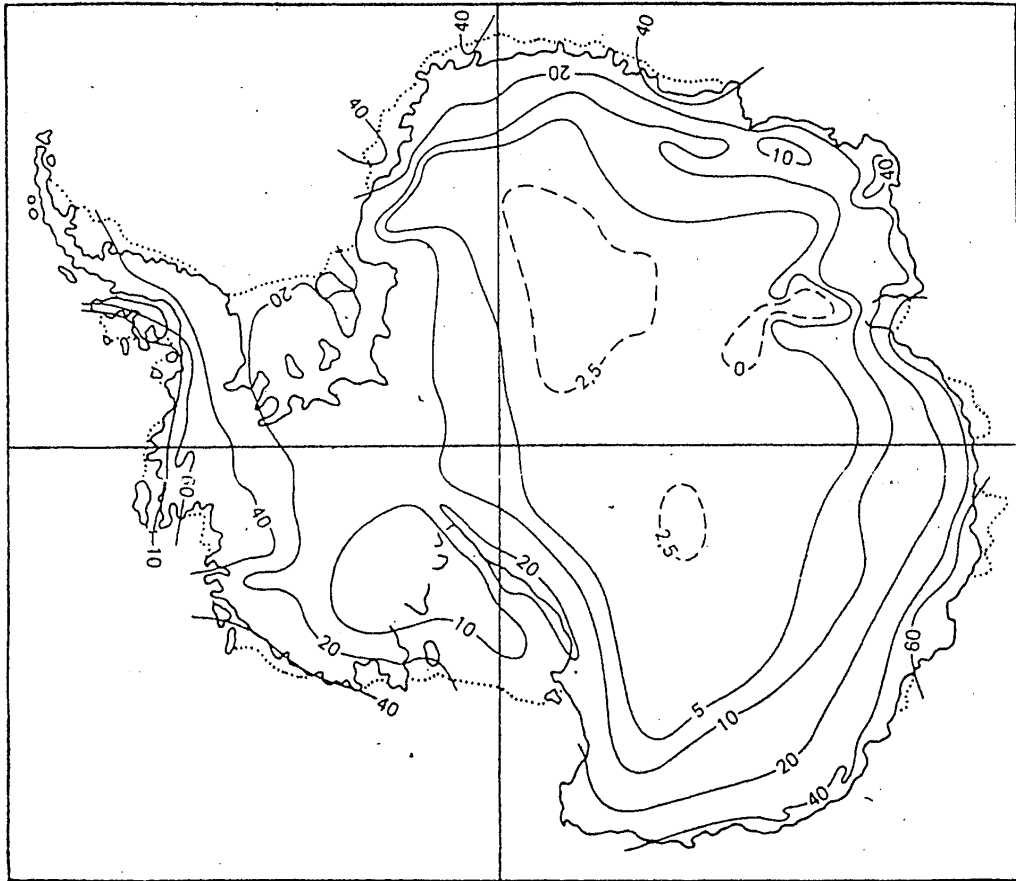


Рисунок. 1.2 – Швидкість акумуляції снігу,  $\text{г/см}^2$  за рік [9].

На півночі Антарктичного півострова випадає близько 2000 до 3000 мм, в центральній частині материка – до 35-50 мм, у прибережній зоні опадів випадає від 500-600 до 900-1000 мм за рік, на шельфових льодовиках – від 250 до 400 мм за рік [10-12]. На умови акумуляції має вплив вітровий режим та заметілевий перенос снігу, дуже помітний на схилах Антарктичного льодовикового щита, біля узбережжя. В умовах значного розподілення рельєфу, наприклад в районі Антарктичного півострова, відкладення та перерозподіл опадів на вивідних льодовиках мають залежність від місцевих теплих вітрів Тихоокеанського

узбережжя, якому притаманна значна кількість опадів (в тому числі рідких) з м'яким та вологим океанічним кліматом [12, 13].

Якщо узагальнити кількісні оцінки основних показників гляціальних та гляціокліматичних процесів і режиму антарктичного льодовикового покриву можна бачити відповідні результати. Протягом плейстоцену, зледеніння Антарктиди змінювалось тільки в сторону аградації [14-15].

У XX-XXI столітті були проведені спостереження за зміною кромки льодовикового щита, яка відображає його сучасний режим, і її коливання відмічаються біля деякого середнього положення в місцях еволюції шельфових та крупних вивідних льодовиків. Кліматичні зміни сучасності, які яскраво відображаються у потеплінні, будуть впливати на антарктичну атмосферу у вигляді зростання температури повітря та його вологовмісту. Наслідком збільшення вологовмісту повітря буде збільшення кількості опадів над Антарктидою. Наступним кроком кліматичних змін буде фіксуватись підвищення прихідної частини масбалансу Антарктичного льодовикового щита, в наслідок випадання та акумуляції гравітаційних та наростаючих опадів, що призведе до зростання швидкості витрат льодовикового матеріалу в процесі його пересування з берега в море та відколу крупних айсбергів.

## **1.2. Сучасний регіональний клімат Антарктичного півострова**

Орографічний контраст регіону Антарктичного півострову посилюється неоднорідністю зледеніння, особливо наявністю шельфового льодовика Ларсена на східному узбережжі. Якщо врахувати своєрідний розподіл морського льоду, такі риси орографії даного регіону були причиною для визначення Антарктичного півострова як гляціокліматичної лінії розділу [16]. Багатогранність орографічних умов в даному районі призводить до того, що досліджувані дані конкретної станції репрезентативні тільки для відповідного району. Внаслідок цього перед

дослідниками виникають деякі перешкоди у аналізі та порівнянні даних навіть з тих станцій які розташовані відносно недалеко одна від одної. В районі станції «Академік Вернадський», яка розташована майже (8-10 км) на західному узбережжі Антарктичного півострова, меридіональна орієнтація берегової лінії має вплив на формування режиму повітряних потоків (уздовж берегової лінії). Однак, наявність гірської системи (середня висота плато до 2000 м в районі станції «Академік Вернадський», а висоти окремих гір – до 2800 м) формує мезомасштабні циркуляції, які мають вигляд фенових вітрів, а близьке розташування покривного зледеніння на півострові призводить до утворення стокових вітрів місцевого масштабу [16].

Також важливою кліматичною рисою Антарктичного півострову є наявність озонової діри, яка постійно активізується на протязі весняного сезону (вересень-листопад) [16].

На багатьох архіпелагах та островах прибережної зони Антарктичного півострова знаходяться численні земні та морські екосистеми, умови життєдіяльності яких в значній мірі залежать від кліматичного режиму [16].

Кліматологічні умови Антарктичного півострова характеризуються взаємозв'язком між теплою і вологою тихоокеанською та холодною сухою повітряними масами материка Антарктиди, та умовами зледеніння і наявністю гірської системи на Антарктичному півострові та специфічністю океанічної циркуляції, яка визначальний вплив на коливання морського льоду. Північна частина Антарктичного півострова (Земля Грейама) має відношення до кліматичного району з помірним кліматом (в межах Антарктики), з помірним вітром і високою вологістю [16].

Найголовнішим чинником при формуванні полів температури повітря та опадів слід враховувати великомасштабну циркуляцію, однак вплив регіональних умов (гірська система півострова, контраст океан-лід-континент) вносить досить важливий внесок до погодних умов. Існування зледеніння на східному узбережжі і дефіцит на західному сприяє відхиленню регіональних ізотерм від квазізональної орієнтації, зі зростанням градієнтів у вузькій смузі, майже паралельно гірській



системі Антарктичного півострова. Достатня кількість морського льоду взимку, як правило, посилює цей контраст.

Слід зазначити, що в плані зміни клімату Антарктичний півострів контрастує з даними материкової та Східної Антарктиди: там середні річні температури практично не змінюються, або є наявність слабких негативних трендів в окремі місяці. Це можна трактувати, як специфічне фізико-географічне положення Антарктичного півострова, а саме з його географічною ознакою, наявністю гірської системи, зледеніння та морів з різними термічними характеристиками. За умовами відносно м'яких кліматичних умов на архіпелагах та островах берегової зони Антарктичного півострова існують досить багато екосистем, які являються чутливими до кліматичних змін. [16].

### **1.3 Загальні особливості атмосферних процесів. Центри дії атмосфери**

Кліматичні особливості в Південній півкулі більшою мірою формуються під впливом Антарктиди. Особливості цього континенту визначаються його навколо полюсним положенням, великими абсолютними висотами і властивостями сніжно-льодяної поверхні. Сукупність цих умов призводить до неповторного ніде більше на земній кулі поєднань географічних умов, атмосферної циркуляції і сонячної радіації-чинників, під впливом яких формується клімат [17-20].

В результаті сильного вихолодження в центрі материка створюється зона підвищеного тиску-антарктичний антициклон. Він визначає природні умови Центральної Антарктиди.

До теперішнього часу основні риси великомасштабної циркуляції атмосфери Південної полярної області вивчені досить добре, причому відомо, що вона в цілому простіше, ніж в Північній півкулі. Західно-східне перенесення в помірних широтах Південної півкулі інтенсивніше, з наявністю поясу низького тиску в Південній полярній області (ППО), що обумовлює меншу інтенсивність

антициклонального блокування. Практично усі баричні утворення переміщуються тут над океанською поверхнею, обмеженою з крайнього півдня льодовиковим бар'єром або гірськими системами Антарктиди. Як правило, кліматичні улоговини (циклони) орієнтуються до увігнутостей берегової лінії Антарктиди (моря Роса, Беллінсгаузена, Уедделла), а гребні - до опуклостей (Антарктичний півострів, Земля Елсуорта, Земля Мері Берд, Земля Королеви Мод).

Зміну клімату в Південній полярній області пов'язують передусім зі зміною в атмосферній циркуляції. Детальне вивчення регіонального клімату стало можливим з другої половини 1950-х років, коли за час МГГ 1957-1959 рр. сформувалася мережа постійно діючих станцій. За результатами досліджень Г.М. Таубер який уперше охарактеризував центри дії атмосфери (ЦДА) в поясі зниженого тиску навколо Антарктиди, С.С. Гайгеров уперше описав вертикальну будову тропосфери і нижньої стратосфери, а також були встановлені умови формування стокових вітрів (Атлас Антарктики, 1969).

Деталізація атмосферних процесів з порівнянням особливостей в обох півкулях землі проведена Б.Л. Дзердзеєвським у 1977 р. Він встановив зв'язок атмосферних процесів Північної і Південної півкуль, а також обґрунтував гляціолостичні ефективні "елементарні циркуляційні механізми", які сприяють акумуляції і абляції твердих опадів, що актуально для полярних і гірських районів. Одним з перших він вказав, що у "зв'язку з багаторічними коливаннями ЗЦА треба мати набір середніх кліматичних даних по циркуляційним епохам, оскільки одна середня багаторічна величина за увесь період спостережень будь-якої метеорологічної величини, приведена в довідниках, не цілком характеризує особливості сучасного клімату". Це положення особливо актуально зараз, коли циркуляційні процеси в епоху потепління значно змінилися в порівнянні з серединою ХХ століття. На їх фоні у ряді регіонів неодноразово повторювалися рідкісні погодні явища, вірогідність виникнення яких в середньому дуже мала. У типізації Б.Л. Дзердзеєвського виділений тип меридіональної південної циркуляції з незвичайним положенням циклону на полюсі, відсутністю блокуючих процесів-прообраз циркумполярній циркуляції, яка властива атмосфері Південної півкулі.

Узагальнення форм циркуляції склало одну з перших типизацій синоптичних процесів в Антарктиці, виконана Г.Я. Рижаківим по традиційних методиках Г.Я. Вангенгейма. Усі атмосферні процеси Південної півкулі узагальнені в три форми циркуляції : зональну і дві меридіональні. На відміну від Північної півкулі, на середньому рівні в Південній півкулі переважає синоптична хвиля з хвилевим числом 4 по кількості улоговин і гребенів. Вже на сучасному етапі дослідження це було підтверджено, причому відзначається зміна переважаючої хвилевої структури між різними кліматичними епохами.

Впродовж багатьох років учені дотримувалися теорії льодовикового антициклону, висуненою В. Хоббсом [21]. Ця теорія припускала розвиток в нижніх шарах атмосфери стійкого антициклону, що супроводжується стоком холодного повітря від центру, а над ним - полярного циклону, в якому вітри спрямовані до центру. В. Мейнардус [22] представляв собі антициклон як розподіл тиску, характерний лише для нижніх шарів атмосфери. Він визначив межу між антициклоном і полярним циклоном на висоті 2 км над рівнем моря. Оскільки внутрішні області Антарктиди значно вищі за цей рівень, високий тиск не поширюється на увесь материк, і, отже, антарктичний антициклон існує у вигляді кільця лише в низьких прибережних районах материка.

Сучасні дослідження показують, що антициклон над Антарктидою займає шар невеликої потужності, і перехід льодовикового антициклону у вище розміщений циклон відбувається на висоті близько 2-3 км.

В області антарктичного антициклону спостерігаються вітри східної складової, а в циклоні – західною. Південний полярний антициклон - це явище, що періодично повторюється, підкоряється більшій частині закономірностей, властивих системам високого тиску. Антициклони в 60-70% випадків зосереджені над східною Антарктидою. Антарктичний антициклон – це мінлива і нестійка особливість циркуляції атмосфери Антарктики.

Дослідження тропосферної циркуляції стали пріоритетними упродовж останніх десятиліть у зв'язку з тим, що вона в цілому пояснює сучасну мінливість клімату на різних часових масштабах (в межах століття і окремих десятиліть).

Потепління у ряді районів помірних і полярних широт північної півкулі, включаючи Атлантико-Європейський сектор, Арктику і центральний Сибір, пов'язане зі змінами положення і інтенсивності центрів дії атмосфери (ЦДА) [23]. Найбільш інтенсивне потепління в Південній півкулі зареєстроване в районі Антарктичного півострова, де розташовано найбільша кількість працюючих станцій в межах Південної полярної області (ППО).

Цікаві результати зіставлення середніх полів тиску і їх аномалій за даними реаналіза NCEP/NCAR і ВНИГМИ-МЦД [24]. Визначено, що в помірних широтах Південної півкулі існує більше виражене західно-східне перенесення, ніж в північній півкулі, з поясом низького тиску уздовж  $60^{\circ}$ - $70^{\circ}$  півд.ш., причому північна частина Антарктичного півострова (Земля Грейама) розташовується в зоні його впливу. За даними реаналіза, усередненим за 1960-1990 рр., у січні в тропічній зоні південної півкулі виражені три центри підвищеного тиску з центральною ізобарою 1020 гПа, а в червні Атлантичний максимум з'єднується з Індійським, причому якщо середній тиск залишається тим же, то площа максимумів значно зменшується (рис. 1.3).

Згідно з середніми даними ВНИГМИ-МЦД за аналогічний період, упродовж обох сезонів чітко проявляються чотири тропічні центри дії [25, 26]. Найбільш стабільний ЦДА в східній частині Тихого океану, оскільки "західний" ЦДА над Тихим океаном може не проявлятися в окремі сезони. У січні атмосферний тиск в ЦДА над океанами однаковий - 1020 гПа, а в зимовий період найбільш інтенсивним стає Індійський ЦДА, середні значення тиску в нім досягають 1027 гПа, які на 7 гПа вище, ніж за даними реаналіза. Другим по інтенсивності в червні являється Південно-атлантичний ЦДА (1024 гПа), значення якого перевищує на 4 гПа, визначеного за даними реаналіза. Відповідно зональні градієнти на північ від  $40^{\circ}$  півд.ш. різкіше виражені, ніж за даними реаналіза. Найбільш активний циклогенез спостерігається в районі між  $40^{\circ}$ - $70^{\circ}$  півд.ш.

В середньому, в червні, за даними реаналіза 1960-1990 рр., відмічені дві великі області низького тиску : над морем Роса і в східному секторі ППО, а в січні

виділяються кліматичні циклони над морями Беллінсгаузена і Роса, з центральними ізобарами 990 гПа.

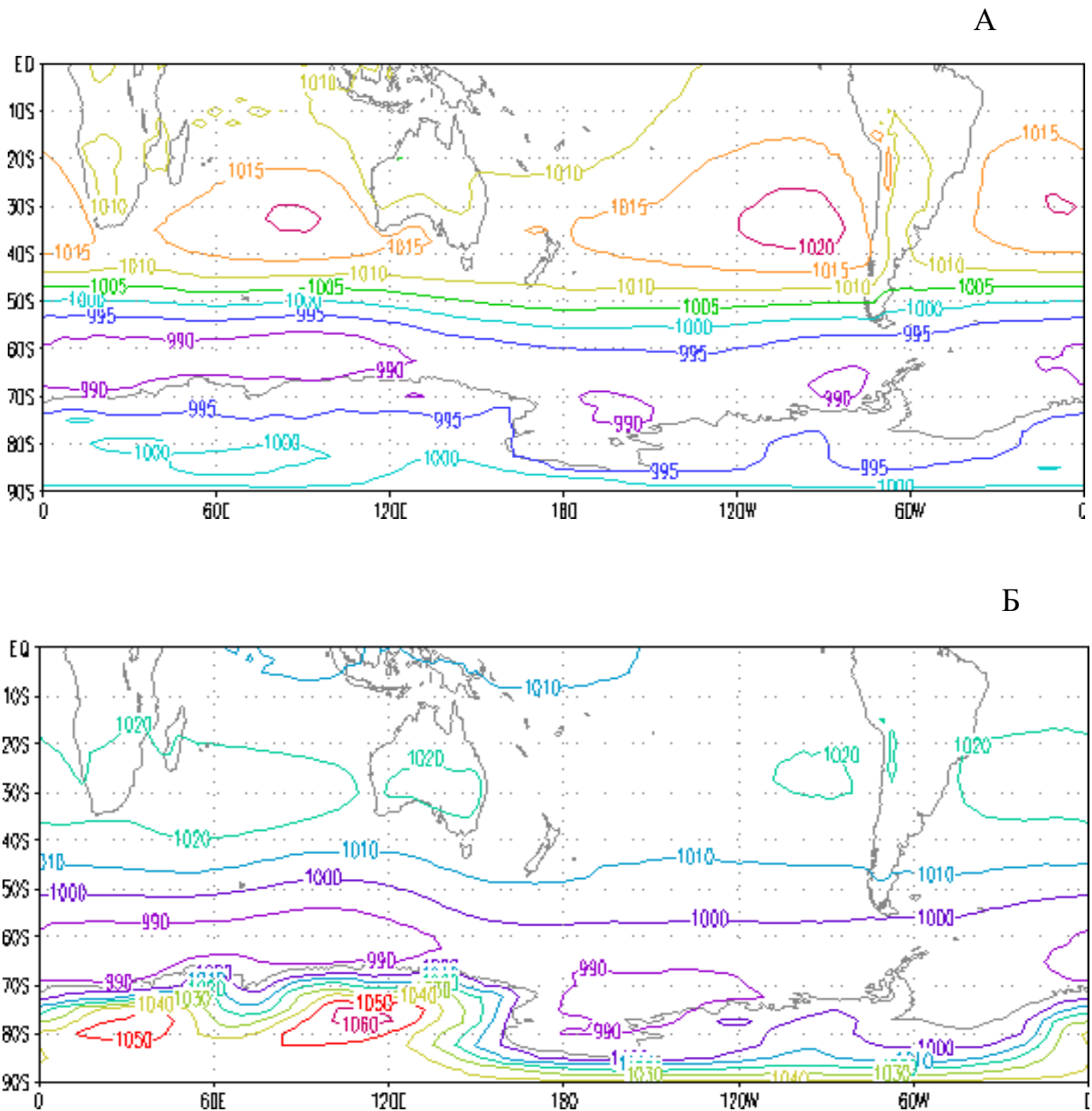


Рисунок 1.3 – Середні поля атмосферного тиску поверхні 1000 гПа в південній півкулі за період 1960 - 1990 (А - січень, Б - липень) [25]

Як взимку, так і влітку, в районі Антарктичного півострова формується барична улоговина або мало виражений гребінь. На картах ВНИГМИ-МЦД кліматичні циклони над приантарктичними морями виражені в обидва сезони, з

центральною ізобарою 985 гПа в червні і 987 гПа в січні. За результатами робіт Разанової І.В. були визначені положення трьох циклонних ЦДА за 44 роки спостережень (1957-2000 рр.): Південно-атлантичний ( $69^\circ$  півд.ш.,  $30^\circ$  зах.д.), середнє значення якого 982 гПа, Південно-тихоокеанський з середнім значенням 982 гПа ( $71^\circ$  півд.ш.,  $160^\circ$  зах.д.) і Індоеокеанський ЦДА з середнім значенням 981 гПа ( $64^\circ$  півд.ш.,  $99^\circ$  сх.д.).

Виражене зростання баричних градієнтів у береговій зоні Антарктиди і позитивні аномалії над східною частиною Антарктиди, що проявляються в червні за даними реаналіза, не відображають реальної картини циркуляції. Це пов'язано з неадекватністю первинного відновлення поля тиску у зв'язку зі значними висотами цього району і помилками в процедурі приведення тиску до рівня моря в умовах інверсії температури, інтенсивність якої максимальна взимку. Дані реаналіза, усереднені за період 1977-1998 рр. і за 1957-1977 рр. [25], показали деяке зниження середніх значень тиску в ППО, який найбільш інтенсивно проявляється в районах кліматичних циклонів над морями Роса (4 гПа) і Уедделла (рис. 1.4), що повинне свідчити про деяке посилення циклонної активності в цьому районі.

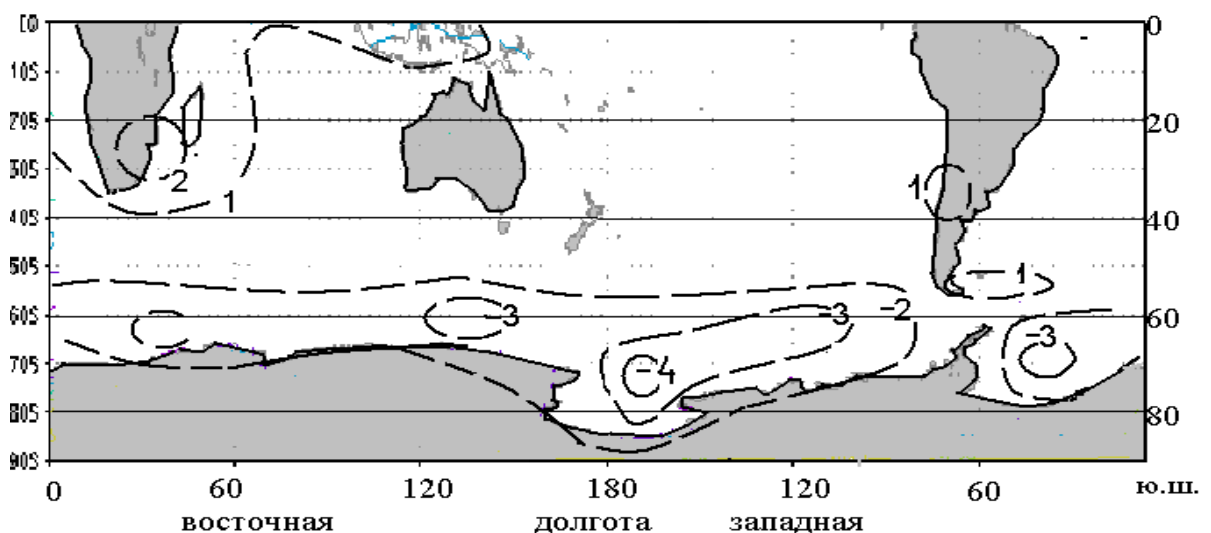


Рисунок 1.4 – Аномалії атмосферного тиску в Південній півкулі, 1977-1998 рр., порівняно з періодом 1957-1977 рр. [25]

Позитивні аномалії тиску відмічені тільки для Південної Африки і окремих районів Південної Америки. У низьких широтах Тихого океану, де розвивається явище Ель-Ніньо, відсутні які-небудь аномалії в полі тиску. На жаль, це виведення неможливо порівняти з даними ВНИГМИ-МЦД у зв'язку з їх відсутністю. Проте ці результати узгоджуються із загальним результатом про перехід до негативної тенденції тиску в ЮПО з початку 1980 рр., як за даними інструментальних вимірів, так і інших масивів реаналіза ERA - 40 і ECMWF, у тому числі і за даними геопотенціальних висот середньої тропосфери.

#### **1.4 Особливості атмосферних процесів в районі Антарктичного півострова**

Антарктичний півострів розташований в межах великомасштабної циркумполярної циркуляції в атмосфері та океані. Значна протяжність на північ гірської системи Антарктичного півострова призводить до посилення меридіонального контрасту поля температури повітря, формуванню зонального кліматичного контрасту, а також до формування регіональної атмосферної циркуляції [27, 28].

Циркуляційні процеси в Антарктичних районах більш стабільні у часі і просторі, але за характером та інтенсивністю відрізняються від процесів в Арктиці, що зумовлено різними фізико-географічними характеристиками цих полярних регіонів: Арктика – це водна або льодяна рівнина, яка оточена континентами, а Антарктида – суша, яка покрита шаром льоду в 3-4 км і оточена з усіх боків теплими водними поверхнями. До того ж річний радіаційний баланс майже на всьому материка від'ємний.

Над Антарктидою, безумовно, переважним є режим високого тиску. Але навіть тут антициклону не властива надзвичайна стабільність. На середніх картах поверхні 700 гПа, яка розташована приблизно на середній висоті материка, над

Східною Антарктидою в усі місяці року спостерігається антициклон. Взимку в більш високих шарах атмосфери відбувається перехід до циркумполярного циклонічного вихору, як і в Північній півкулі. Над океаном навколо Антарктиди інтенсивно розвинена циклонічна діяльність. Материк оточений поясом найнижчого на Земній кулі атмосферного тиску. Середній за рік тиск на рівні моря у цьому поясі становить 990-985 гПа. Узбережні райони Антарктиди між широтами 60 і 70° є «гніздом» для багатьох активних депресій і менш масштабних областей низького тиску. Ця зона відома як циркумполярна улоговина.

Поле тиску в полосі широт 40-60° півд.ш. має зональний характер. Це пов'язано з тим, що тут відсутні материки. Тому циклони і антициклони розвиваються над океаном на будь-яких меридіанах. При русі циклонів на південний схід, а антициклонів на північний схід у зазначеній зоні області високого та низького тиску взаємно гасяться, і ізобари тут розташовані зонально. Але кінцеві стадії розвитку циклонів сприяють формуванню кільця областей низького тиску навколо Антарктиди, а антициклонів – кільця субтропічного поясу високого тиску. На материк Антарктиди циклони проникають переважно в західній його частині, де берегова лінія достатньо зрізана і є затоки (моря), які далеко вриваються у материк. У Східну Антарктиду циклони потрапляють досить рідко.

Вітри над Антарктидою, як і над Арктикою, спрямовані від полюса до помірних широт. Під дією сили Коріоліса південні вітри переходять у південно-східні. Таким чином, у полярних областях Південної та Північної півкуль у нижній тропосфері відбувається винос арктичного і антарктичного повітря на периферію, що сприяє ще більшому відособленню в кліматичному відношенні полярних країн, своєрідність яких, головним чином, визначається особливостями радіаційного режиму.

Своєрідність Антарктичного континенту полягає не тільки в тому, що він служить постійним охолоджувачем повітряних мас Південної півкулі, а також в ролі гігантського акумулятора вологи, що залишається на його поверхні у вигляді кристалічних опадів. Незмінний протягом року напрямок горизонтального градієнту температури в тропосфері сприяє меридіональній формі циркуляції



атмосфери, що особливо чітко проявляється в зимовий час, коли градієнти температури досягають максимальних значень. За рахунок цього здійснюються глибокі меридіональні прориви холодних мас континентального антарктичного повітря на північ, в помірні широти, а теплих морських повітряних мас – на південь, у внутрішні континентальні райони.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНОЇ СТРУКТУРИ ПОЛІВ ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ

### 2.1 Методика дослідження та вихідні дані

Оскільки завданням дослідження є розгляд особливостей статистичної структури полів приземного атмосферного тиску, обумовленої великомасштабними атмосферними процесами, тому в якості апарата дослідження використовувалися методи статистичного аналізу, які вимагають побудови матриць початкових даних дуже великого розміру.

Матриці коваріації і кореляції, вирішують ряд завдань сучасної метеорології, що потребують знання статистичної структури метеорологічних полів, таких як поля температури, опадів, вологості повітря, тиску та інше.

Сукупність  $m$  метеорологічних полів, з певними межами термінів виміру, можна представити у вигляді матриці порядку  $n \times m$  [29] (у нашому випадку поля приземного атмосферного тиску)

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Матриця (1.1) містить великий об'єм інформації. Її стовпці є відповідними метеорологічними об'єктами (міститься інформація про  $n$  таких об'єктів). Рядки матриці є тимчасовими рядами що відповідають метеорологічній величині. Таке



Операція, яка проведена над матрицею (2.1), називається операцією центрування. Тоді матриця коваріації ( $K_x$ ) визначається таким матричним рівнянням:

$$K_x = \frac{1}{m} \Delta X \Delta X' . \quad (2.6)$$

Ця матриця має таку структуру:

$$K_x = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 K_{12} \dots K_{1j} \dots K_{1n} \\ K_{21} \sigma_2^2 \dots K_{2j} \dots K_{2n} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ K_{i1} K_{i2} \dots K_{ij} \dots K_{in} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ K_{n1} K_{n2} \dots K_{nj} \dots \sigma_n^2 \end{pmatrix} . \quad (2.7)$$

Елементи матриці (2.7) розраховуються по формулах:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{S=1}^m \Delta x_{iS}^2 , \quad (2.8)$$

$$K_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{S=1}^m \Delta x_{iS} \Delta x_{jS} . \quad (2.9)$$

З формул (2.8) і (2.9) видно, що на головній діагоналі матриці (2.7) розташовані дисперсії метеорологічних величин. Порядковий номер дисперсії на діагоналі відповідає номеру метеорологічної станції, якщо це стосується метеорологічного поля, номеру стандартної висоти, якщо досліджуються вертикальні профілі метеорологічних величин або номеру предиктора, якщо

досліджуються статистичні особливості системи предикторів при побудові моделі прогнозу. Інші елементи матриці (2.7) - відповідні коваріації.

Маючи матрицю коваріацій, можна легко сформуувати діагональну матрицю  $\sigma$  середньоквадратичних відхилень. Вона має вигляд:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

Зворотна матриця від діагональної знаходиться так:

$$\sigma^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_n} \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

Якщо перемножити ліворуч і справа матрицю коваріацій  $K_x$  на матрицю (2.11), в результаті отримаємо матрицю кореляцій

$$R_x = \sigma^{-1} K_x \sigma^{-1}. \quad (2.12)$$

Матриця кореляцій має такий вигляд:

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 \cdot r_{12} \dots r_{1j} \dots r_{1n} \\ r_{21} 1 \dots r_{2j} \dots r_{2n} \\ \dots \dots \dots \\ r_{i1} \cdot r_{i2} \dots r_{ij} \dots r_{in} \\ \dots \dots \dots \\ r_{n1} \cdot r_{n2} \dots r_{nj} \dots 1 \end{pmatrix}. \quad (2.13)$$

Матриця кореляцій має властивості, аналогічні властивостям матриці коваріації, тобто вона дійсна, симетрична і позитивно визначена.

Матриці кореляцій і коваріацій включають важливу інформацію про особливості статистичної структури метеорологічних об'єктів. Якщо, наприклад, йдеться про метеорологічні поля, то окрім поля середніх значень, яке характеризує вектор (2.2), можна побудувати за допомогою матриці коваріацій поле дисперсії метеорологічної величини або середньоквадратичних відхилень. У матриці кореляцій міститься інформація про структуру  $n$  полів кореляції. Елементи цієї матриці характеризують лінійний кореляційний зв'язок між метеорологічною величиною на  $i$ - тій і  $j$ - тій станціях. Інші елементи матриці кореляції характеризують аналогічні кореляційні зв'язки з іншими метеорологічними станціями, тобто рядок або відповідний стовпець матриці представляє поле кореляції.

При дослідженні особливостей великомасштабних циркуляційних процесів над Антарктичним півостровом були використані дані масиву Era-intherim за 2000-2018 роки середньомісячних значень приземного атмосферного тиску, шаг сітки  $2,5 \times 2,5^\circ$  [30]. Даний сектор, обмежений широтами від  $80^\circ$  півд.ш. до  $50^\circ$  півд.ш. і меридіанами від  $10^\circ$  зах.д. до  $110^\circ$  зах.д. У зазначений сектор увійшли південна частина Атлантичного океану, східна частина Тихого океану і частина Антарктиди з Антарктичним півостровом, морями Беллінсгаузена і Уедделла.

## 2.2 Особливості полів середніх значень та мінливості приземного атмосферного тиску

Районом, найбільш достатнім метеорологічною інформацією в межах ППО, є Антарктичний півострів. Цей район характеризується істотною неоднорідністю підстильної поверхні, наявністю гірського рельєфу, значною нерівністю берегової лінії, численними островами, а також різного типу зледенінням. В результаті мікрокліматичних особливостей формуються істотні температурні відмінності на невеликих просторових масштабах.

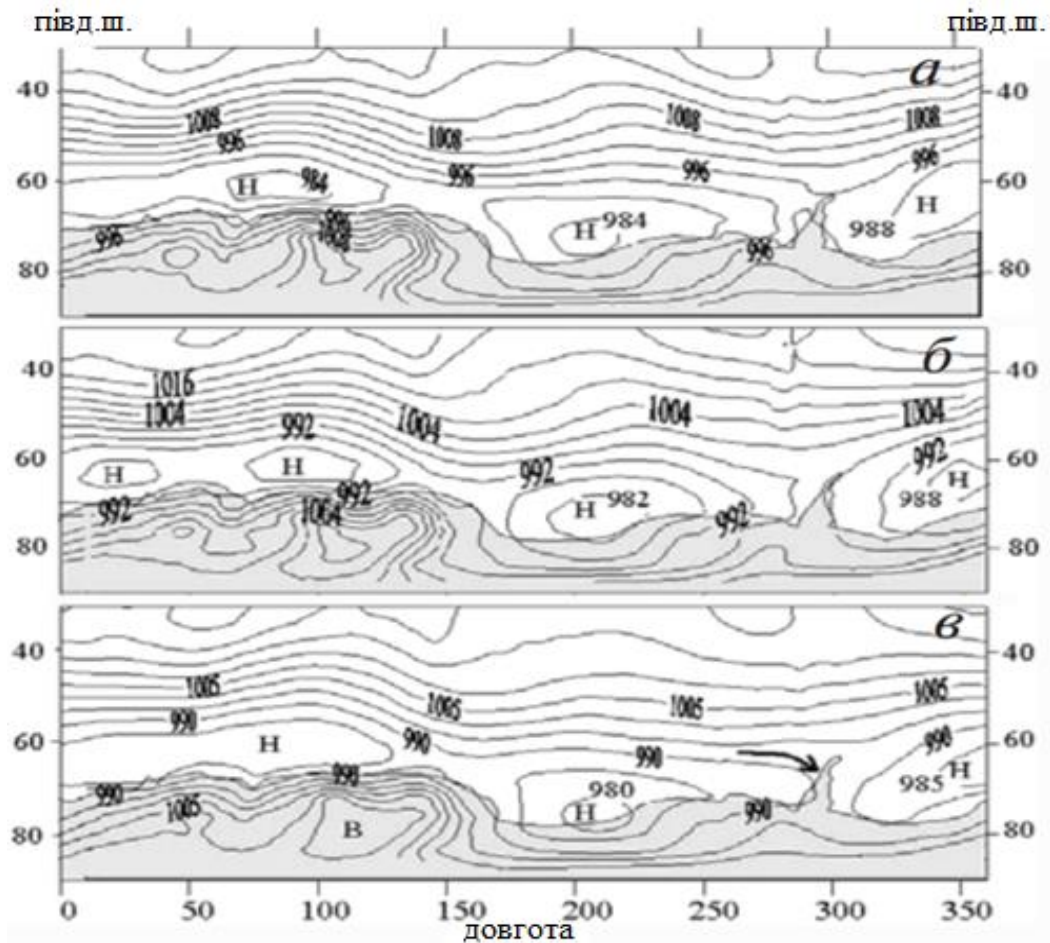
Одна з основних особливостей – зональний контраст в досліджуваному районі, обумовлений різним режимом зледеніння, а також льодовитістю в морях Беллінсгаузена і Уедделла. В результаті середня багаторічна температура повітря на західному узбережжі Антарктичного півострова приблизно на 4-6°C вище, ніж на східному; у зимовий сезон різниця ще більша.

Певні успіхи досягнуто в моделюванні циркуляції окремих районів, проте незначне число робіт присвячене об'єктивній класифікації великомасштабних процесів які можна було б використати в цілях прогнозу. Раніше циркуляційні особливості ППО детально досліджувалися в багатьох роботах.

При виконанні даної побудови полів середніх значень приземного атмосферного тиску за останні 18 років, також були вивчені роботи попередніх дослідників даного регіону. Для прикладу наведено дослідження В.Ф. Мартазінової [31] «Сучасний стан атмосферної циркуляції повітря в північній і південній півкулі і регіональні кліматичні особливості в Атлантико-Європейському секторі і районі Антарктичного півострова»

На картах середнього атмосферного тиску (рис.2.1), які були побудовані за кожне десятиріччя для зимового сезону (липень) позатропічних широт південної півкулі починаючи з 1961-1970 р.р. до 1991-2000 р.р. На середніх полях тиску виділяють 3 ЦДА зниженого тиску (кліматичні циклони), причому найбільшим являється циклон в районі моря Роса, який простягається найбільш близько до

полюсу, а над східним сектором південної полярної області розташовується кліматична область низького тиску. Площа циклонічної циркуляції в західному секторі південної полярної області збільшується до 1991-2000 р.р. за рахунок поширення улоговини в морі Беллінсгаузена, що супроводжується зниженням тиску в цій області.



*a*-1961-1971 р.р., *б*-1971-1980 р.р., *в*-1991-2000 р.р.

Рисунок 2.1 – Середні поля тиску в ППО окремих десятирічч (липень) [31]

Дві інші кліматичні області зниженого тиску розташовуються над морями Беллінсгаузена і Уедделла, а зміна знаку циклонічної циркуляції відбувається в районі Антарктичного півострова, з наявністю баричного гребня, або сідловини. Найбільш виразний гребінь спостерігається в 1960 р. у зв'язку з посиленням континентального антициклону, в наступні десятиріччя він послаблюється, з



деяким зсувом на схід. Послаблення гребеня супроводжується посиленням зональності в регіоні [32-33].

Розглянемо особливості полів середніх значень приземного атмосферного тиску за останні 18 років для центральних місяців сезонів (рис.2.2-2.5). Поля середніх значень приземного атмосферного тиску для інших місяців сезонів представлені у Додатку (А.1-А.7).

На рис. 2.2 представлено поле середніх значень атмосферного тиску для січня. Як видно, над морями Уедделла и Беллінсгаузена спостерігаються два кліматичних циклони південної полярної області. Однак можна бачити, що циклон над морем Уедделла більш виразний, тиск в якому досягає 986,0 гПа. Над південно-східною частиною Антарктичного півострова простежується слабо виражений баричний гребінь континентального антициклону.

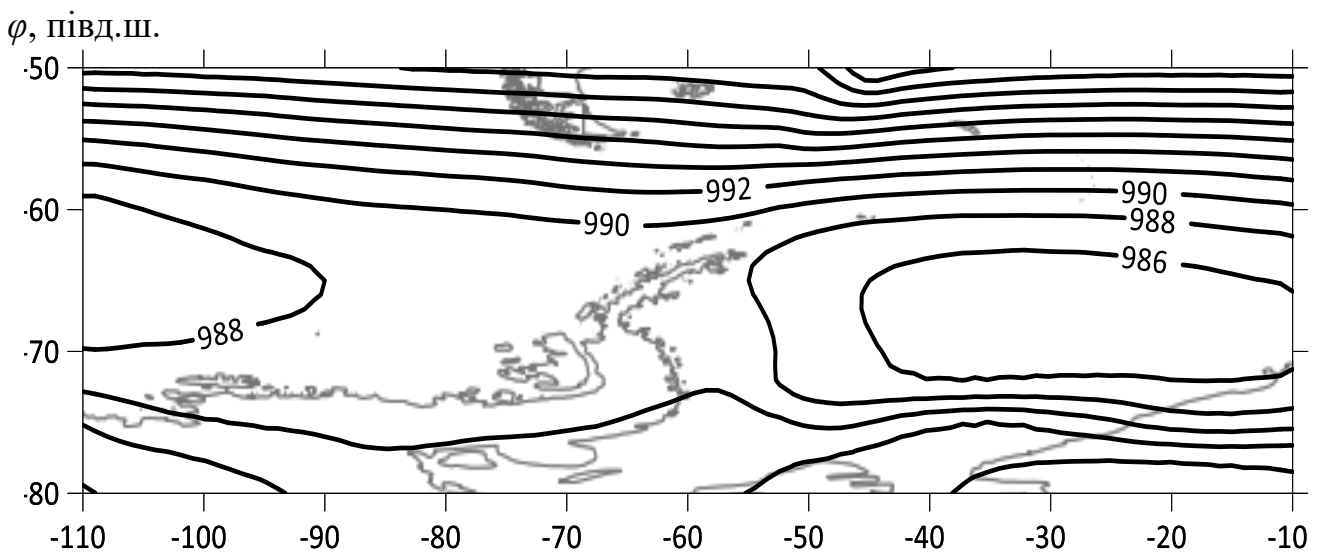


Рисунок 2.2 – Поле середніх значень атмосферного тиску в січні

На рис. 2.3 представлено поле середніх значень в квітні. Треба відмітити, що кліматичні циклони над морями Беллінсгаузена та Уедделла посилюються, а також баричний гребінь, який спостерігається над південно-східною частиною Антарктичного півострова стає більш виразним, що пов'язано посиленням континентального антициклону та адвекцією холодного повітря.

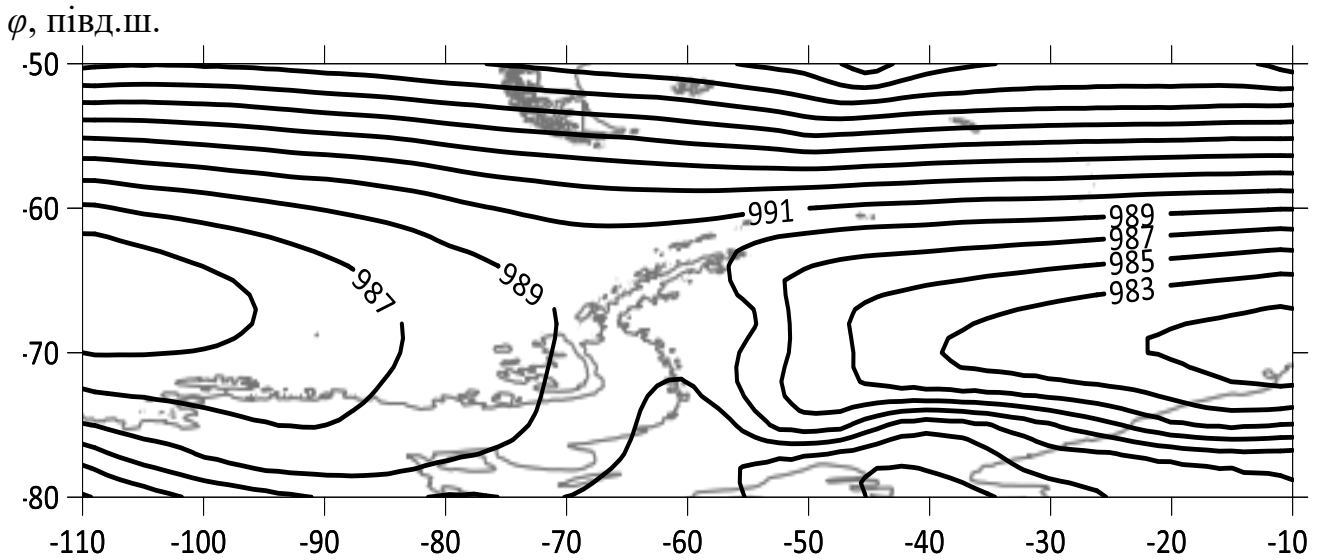


Рисунок 2.3 – Поле середніх значень атмосферного тиску в квітні

У липні (рис.2.4) зональний розподіл ізобар розповсюджується і охоплює більшу частину регіону, що пов'язано з посиленням західно-східного переносу у зимовий період, тому циклони трохи зміщується в більш високі широти особливо над морем Уедделла, а циклон моря Беллінсгаузена охоплює більшу частину Антарктичного півострова і формує відповідні погодні умови над ним, збільшення швидкості вітру та опадів.

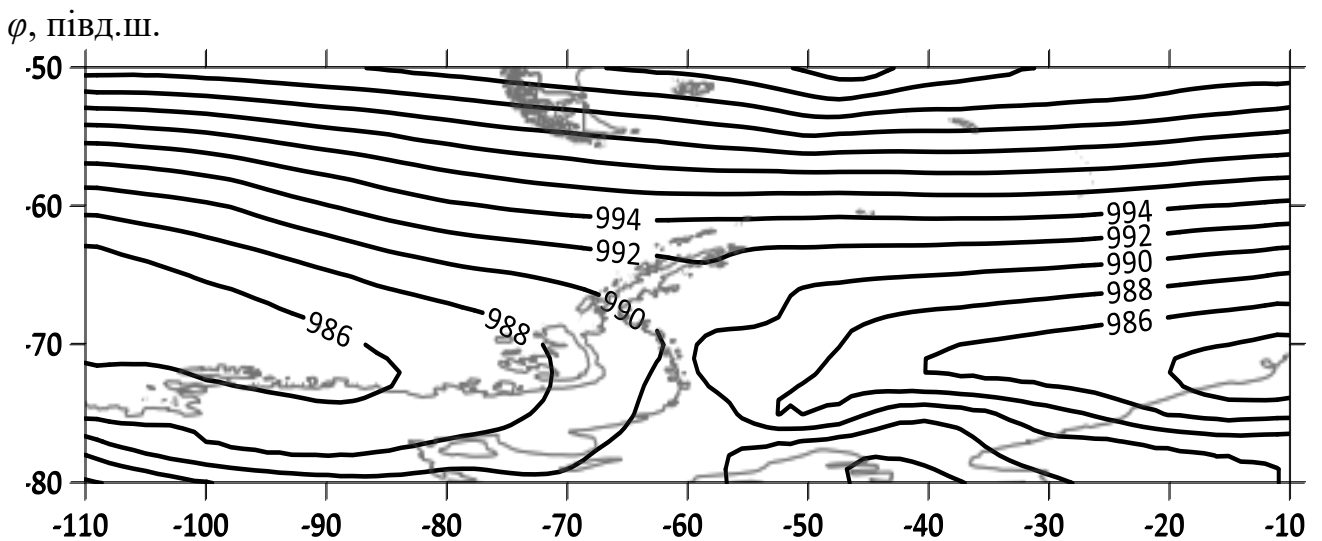


Рисунок 2.4 – Поле середніх значень атмосферного тиску в липні

Треба відмітити, що континентальний гребінь високого тиску над південно-східною частиною Антарктичного півострова зникає, але утворюється незначний гребінь субтропічного максимуму над північною частиною Антарктичного півострова.

Восени (рис. 2.5) структуру ізобар схожа з полем тиску у квітні. Простежується наявність слабкого гребня континентального антициклону над південно-східною частиною Антарктичного півострова. Також слід зазначити, що у жовтні кліматичні циклони досягають найбільшого поглиблення: Беллінсгаузена – 984 гПа та Уедделла – 978 гПа.

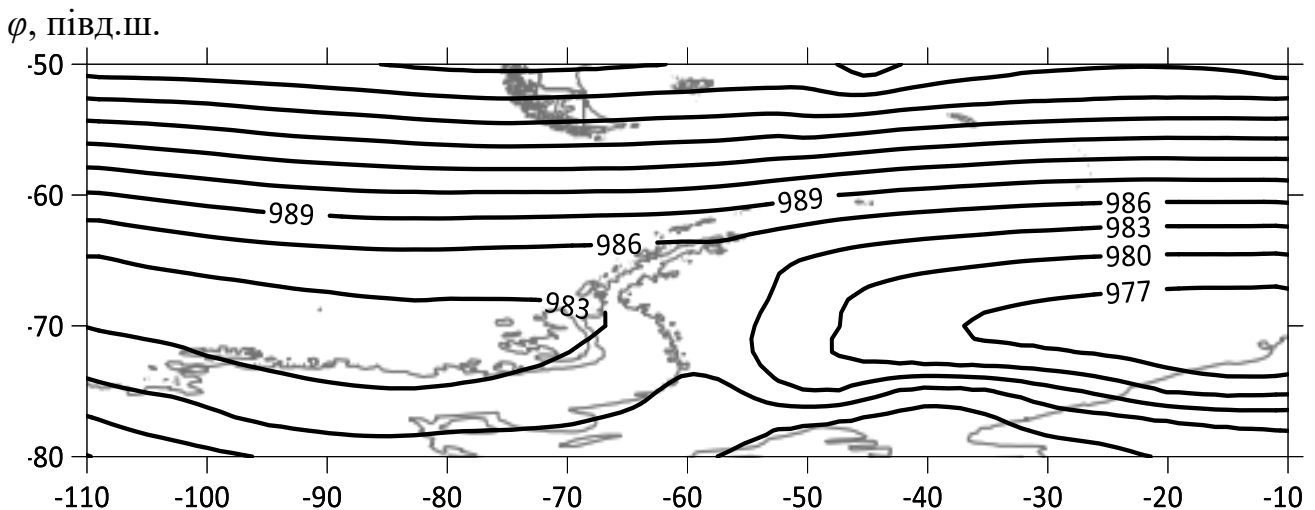


Рисунок 2.5 – Поле середніх значень атмосферного тиску в жовтні

Подалі розглянемо особливості полів середніх квадратичних відхилень приземного атмосферного тиску. Поля середніх квадратичних відхилень, як відомо характеризують мінливість випадкових величин. В якості прикладу розглянемо поля мінливості для центральних місяців сезонів (рис. 2.6-2.9). Поля мінливості для всіх інших місяців року представлені у додатку (А.8-А.14).

У січні (рис. 2.6) над морями Беллінсгаузена та Уедделла розташовуються значні області максимальної мінливості, що досягають 5 гПа, які пов'язані з формуванням в цих районах кліматичних циклонів, положення яких добре узгоджується з картами середніх значень атмосферного тиску. У північній частині

регіону розташовується область незначних значень середніх квадратичних відхилень

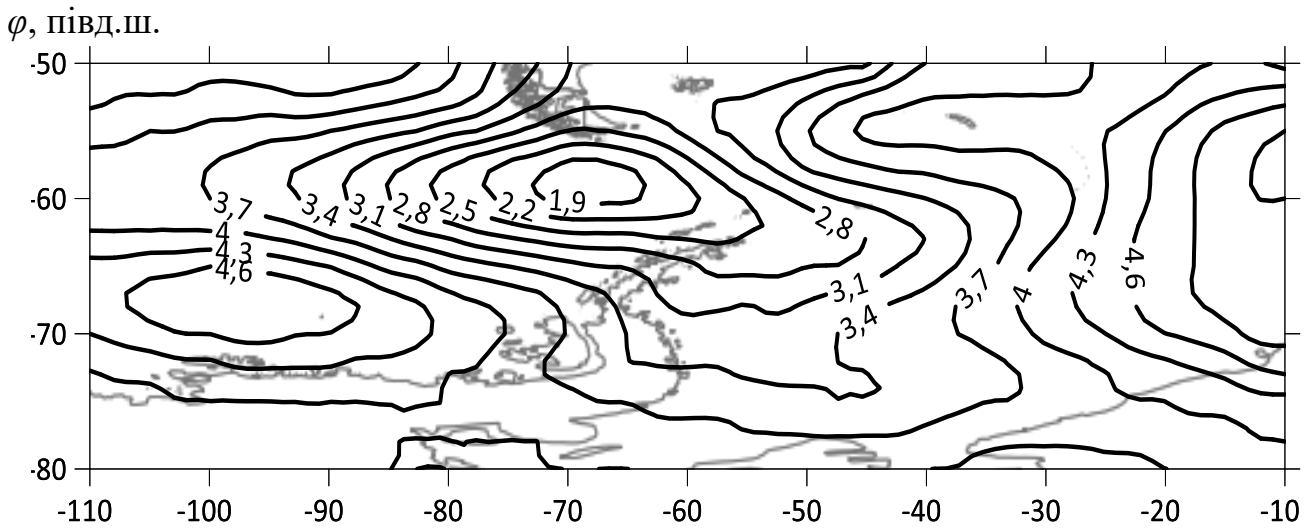


Рисунок 2.6 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в січні

В зимовий період (рис. 2.7) спостерігається значне збільшення значень середніх квадратичних відхилень полів тиску, особливо над кліматичним циклоном, який формується над морем Уедделла, досягаючи 9,6 гПа в червні та 8,4 гПа в липні, що пов'язано зі значним посиленням західного переносу та коливаннями тиску в центрі циклону.

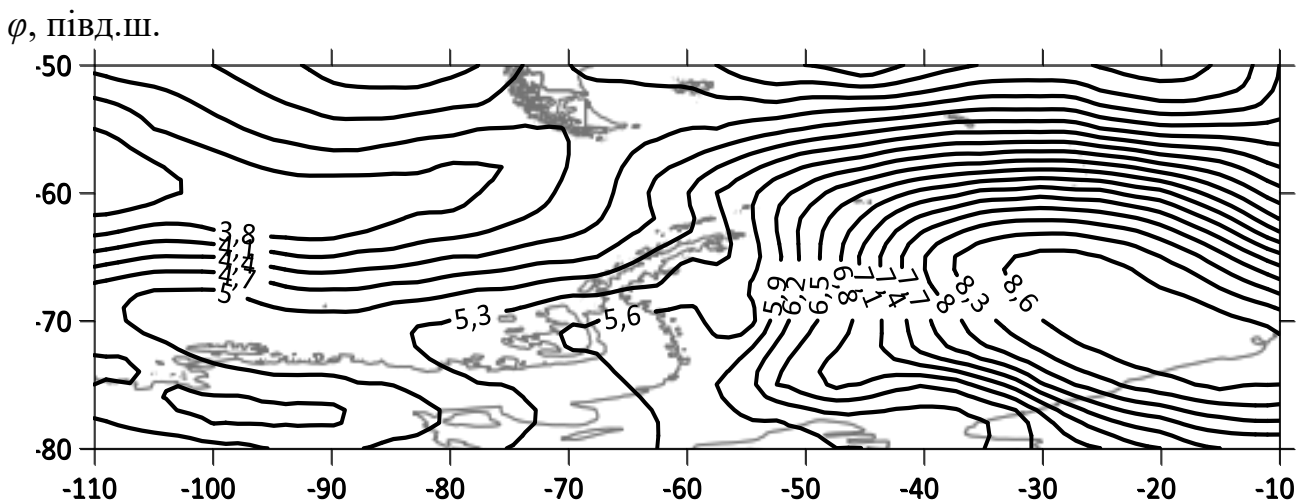


Рисунок 2.7 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в липні

У перехідні сезони, в квітні (рис. 2.8) та жовтні (рис. 2.9), поля мають схожу структуру: зони максимальної мінливості спостерігаються над морями Уедделла та Беллінсгаузена.

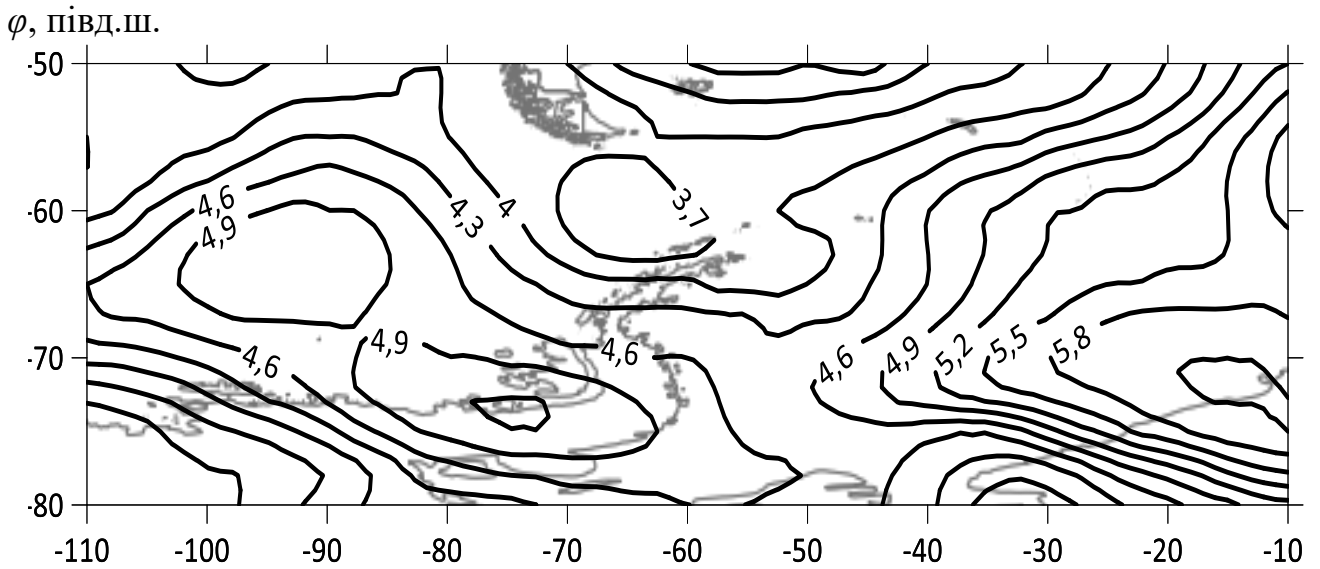


Рисунок 2.8 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в квітні

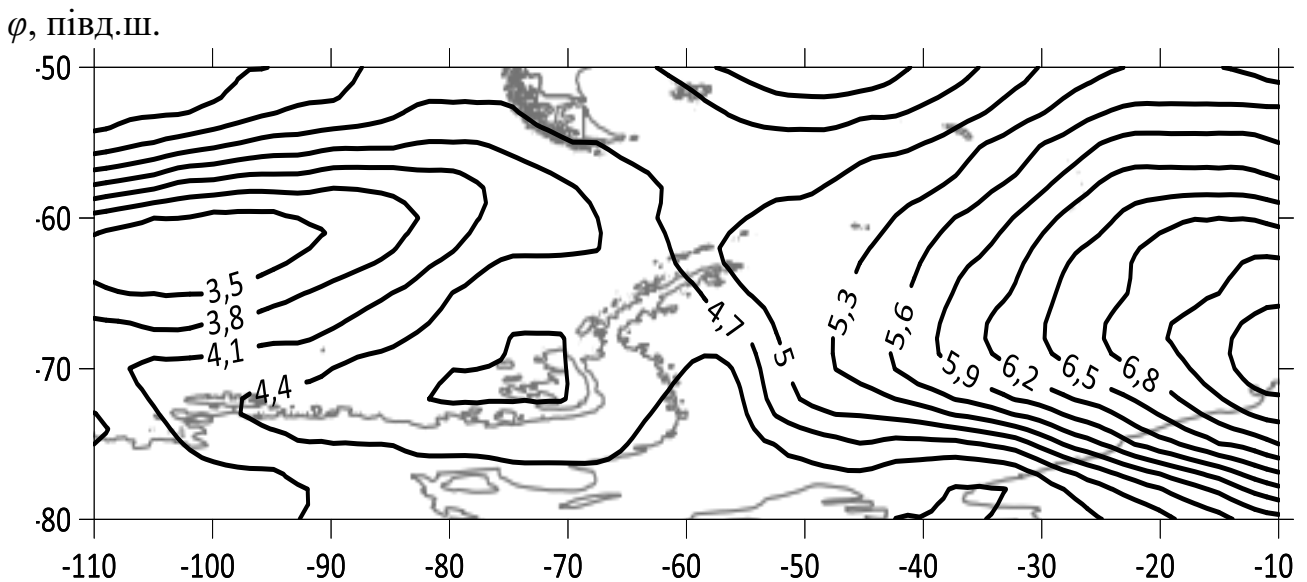


Рисунок 2.9 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в жовтні

Але у жовтні, над морем Беллінсгаузена простежуються більші значення середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску ніж у квітні.

Подалі, з метою виявлення динаміки процесів мінливості полів атмосферного тиску, був проведений порівняльний аналіз отриманих полів середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску з відповідними полями за період 1958-1998 р.р., які отримані за результатами дослідження магістерської роботи [34].

На рис. 2.10 та 2.11 представлені поля середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску на рівні моря в січні та липні за періоди 1958-1998 р.р. [34].

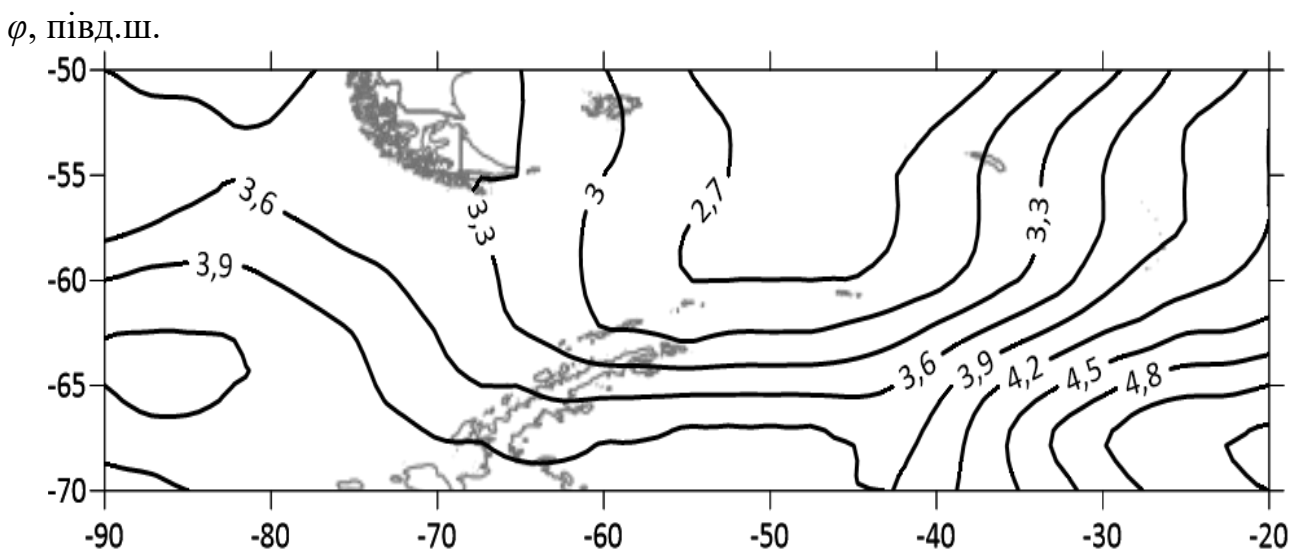


Рисунок 2.10 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску на рівні моря (січень), за період 1958-1998 р.р.

Треба відмітити, що зони максимальних значень середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску не змінили свого розташування, але за попередній період вони досягали більших значень. Відповідно, можна зробити висновок про зменшення інтенсивності коливання атмосферного тиску в останні роки. Також помітно відмічається зміна конфігурації ізолій, а саме, в останні роки поля мають більш плямисту структуру, ніж за попередній період 1958-1998 рр., особливо в липні, що може бути пов'язано з послабленням західно-східного переносу в останні

роки. Але остаточно стверджувати про це складно, тому що періоди осереднення не однакові.

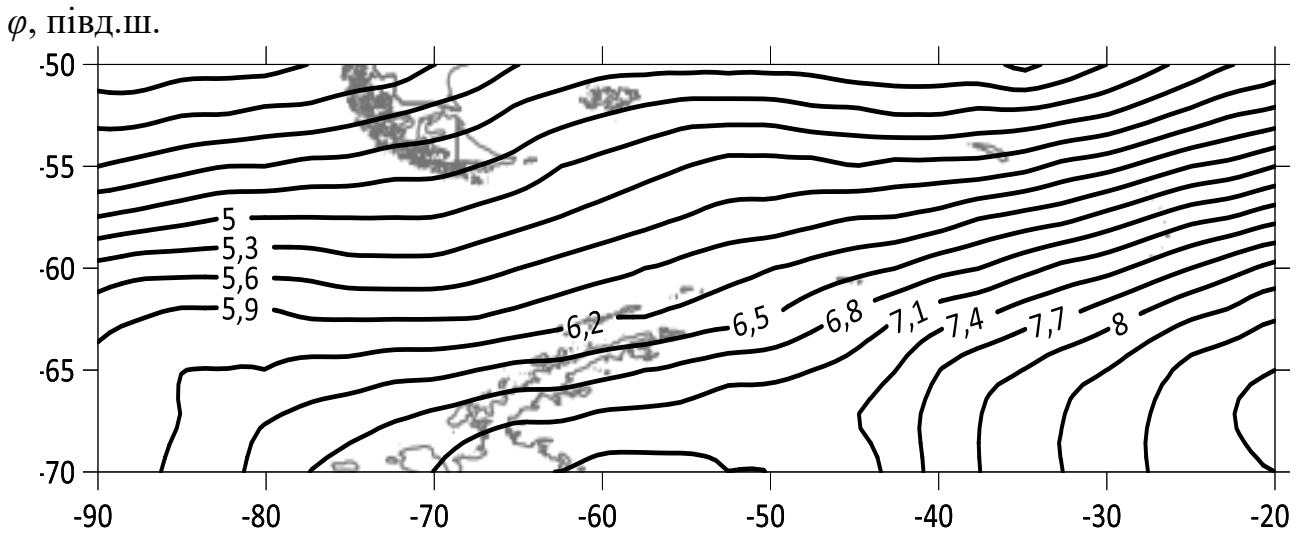


Рисунок 2.11 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску на рівні моря (липень), за період 1958-1998 р.р.

### 3 КОМПОНЕНТНИЙ АНАЛІЗ ПОЛІВ ПРИЗЕМНОГО ТИСКУ

#### 3.1 Алгоритм дослідження

Використання статистичних методів при вирішенні метеорологічних задач пов'язано з рядом труднощів, таких як, не підпорядкованість у багатьох випадках метеорологічних величин нормальному закону розподілу, неоднорідність і неізотропність метеорологічних полів, не стаціонарність випадкових процесів та ін. Ефективним при цьому є такий шлях вирішення, який полягає в тому, що проводиться параметризація складу факторів: у моделі використовуються нові величини, що є лінійними комбінаціями початкових параметрів. Нові фактори повинні бути взаємно некорельованими (ортогональними) і щоб при можливо меншій їх кількості враховувалася значна частина мінливості початкових параметрів. Перерахованим вимогам відповідає компонентний аналіз, який часто в літературі називають методом «емпіричних ортогональних функцій».

Компонентний аналіз застосовується і при вирішенні інших метеорологічних задач. Однією з них є стиснення метеорологічної інформації (значне скорочення кількості інформації при збереженні основного її змісту).

Іншим важливим завданням, є фільтрації метеорологічної інформації. Її суть полягає в наступному. Поля метеорологічних величин, а також інші метеорологічні об'єкти, формуються під дією атмосферних процесів різних масштабів: процесів макромасштабу, синоптичного масштабу, мезомасштаба і процеси ще дрібнішого масштабу. В результаті метеорологічна інформація набуває шумової компоненту, обумовлену дрібномасштабними флуктуаціями, погрішностями вимірювань і первинною обробкою результатів спостережень. Часто з'являється необхідність, залежно від характеру завдання при вивченні явищ погоди, зосередити увагу на найбільш великомасштабних процесах і не враховувати складові, які обумовлені впливом процесів дрібного масштабу. Для цього також застосовується компонентний аналіз Розглянемо стисло його ідеї [29].



Маємо деяке поле центрованих значень метеорологічної величини  $\Delta X_j$  :

$$\Delta X_j = \begin{pmatrix} \Delta x_{1j} \\ \Delta x_{2j} \\ \dots\dots \\ \Delta x_{nj} \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Здійснимо параметризацію цього поля, тобто виразимо поле, яке визначене значеннями метеорологічної величини на безлічі точок простору, за допомогою декількох некорельованих параметрів, лінійно пов'язаних з компонентами випадкового вектора (3.1) і які включають основну інформацію про поле. У основі рішення цієї задачі лежить лінійне ортогональне перетворення початкового поля (3.1) в базисі власних векторів матриці коваріацій (або кореляцій) полів цієї метеорологічної величини. Матричне рівняння повної проблеми власних значень має вигляд:

$$K_x u_i = \lambda_i u_i. \quad (3.2)$$

У цьому рівнянні  $K_x$  -  $n$  - вимірна матриця коваріації;  $u_i$  -  $i$  - тий власний вектор;  $\lambda_i$  - відповідні власне значення матриці  $K_x$ .

Існує така теорема: власні значення позитивно визначеної, симетричної і дійсної матриці є дійсними, позитивними і простими числами. Оскільки матриця коваріації задовольняє умовам цієї теореми, власні значення мають відмічені в теоремі властивості.

Власні значення розташовуються в порядку їх зменшення

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_n. \quad (3.3)$$

Першому власному значенню  $\lambda_1$  відповідає перший власний вектор

$$u_i = \begin{pmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ \dots \\ u_{n2} \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

другому власному значенню  $\lambda_2$  - відповідає другий власний вектор і так далі.

Найчастіше власні вектори нормуються: замість векторів  $u_i (i = \overline{1, n})$  використовуються власні вектори

$$W_i = \frac{u_i}{|u_i|}. \quad (3.5)$$

Відмічені властивості власних векторів дають можливість розглядати їх як базис  $n$  – мірного евклідового простору  $R^n$  [29]. Виходячи з цього, проведемо розкладання вектора  $\Delta X$ , що представляє який-небудь метеорологічний об'єкт, в цьому базисі. Відповідне перетворення має вигляд:

$$W' \Delta X_j = z_j. \quad (3.6)$$

Оскільки базис власних векторів є ортогональним, то компоненти

$z_{ij} (i = \overline{1, n})$  вектора  $z_j$

$$z_j = \begin{pmatrix} z_{1j} \\ z_{2j} \\ \dots \\ z_{ij} \\ \dots \\ z_{nj} \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

є лінійно незалежними, а в статистичному сенсі некорельованими.

Як відомо, чим більшим є масштаб збурень у полях метеорологічної величини, що вивчається, тим більше значення має дисперсія, яка характеризує мінливість цієї величини. Тому  $\lambda_1 = \sigma_{Z_1}^2$  відбиває властивості найбільш великомасштабних процесів у цьому полі, які містяться у ортогональних компонентах  $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, \dots, Z_{1m}$ .

Власне значення  $\lambda_2 = \sigma_{Z_2}^2$  характеризує властивості процесів меншого масштабу, як і послідовність других ортогональних компонентів  $Z_{21}, Z_{22}, Z_{23}, \dots, Z_{2m}$ . Таким чином, можна визначити за допомогою формули

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3.8)$$

Кількість  $k$  ортогональних компонентів, сумарна дисперсія котрих  $\sum_{i=1}^k \lambda_i$  ураховує  $\eta$  долю сумарної дисперсії вихідного метеорологічного поля. Ці перші  $k$  ортогональних компонентів називають головними компонентами. Саме вони утримують основну інформацію про статистичну структуру полів метеорологічної величини, що досліджується. Останні  $n - k$  ортогональні компоненти характеризують дрібномасштабні збурення та шумову компоненту.

Оскільки головні компоненти отримують шляхом ортогонального перетворення кожного вихідного вектора (поля) відповідним власним вектором, то перші  $k$  власні вектори також відбивають впливи відповідних великомасштабних процесів, формуючих метеорологічні поля. Причому перший власний вектор  $W_1 = \{W_{s1}\} (s = \overline{1, n})$  характеризує особливості процесів найбільшого масштабу, другий власний вектор  $W_2 = \{W_{s2}\} (s = \overline{1, n})$  – меншого масштабу і т.д. Виявленню зазначених особливостей цих процесів допомагає аналіз структури полів цих власних векторів.

### 3.2 Власні значення та власні вектори матриці коваріації

У розділі 3.1 було відмічено, що власні значення мають сенс дисперсій ортогональних компонент полів приземного тиску. Оскільки сума всіх власних значень дорівнює сумарній дисперсії полів та власні значення упорядковані, а саме, розташовуються у порядку зменшення і характеризуються швидкою сходимістю, то як правило перші з них вичерпують значний відсоток від сумарної дисперсії полів. Саме цей відсоток і відноситься до найбільш великомасштабних циркуляційним атмосферним процесам. Властивості цих процесів висвітлюють ортогональні компоненти полів приземного тиску, які називають головними компонентами. Їх значення отримують шляхом ортогонального перетворення полів приземного тиску власними векторами, які відповідають вказаним вище власним значенням. Тому поля цих перших власних векторів відбивають властивості полів тиску, а саме властивості найбільш великомасштабних циркуляційних процесів.

У табл. 3.1 містяться величини перших двох власних значень, які вичерпують більшу частину (більше 60%) від сумарної дисперсії полів приземного тиску.

Аналіз табл. 3.1 вказує на те, що найбільша енергія циркуляційних процесів на літній період (січень). Найменша сумарна дисперсія спостерігається у квітні.

Як видно з табл. 3.1, перше власне значення вносить найбільший вклад у сумарну дисперсію полів приземного тиску, тому поля перших власних векторів, що відповідають цим власним значенням, відбивають властивості найбільш великомасштабних циркуляційних атмосферних процесів.

В якості прикладу на рис. 3.1-3.4, представлені поля перших власних векторів приземного тиску для центральних місяців календарних сезонів. Для всіх інших місяців поля представлені у додатку (Б.1-Б.8).

Таблиця 3.1 – Власні значення матриці коваріації полів приземного атмосферного тиску

Місяць	Власні значення				
	$\lambda_1$	$\lambda_1, \%$	$\lambda_2$	$\lambda_2, \%$	$\sum_{i=1}^3 \lambda_i, \%$
Січень	283,5	53	111,8	21	74
Лютий	260,8	49	108,2	20	69
Березень	268,3	50	103,2	19	69
Квітень	186,1	35	156,4	29	64
Травень	223,3	42	151,6	29	71
Червень	226,7	43	114,0	21	64
Липень	265,5	50	102,1	19	69
Серпень	271,4	51	91,5	17	68
Вересень	275,3	52	131,0	25	77
Жовтень	271,8	51	105,5	20	71
Листопад	276,5	52	119,3	22	74

Поле першого власного вектора змінює свою конфігурацію у продовж року. Як видно у січні (рис. 3.1), над більшою частиною регіону ізолінії мають майже зональний розподіл, що характеризує найбільш великомасштабний атмосферний процес – західний перенос. На півночі регіону формується значна область додатних значень з центром  $52^\circ$  півд.ш. та  $60^\circ$  зах.д., яка може бути пов’язана зі сталим центром дії атмосфери субтропічного поясу високого тиску – Південно-Атлантичним антициклоном.

В осінній період (рис. 3.2), поле першого власного вектора змінює свою конфігурацію, воно розділяється на дві майже рівнозначні області з різними знаками у центрах.

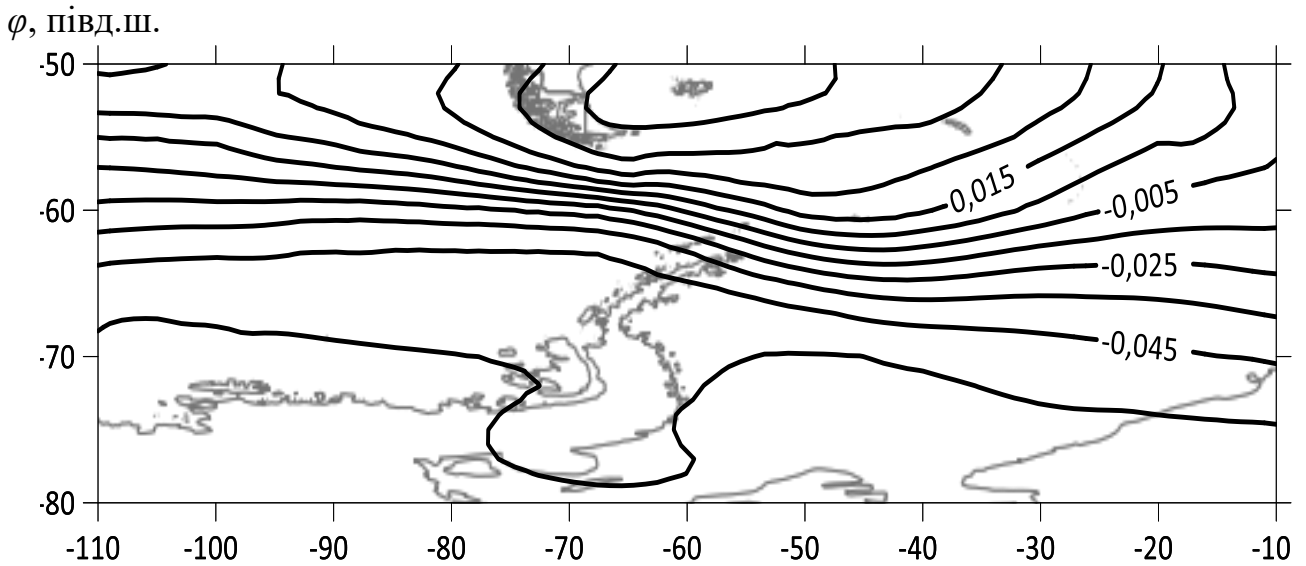


Рисунок 3.1 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, січень

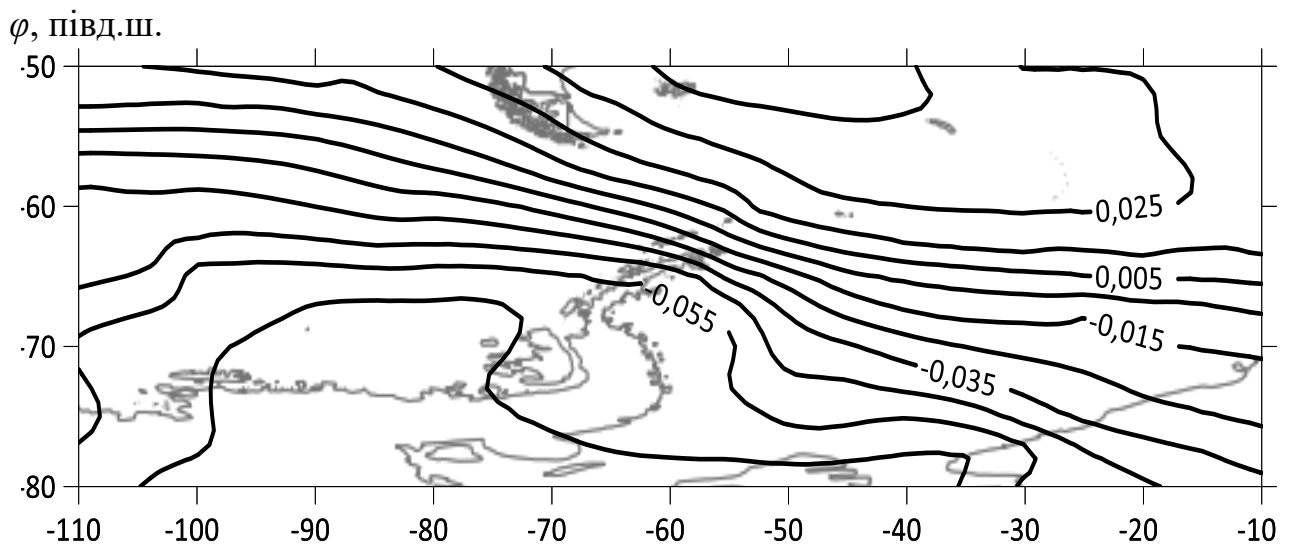


Рисунок 3.2 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, квітень

В зимовий період (рис. 3.3), спостерігається перебудова поля першого власного вектора: формується значної області додатних значень, що може бути пов'язано з посиленням циркумполярного циклонічного вихору навколо Антарктичного континенту за рахунок посилення температурних контрастів між екватором і полюсом.

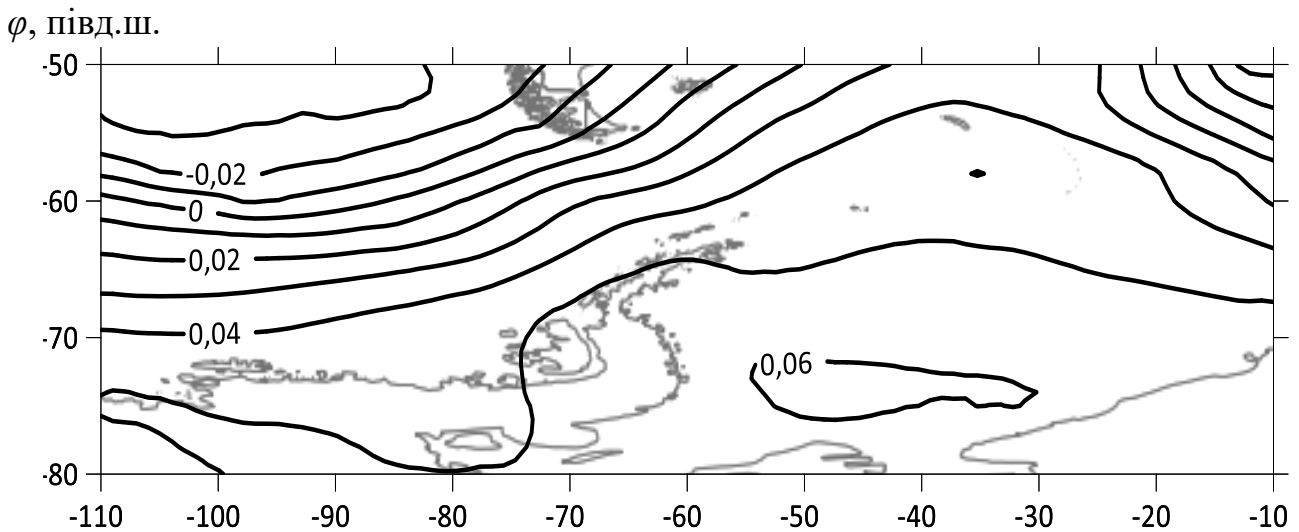


Рисунок 3.3 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, липень

Весною (рис. 3.4), спостерігається незначна перебудова поля першого власного вектора: області додатних значень змінює свою конфігурацію, утворюючи гребень в північно-східному напрямі.

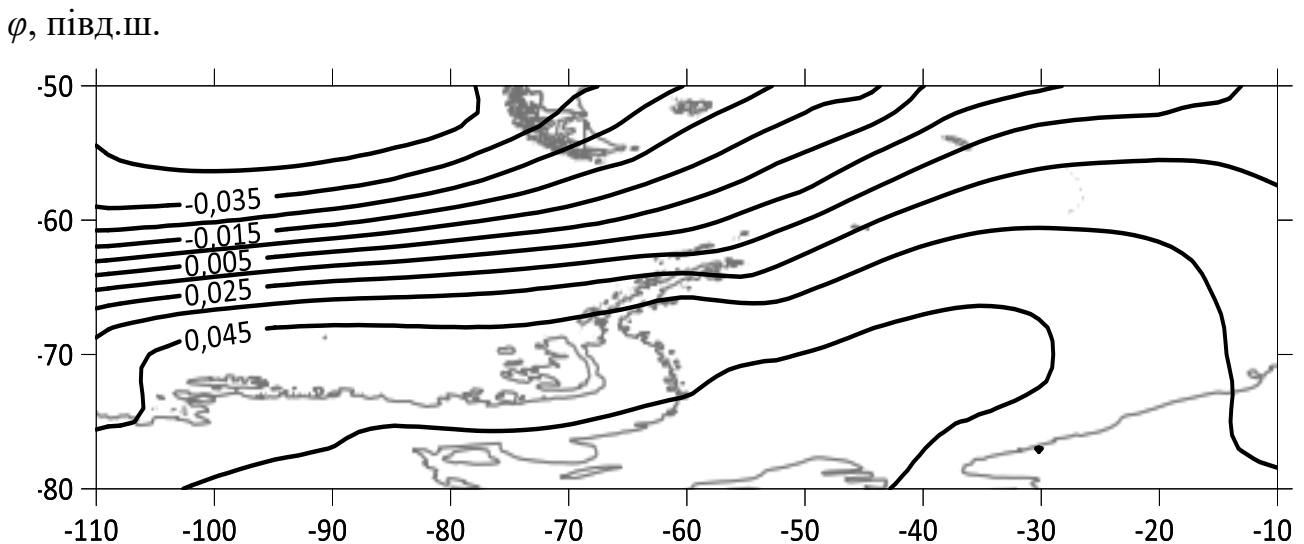


Рисунок 3.4 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, жовтень

Як видно з представлених полів перших власних векторів, вони дійсно відбивають найбільш великомасштабні риси циркуляційних атмосферних процесів в регіоні, а саме західно-східний перенос та сталі центри дії атмосфери південної півкулі.

Подалі розглянемо поля другого власного вектора атмосферного тиску, які відбивають характер процесів меншого масштабу (рис. 3.5-3.8). Поля другого власного вектора атмосферного тиску для інших місяців представлені у Додатку (Б.9-Б.14).

Як видно, в продовж всього року поля другого власного вектора атмосферного тиску мають вигляд двомодального колювання, з формуванням значних областей протилежного знаку над морями Беллінсгаузена та Уедделла.

$\varphi$ , півд.ш.

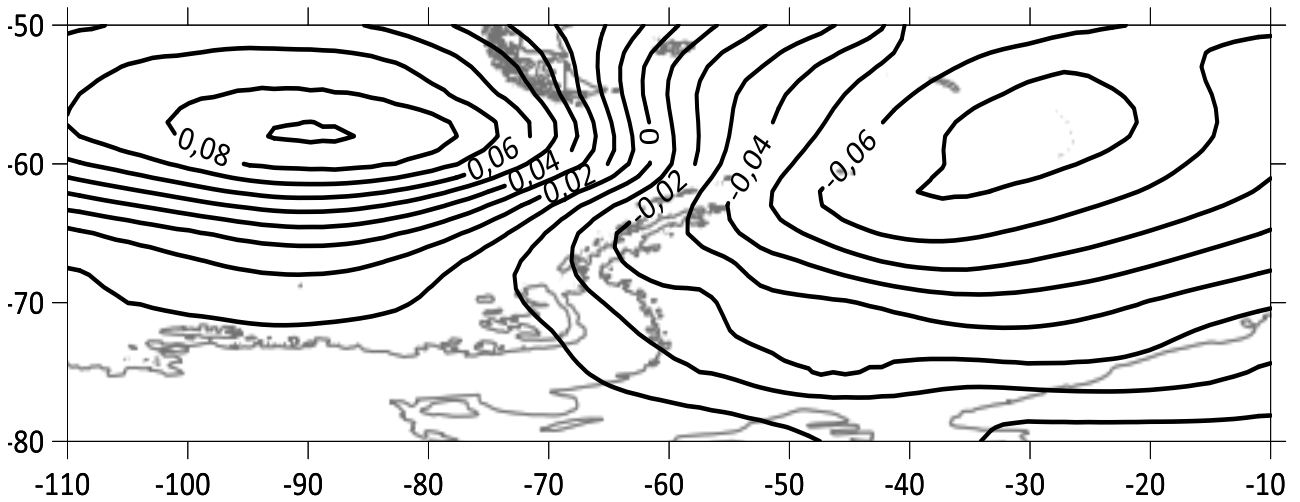


Рисунок 3.5 – Поле другого власного вектора атмосферного тиску, січень

$\varphi$ , півд.ш.

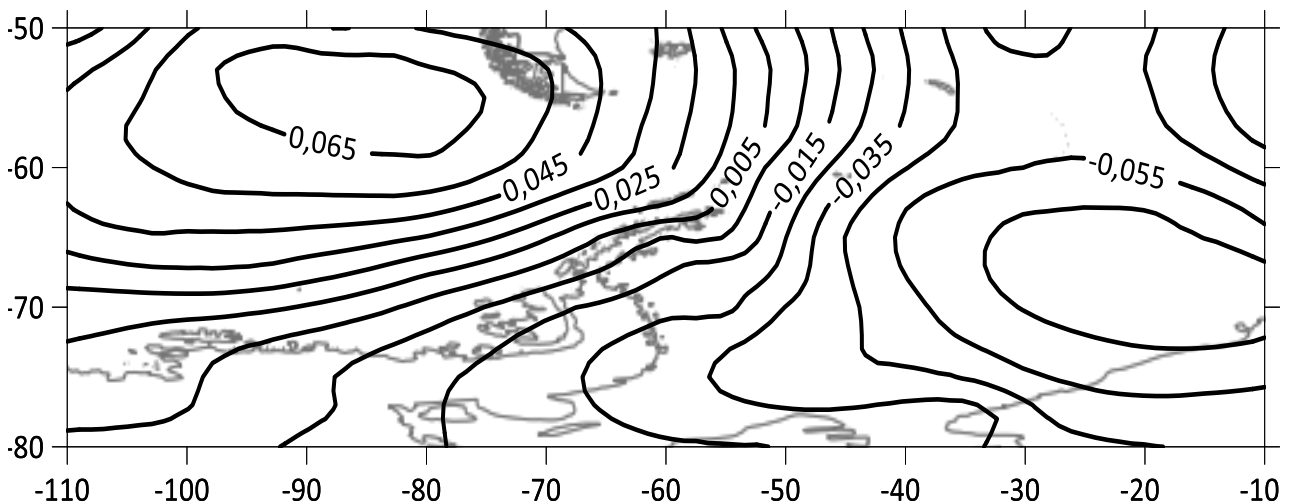


Рисунок 3.6 – Поле другого власного вектора атмосферного тиску, квітень



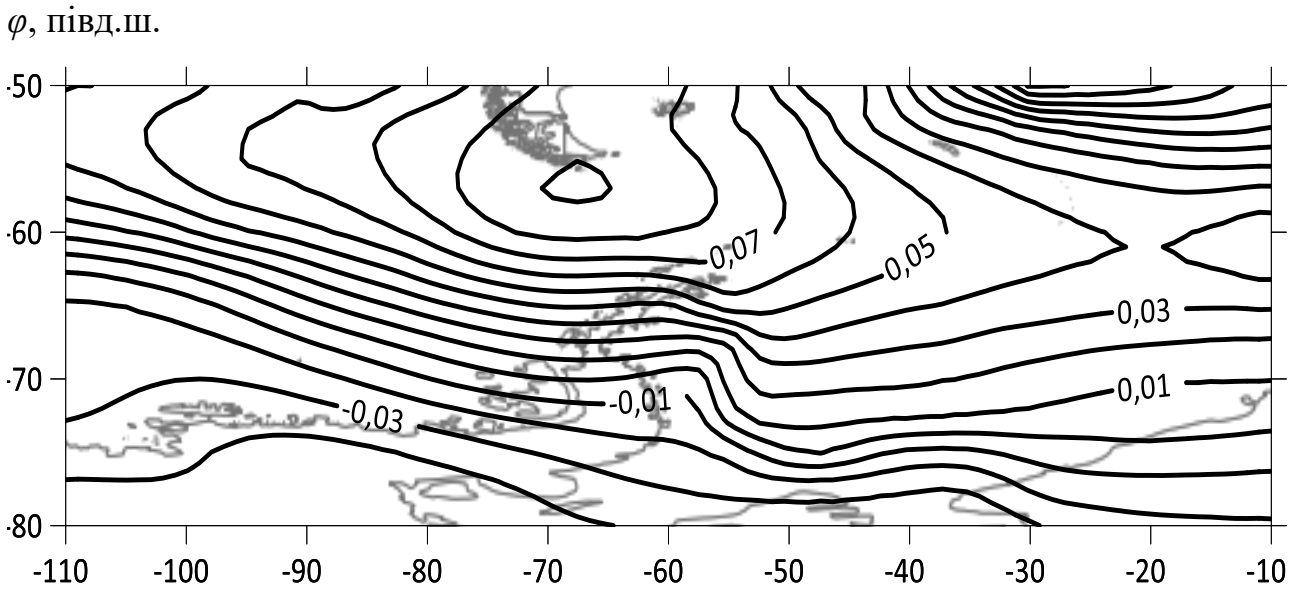


Рисунок 3.7 – Поле другого власного вектора атмосферного тиску, липень

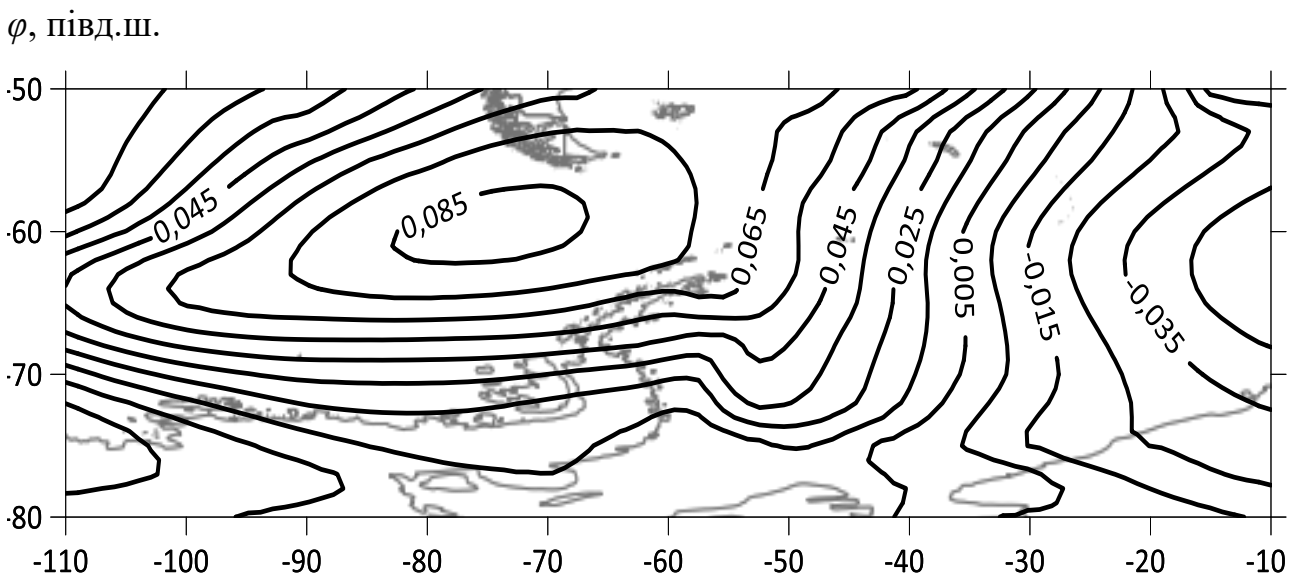


Рисунок 3.8 – Поле другого власного вектора атмосферного тиску, жовтень

Така структура полів других власних векторів свідчить про постійну наявність осциляції в атмосферних процесах між південними частинами Тихого і Атлантичного океанів. Зазначена осциляція обумовлена частим формуванням областей підвищеного тиску над морями Беллінсгаузена і Амундсена і циклонічних утворень над морем Уедделла, які мають кліматичний характер.

### 3.3 Часові ряди головних компонент полів атмосферного тиску

Як відмічалось в 3 розділі, шляхом ортогонального перетворення полів приземного тиску в базису власних векторів були отримані ортогональні компоненти. Аналіз власних значень показав, що більше 60% сумарної дисперсії полів приземного тиску вичерпують перші два власні значення. Їх докладний аналіз приводиться в пункті 3.2. Оскільки, як було вказано вище, власними значеннями є дисперсії ортогональних компонент, перші компоненти несуть в собі основну інформацію про статистичну структуру полів приземного тиску, тобто грають роль головних компонент цих полів.

Аналіз полів власних векторів підтвердив той факт, що загальні найбільш важливі риси процесів, що впливають на циркуляційний режим регіону, відбиваються в їх структурі. Тому подальшому розгляду будуть підвергнуті перші дві головні компоненти.

Для кожної компоненти були побудовані графіки часових рядів  $Z_i(t)$  ( $i=1, 2$ ), з дискретністю 1 місяць, довжина ряду склала 228 значень. На рис. 3.9 та 3.10 представлені графіки першої  $Z_1(t)$  і другої  $Z_2(t)$  головних компонент приземного атмосферного тиску.

Графіки часових рядів головних компонент приземного атмосферного тиску свідчать про те, що вони містять не тільки коливання, які обумовлені циркуляційними процесами в даному регіоні, але і шумову компоненту. Позбавитися від неї можна шляхом операції фільтрації за допомогою ковзного осереднення [29]. Вагові множники при цьому мають вигляд, який прийнято називати косинус – фільтром. Він дозволяє проводити ковзне осереднення так, щоб максимальне значення приписувалося точці, яка є серединою інтервалу згладжування.

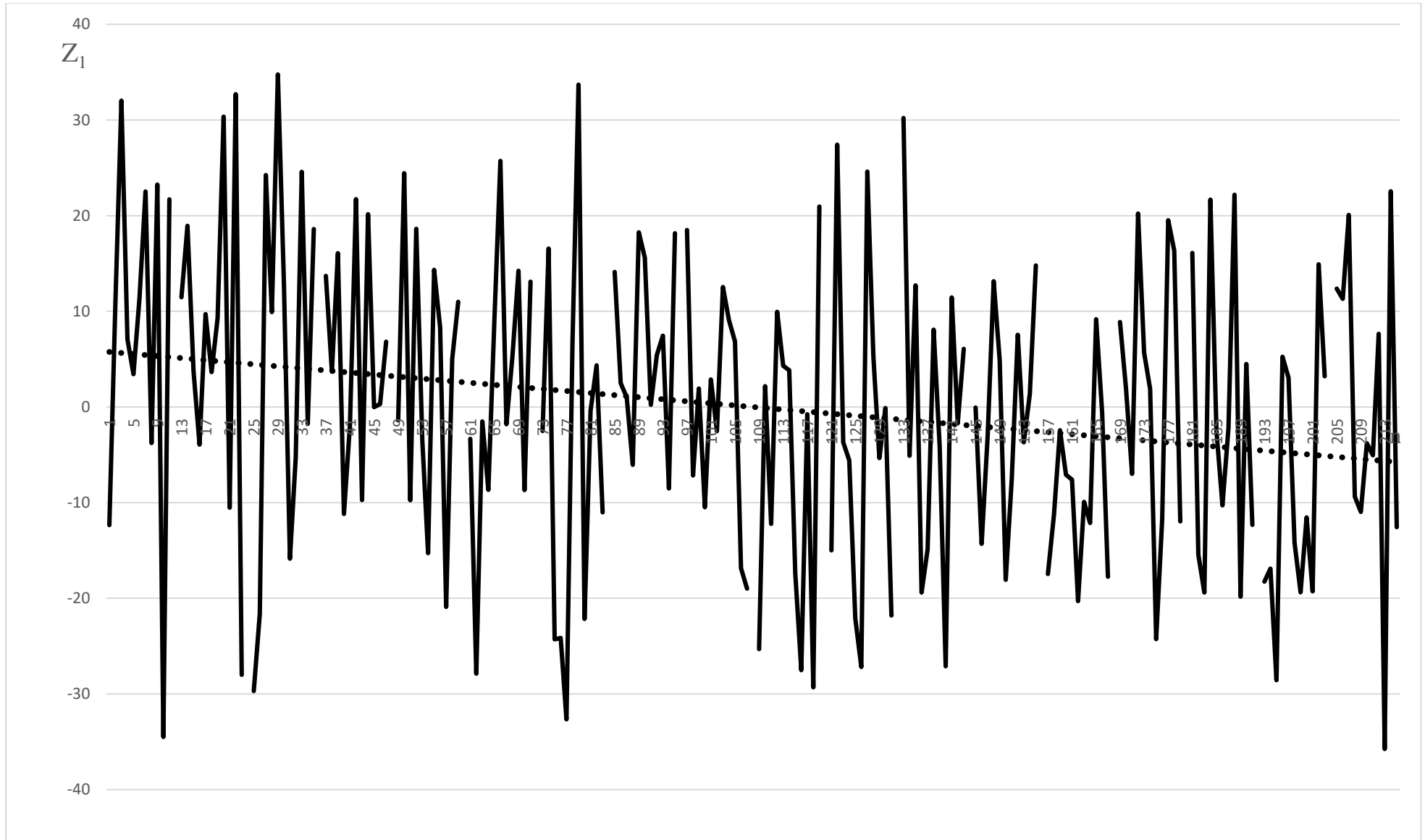


Рисунок 3.9 – Часовий ряд першої головної компоненти приземного тиску за період 2000 – 2018 р.р.

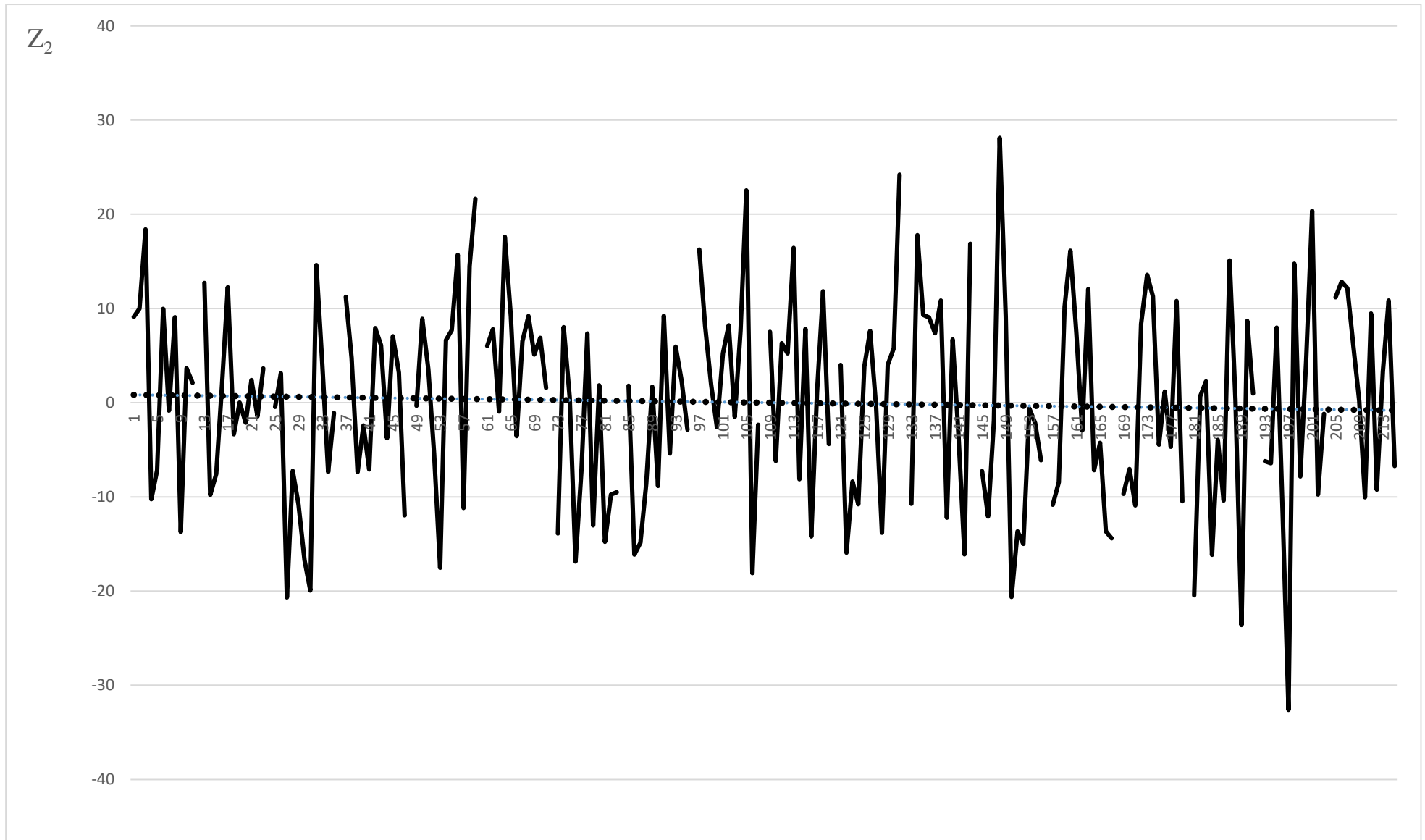


Рисунок 3.10 – Часовий ряд другої головної компоненти приземного тиску за період 2000 – 2018 р.р.

Від останнього залежить і жорсткість фільтру, а також його реакція. Тому вибір інтервалу згладжування є важливим завданням. Існують різні підходи для вирішення цієї задачі. На наш погляд, доцільно як період згладжування вибирати інтервал, який відповідає періодичності, що має велику енергію коливання з одного боку, і достатньо великий інтервал згладжування – з іншого. Такі періодичності можна встановити за допомогою перетворення Фур'є. Тому в подальшій роботі будуть проведені відповідні дослідження.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання наукової роботи можна зробити наступні висновки:

1. Досліджено річну динаміку полів приземного атмосферного тиску та центрів дії атмосфери за період 2000-2018 р.р. В липні зональний розподіл ізобар охоплює більшу частину регіону, що пов'язано з посиленням західно-східного переносу у зимовий період, циклони трохи зміщується в більш високі широти.

2. Проведений порівняльний аналіз середніх полів приземного атмосферного тиску періоду 2000-2018 р.р. з періодом 1961-1971 р.р., 1971-1980 р.р., 1991-2000 р.р. Порівняльний аналіз між полями мінливості атмосферного тиску за періоди 1958-1998 рр. та 2000-2018 рр. дозволив зробити висновок про зменшення інтенсивності коливання атмосферного тиску в останні роки. Також помітно відмічається зміна конфігурації ізоліній.

3. Розглянуті сезонні особливості полів середніх квадратичних відхилень приземного атмосферного тиску. Взимку спостерігається значне збільшення значень середніх квадратичних відхилень полів тиску, що пов'язано з посиленням західного переносу й збільшенням горизонтальних градієнтів тиску.

4. За допомогою компонентного аналізу була проведена процедура стиснення вихідної інформації та досліджено особливості найбільш великомасштабних атмосферних процесів. Визначені власні значення та відповідні їм власні вектори полів тиску. Аналіз власних значень показав, що більшу частину від сумарної дисперсії полів вичерпують перші два власних значення полів атмосферного тиску, тому відповідні поля власних векторів відображають характер найбільш великомасштабних атмосферних процесів.

5. Досліджено сезонну динаміку полів власних векторів та їх особливості. Поле першого власного вектора має схожу структуру впродовж всього року. Над більшою частиною регіону ізолінії мають майже зональний розподіл, що характеризує найбільш великомасштабний атмосферний процес – західний перенос. На півночі регіону формується значна область додатних значень, яка

може бути пов'язана зі сталим центром дії атмосфери субтропічного поясу високого тиску – Південно-Атлантичним антициклоном.

6. Поля другого власного вектора атмосферного тиску впродовж всього року мають вигляд двомодального коливання, з формуванням значних областей протилежного знаку над морями Беллінсгаузена та Уедделла. Така структура полів других власних векторів свідчить про постійну наявність осциляції в атмосферних процесах між південними частинами Тихого і Атлантичного океанів.

7. Визначені багаторічні змінення характеру атмосферної циркуляції регіону Антарктичного півострова (як одного з внутрішніх кліматоутворювальних факторів), на наш погляд, можуть бути враховані в довгострокових прогнозах погоди для Західної Антарктиди та для вивчення змін і коливань сучасного глобального клімату.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. Под ред. Крутский Б.А. С. Петербург, Гидрометеиздат, 1991р. 200с.
2. Энциклопедия «Кругозор». Разделы Арктика и Антарктика.
3. Русин Н.П. Метеорологический и радиационный режим Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1961р. 448с.
4. Davis C.H. Snowfall driven growth in East Antarctic ice sheet mitigates recent sea level rise / C.H. Davis [et al.] //Science. 2005. V. 308, № 5730. P. 1898 - 1901.
5. Payne A.J. Recent dramatic thinning of largest West Antarctic ice stream triggered by oceans / A.J. Payne [et al.] // Geophysical Research Letters. 2004р. V. 31, № 23. P. 401.
6. Котляков В.М. Ледовый баланс Антарктиды / В.М. Котляков, К.С. Лосев, И.А. Лосева // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1977р. №. 1. С. 5-15.
7. Петров В.Н. Атмосферное питание ледникового покрова Антарктиды / В.Н. Петров. Л.: Гидрометеиздат, 1975р. 152с.
8. Гернет Е.С. Ледяные лишай / Е.С. Гернет. М.: Наука, 1981р. 120 с
9. Петров В.Н. Атмосферное питание ледникового покрова Антарктиды / В.Н. Петров. Л.: Гидрометеиздат, 1975р. 152 с.
10. Аверьянов В.Т. Гляциоклиматология Антарктиды. / В.Т. Аверьянов. Л.: Гидрометеиздат, 1990р. 198 с.
11. Брезгин Н.Н. Особенности климата и современного оледенения О. Кинг-Джордж / Н.Н. Брезгин, Л.С. Говоруха // Метеорологические исследования в Антарктике. Труды II Всес. симп. 1986р. Т4, №II. С. 31-36.
12. Говоруха Л.С. Гляциоклиматологическая характеристика Земли Грейама / Л.С. Говоруха // Бюлетень УАЦ. 1998р. Т. 2. С. 70-76.



13. Швердфегер В. Климат Антарктиды / В. Швердфегер В. // Климат полярных районов. Л., Гидрометеиздат, 1973р. С. 318-434.
14. Воронов П.С. Опыт реставрации ледникового щита Антарктиды эпохи максимального оледенения Земли / П.С. Воронов // Инф. бюлл. САЭ. 1960р. № 23. С. 10-24.
15. Гожик П.Ф. Материковая окраина индоокеанского сектора Антарктиды / Гожик П.Ф. и др. Киев: ИГН НАН Украины, 1984р. 53 с. (Препринт / НАН Украины, Ин-т. геолог. наук; 1984-6)
16. Мартазинова В.Ф. Атмосферная циркуляция Южной полярной области и климат Антарктического полуострова / В.Ф. Мартазинова, В.Е. Тимофеев, Е.К. Иванова. К.: АБЕРС, 2010р. 92 с.
17. Климат полярных районов / [Под ред. С. Орвига; пер. с англ.]. Л.: Гидрометеиздат, 1973р. 443 с.
18. Метеорология южного полушария / [Под ред. Ч.У. Ньютона]. Л.: Гидрометеиздат, 1976р. 260 с.
19. Bromwich D.H. Global atmospheric responses to Antarctic forcing / Ann. Glaciol. Vol. 27. Pap. Int. Sump. Antarctic and Glob Change: Interact. and Impacts, Hobart, Tasmania, 13-18 july, 1997р. Cambridge, 1998р. С. 521-527.
20. Тимофеев В.Е. Организация метеорологических наблюдений и сравнительный анализ развития атмосферных процессов в 1996 году на антарктической станции Академик Вернадский / Бюл. УАЦ. 1997р. Вып. 1. С. 49 - 52.
21. Hobbs W.H. Characteristics of existing glaciers / W.H. Hobbs. - New York: Macmillan, 1911р. 301 p.
22. Meinardus W. Aufgaben und Probleme der meteorologischen Forschung in der Antarktis/ Geogr. Zeitschrift. Bd. 20.1914.С. 18-34.
23. Мартазинова В.Ф. Зміни великомасштабної циркуляції повітря протягом ХХ століття та її вплив на погодні умови і регіональну циркуляцію в Україні / Український географічний журнал.- 2001р. № 2. С. 28-34.

24. Артамонов Ю.В. Структура Антарктического, Полярного, Субантарктического фронтов в западной части моря Скотия в феврале и апреле 1998 г. / Бюл. УАЦ. 2000р. Вып. 3. С. 52-65.
25. Оцінка стану кліматичної системи Західної Антарктики (району Антарктичного півострова) у світлі мінливості циркуляційної тропосфери і низької стратосфери, термічних та динамічних характеристик Південного океану, а також динаміки зледеніння / [Звіт з НДР №71]. Одеса.: ТЕС, ОДЕКУ, 2004. 219 с. 25
26. Милашенко Г.П. Карты повторяемости циклонов и антициклонов, траектории циклонов и распределение общей облачности по данным ИСЗ. Материалы по климату и циркуляции южного полушария / Г.П. Милашенко. Л.: Гидрометеиздат, 1978. Вып. I. 63 с.
27. Галич Е.А. Особенности статистической структуры полей геопотенциала в западном секторе высоких широт Южного полушария / Вісник Одеського державного екологічного університету. 2006. Вип. 2. С. 135-140.
28. Галич Е.А., Школьный Е.П. Особенности крупномасштабных циркуляционных процессов в атмосфере западного сектора южного полушария / Вісник Одеського державного екологічного університету. 2007р. Вип. 4. С. 127-134.
29. Школьный Є.П., Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / Є.П. Школьний, І.Д. Лосєва, Л.Д. Гончарова.К.: Міносвіти України, 1999.- С. 331-421.
30. Atlas ECMWF ERA 40 / [Project Report Series].2003р.№ 19. P.157.
31. Мартазінової В.Ф., Тимофеев В.Е. Современное состояние атмосферной циркуляции воздуха в Северном и Южном полушарии и региональные климатические особенности в Атлантико-Европейском секторе и районе Антарктического полуострова / Укр. антаркт. журн. 2008р. №3 (80). С. 17-37.

32. Мартазинова В.Ф., Тимофеев В.Е., Иванова Е.К. Роль изменения тропосферной циркуляции западного сектора антарктики в формировании климатических условий антарктического полуострова / Наук. праці УкрНДГМІ.- 2009.- № 2. - С. 29-42.
33. Martazinova V. Large-scale atmospheric circulation in southern extratropics and regional weather patterns at change at Antarctic Peninsula / V. Martazinova, E. Ivanova, V. Tymofeyev // Ukraine in Antarctica National Priorities and Global Integration: int. Antarctic Conference IAC2008 23-25 may 2008.: Kyiv, 2008. P. 68.
34. Куляс К.А. Сокол Д.С. Тимошевський М.Ю. Волошановська О.Ю. Формування полів приземного атмосферного тиску у регіоні Антарктичного півострова. / XI Международная научно-практическая интернет-конференция «Проблемы и перспективы развития современной науки в странах Европы и Азии» 2018р. Вып. 11. С. 131-137.

Поля середніх значень атмосферного тиску та поля середніх квадратичних  
відхилів

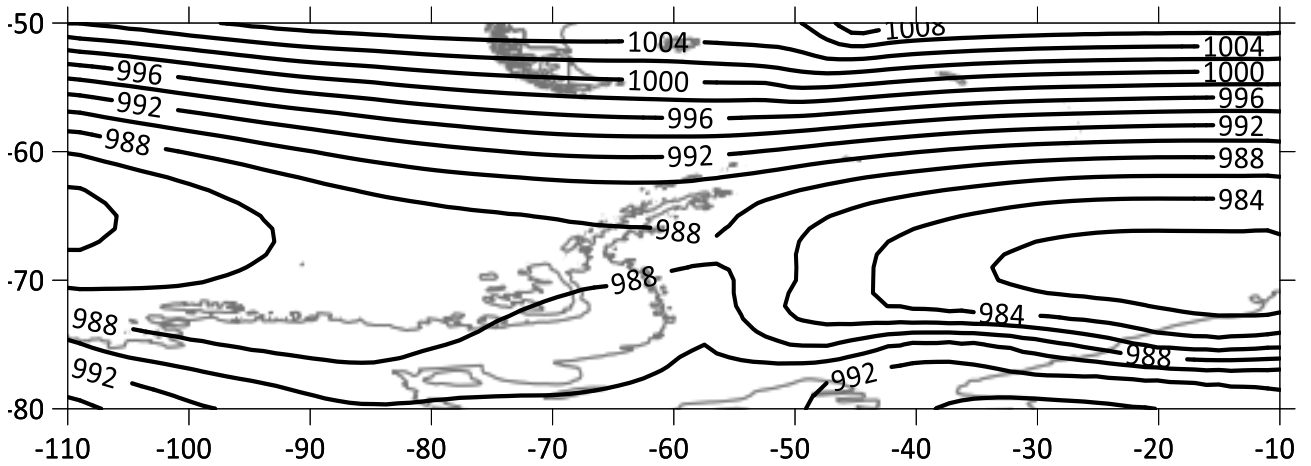


Рисунок А.1 – Поле середніх значень атмосферного тиску в лютому

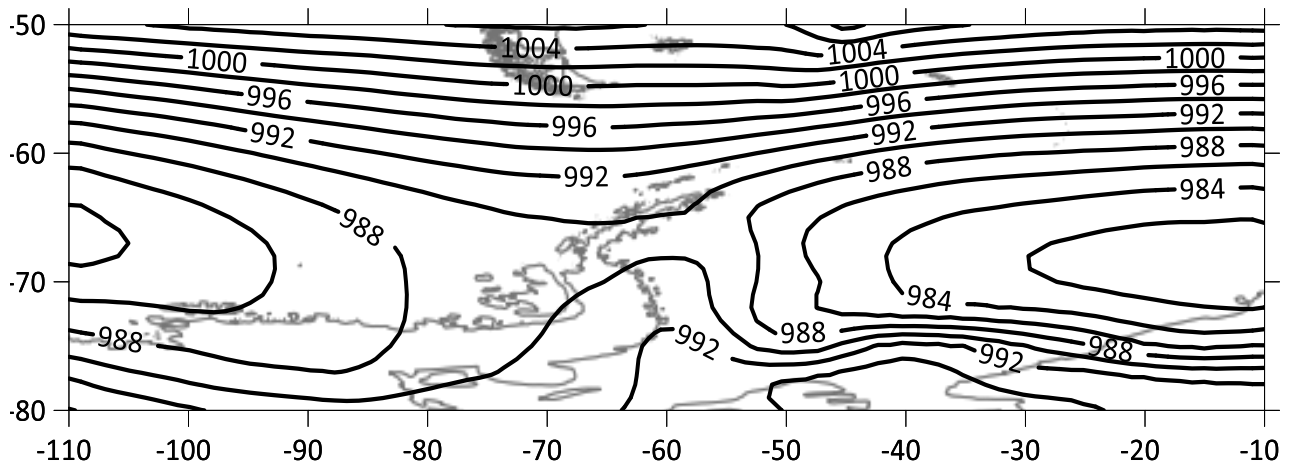


Рисунок А.2 - Поле середніх значень атмосферного тиску в березні

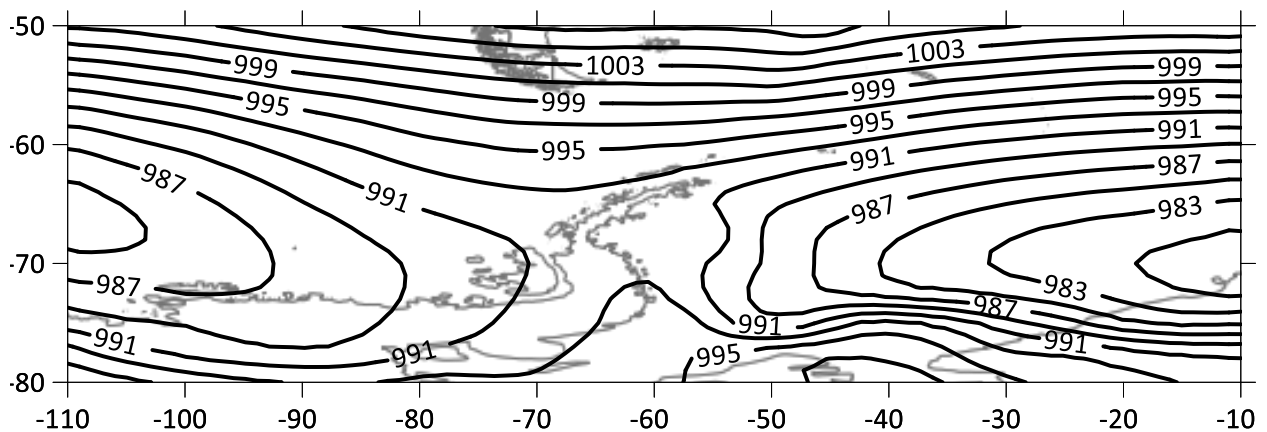


Рисунок А.3 - Поле середніх значень атмосферного тиску в травні

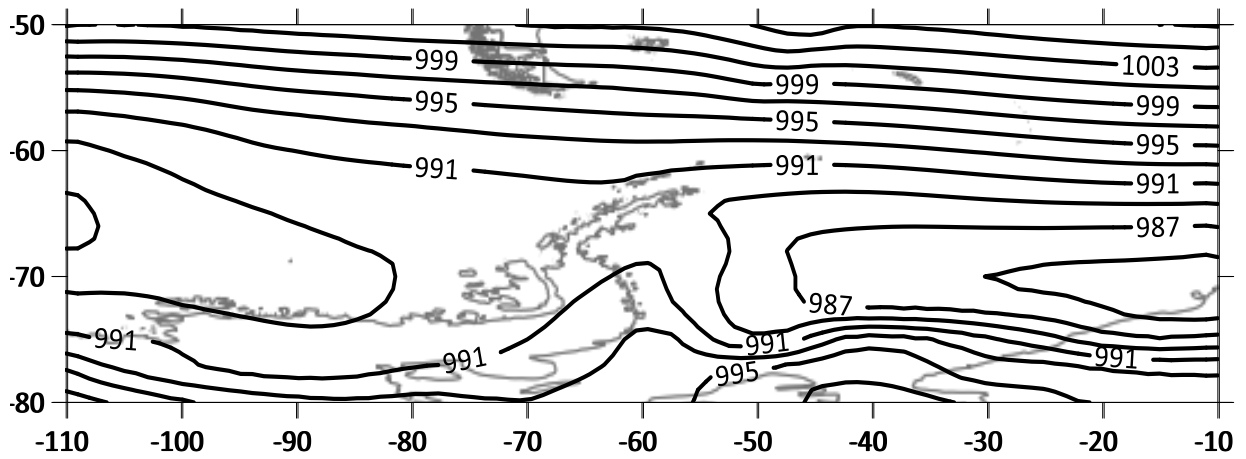


Рисунок А.4 - Поле середніх значень атмосферного тиску в червні

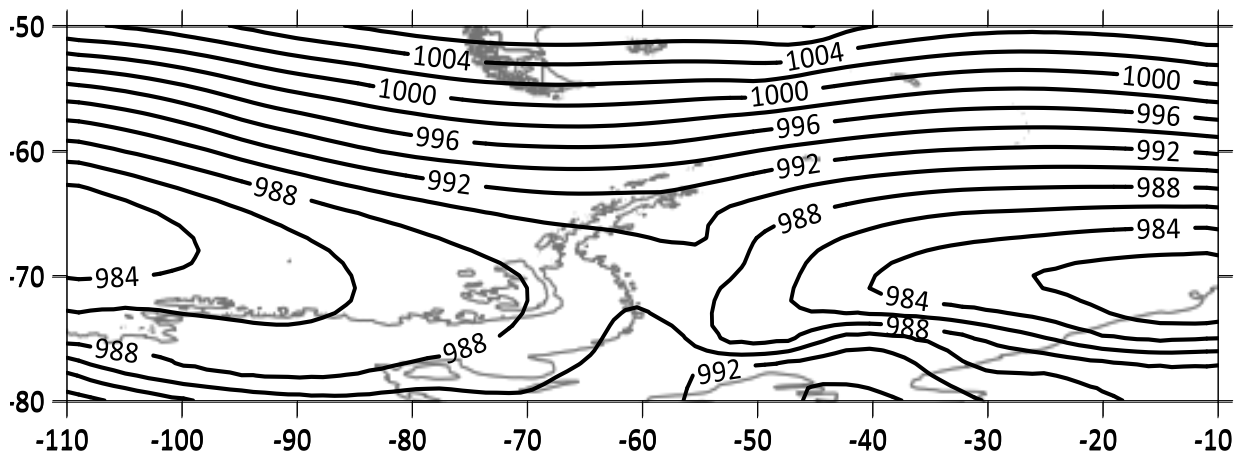


Рисунок А.5 - Поле середніх значень атмосферного тиску в серпні

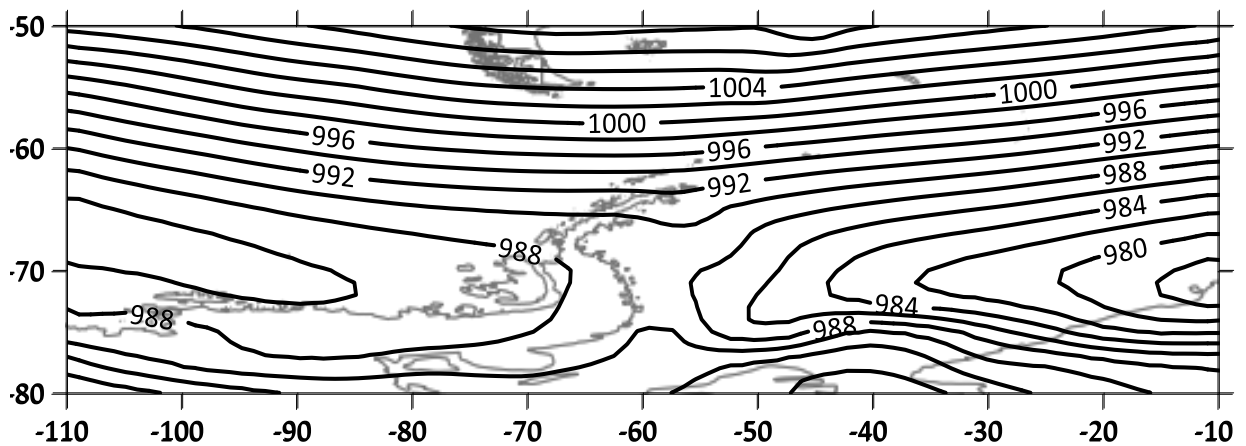


Рисунок А.6 - Поле середніх значень атмосферного тиску в вересні

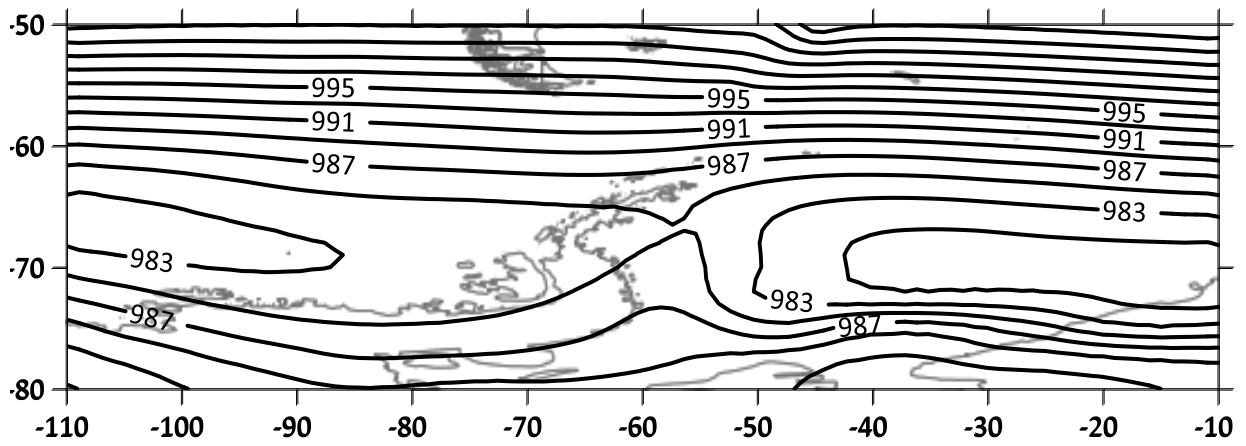


Рисунок А.7 - Поле середніх значень атмосферного тиску в листопаді

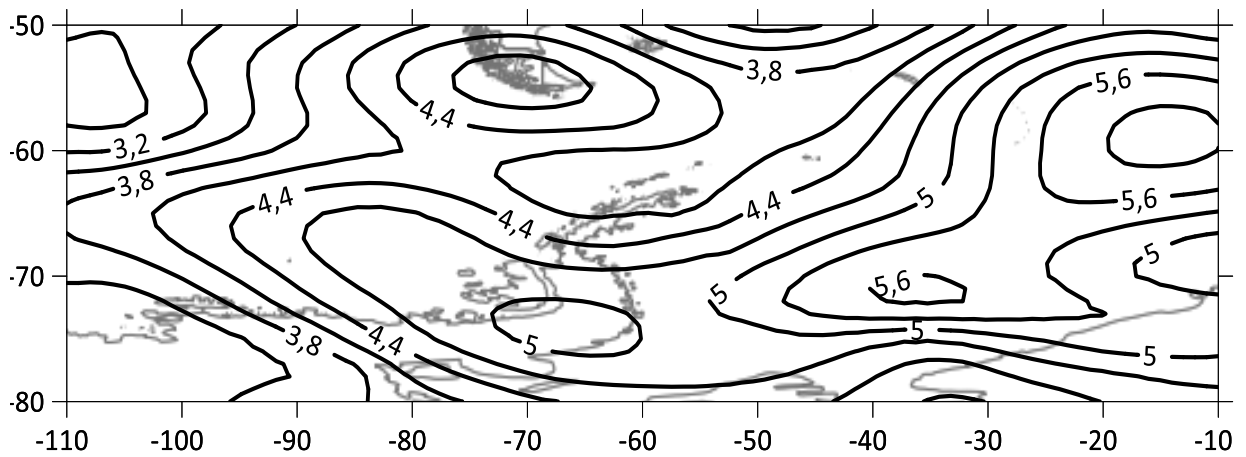


Рисунок А.8 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в лютому

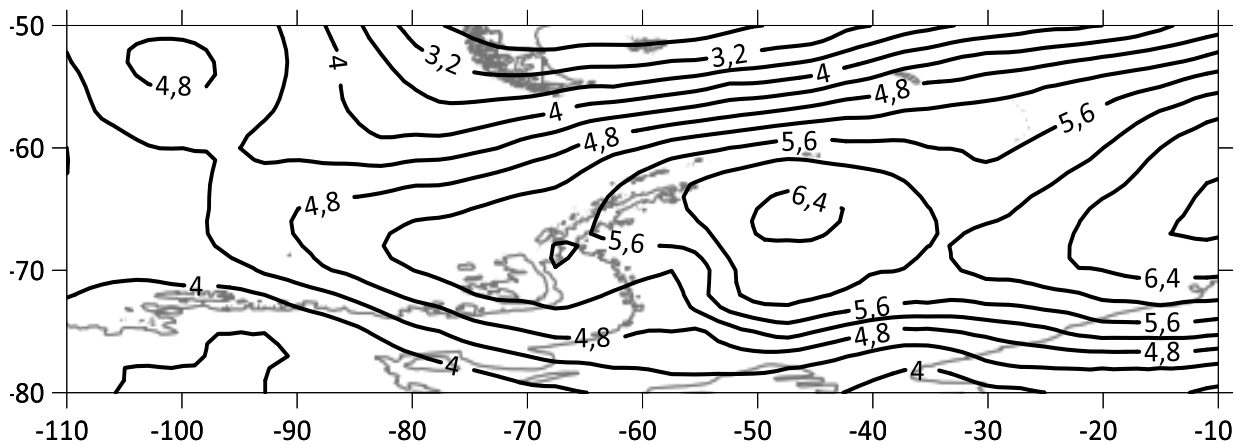


Рисунок А.9 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в березні

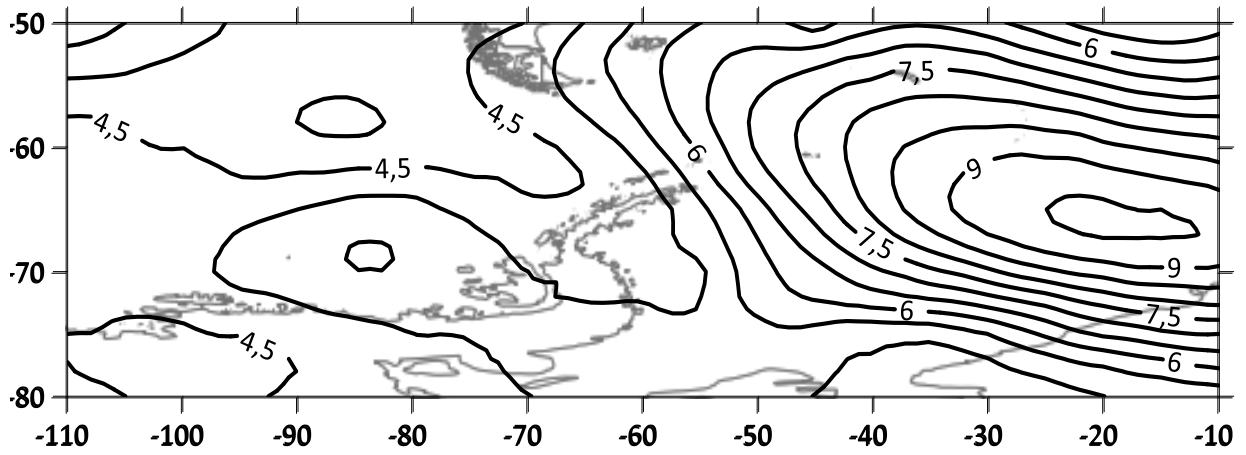


Рисунок А.10 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в травні

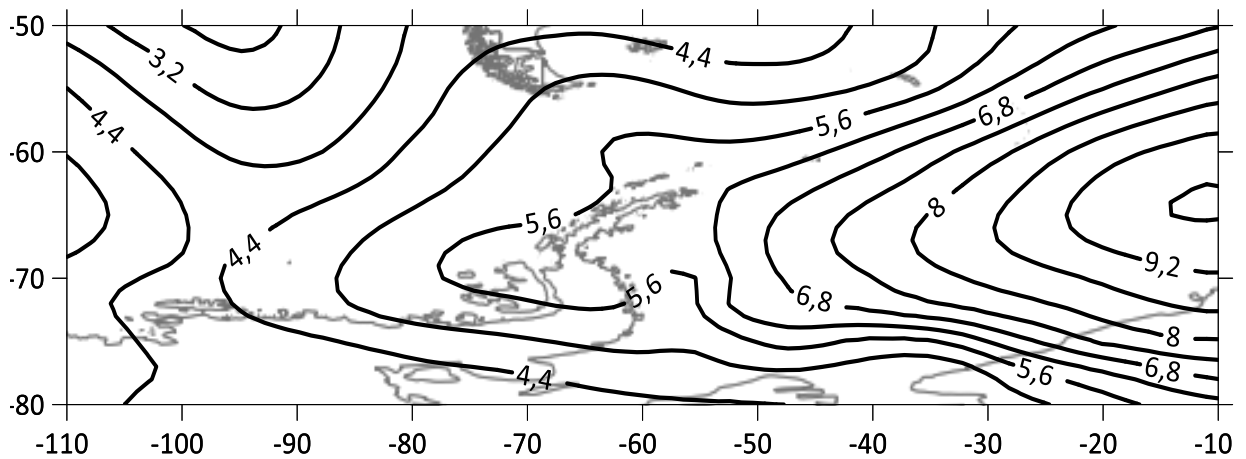


Рисунок А.11 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в червні

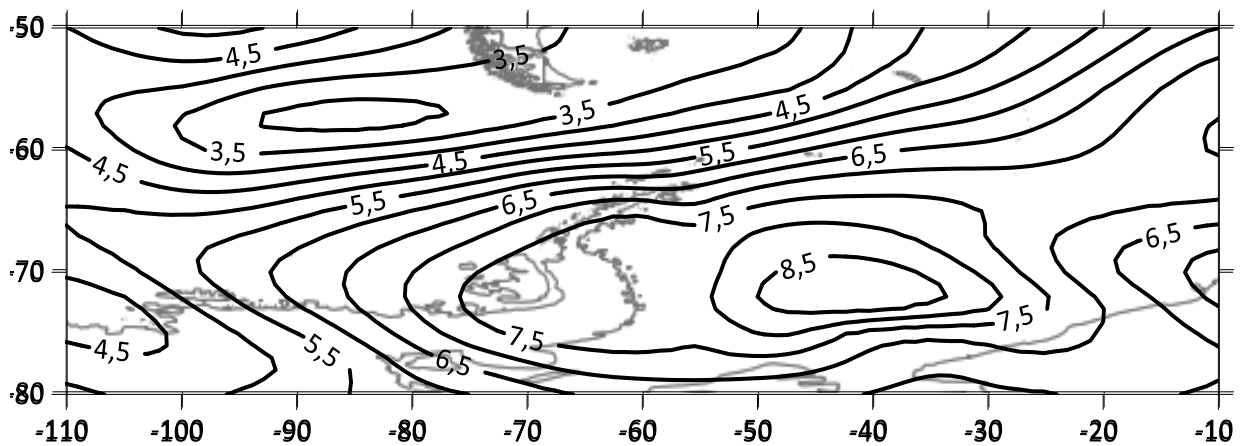


Рисунок А.12 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в серпні



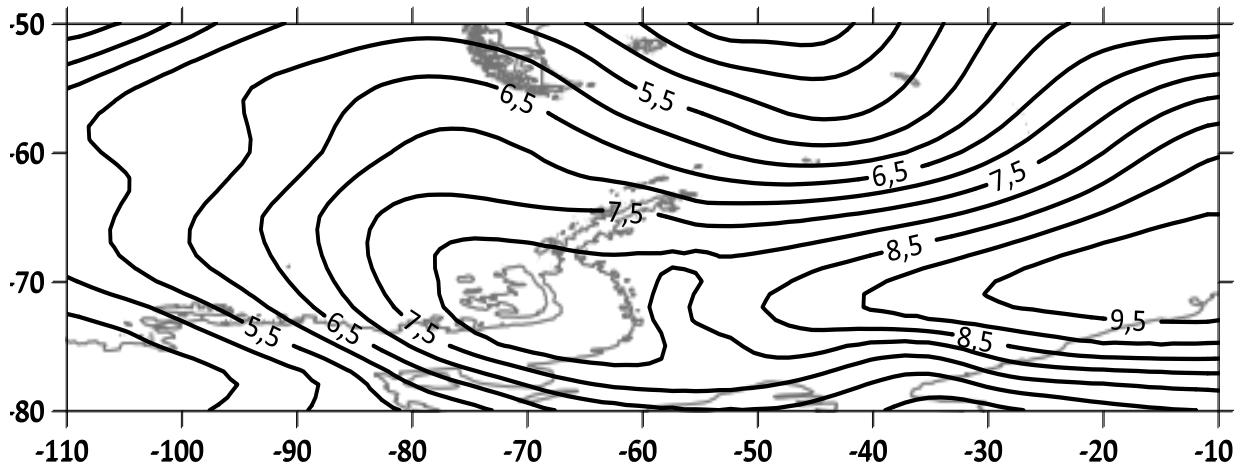


Рисунок А.13 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в вересні

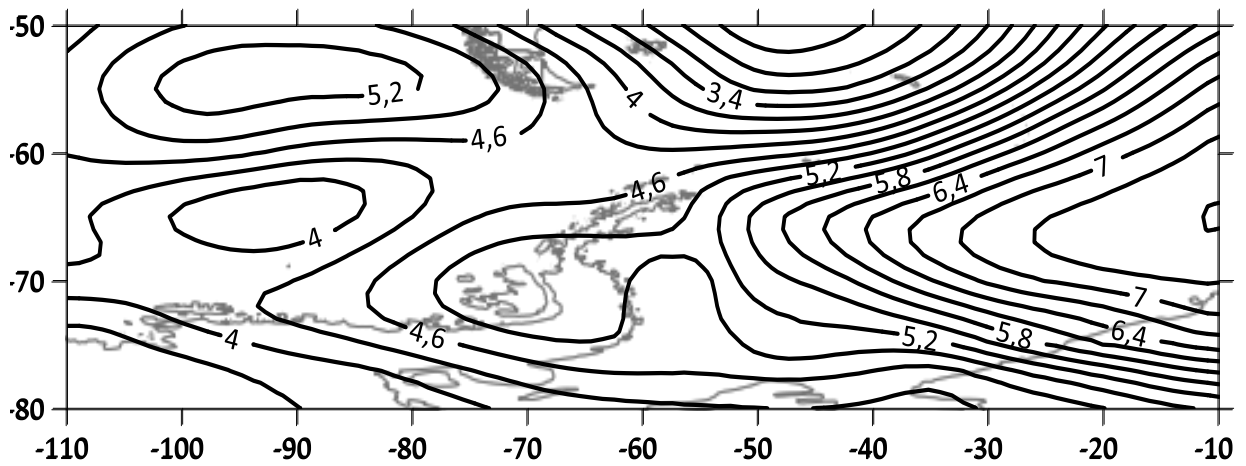


Рисунок А.14 – Поле середніх квадратичних відхилів атмосферного тиску в листопаді

Поля першого та другого власних векторів атмосферного тиску

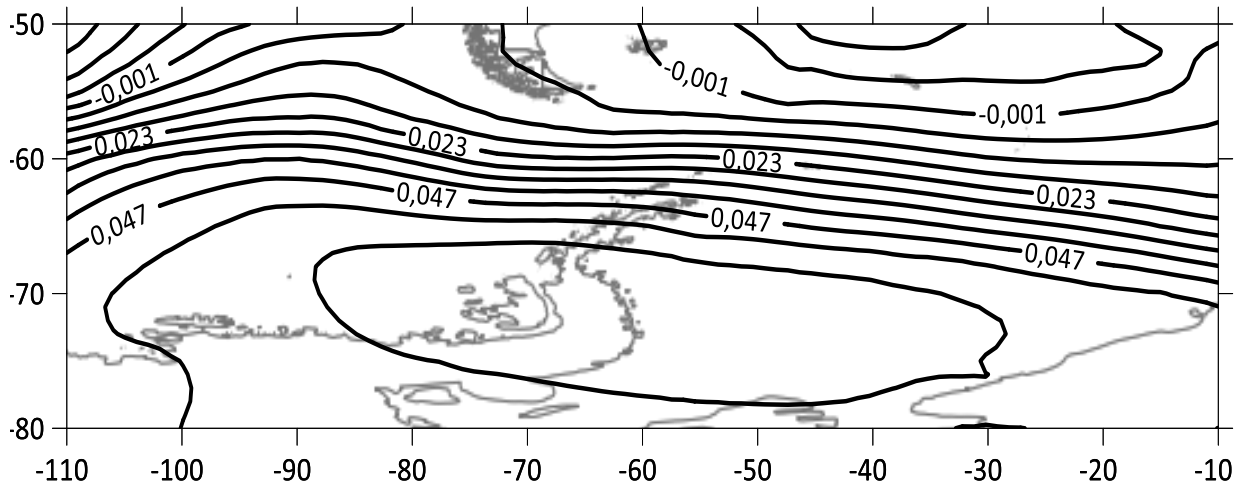


Рисунок Б.1 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, лютий

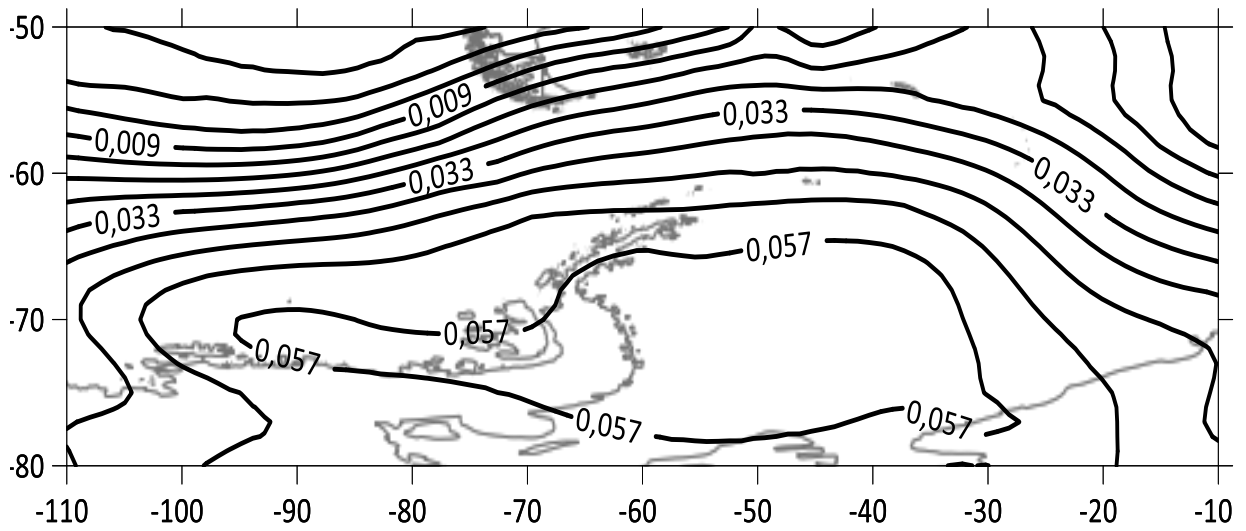


Рисунок Б.2 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, березень

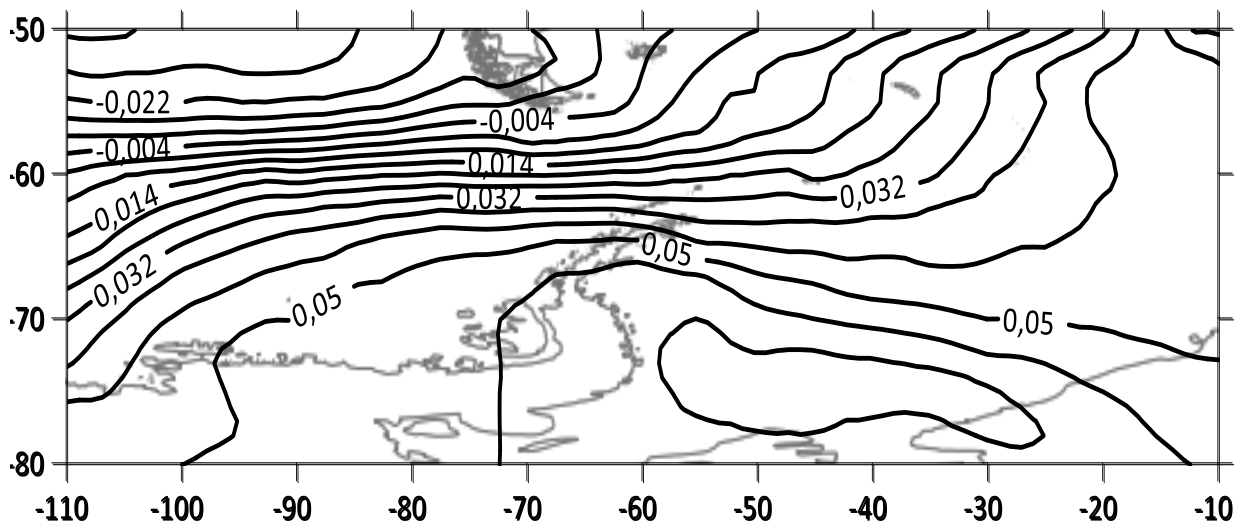


Рисунок Б.3 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, травень

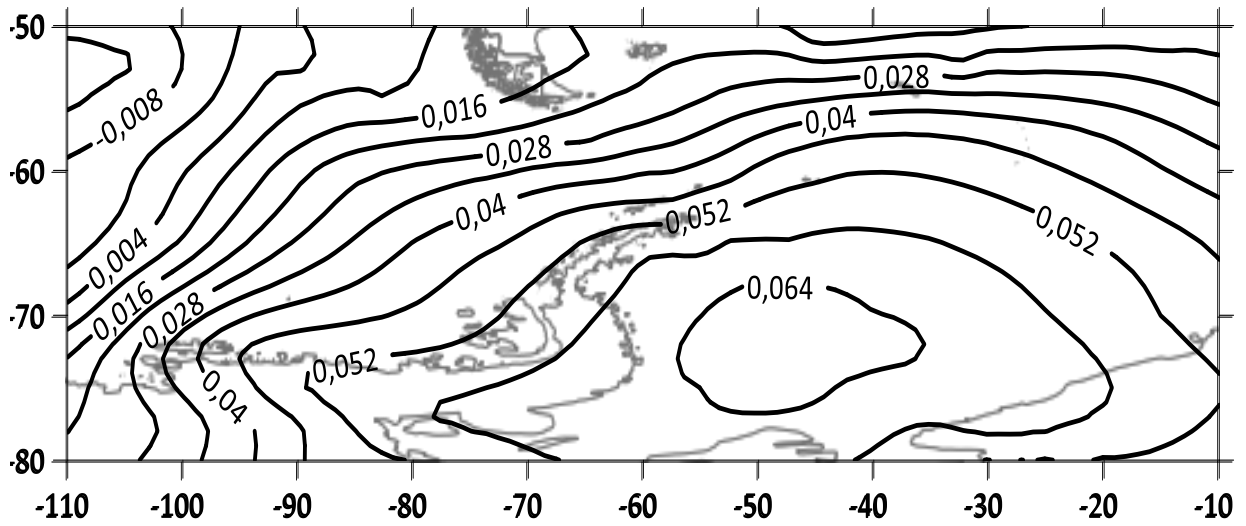


Рисунок Б.4 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, червень

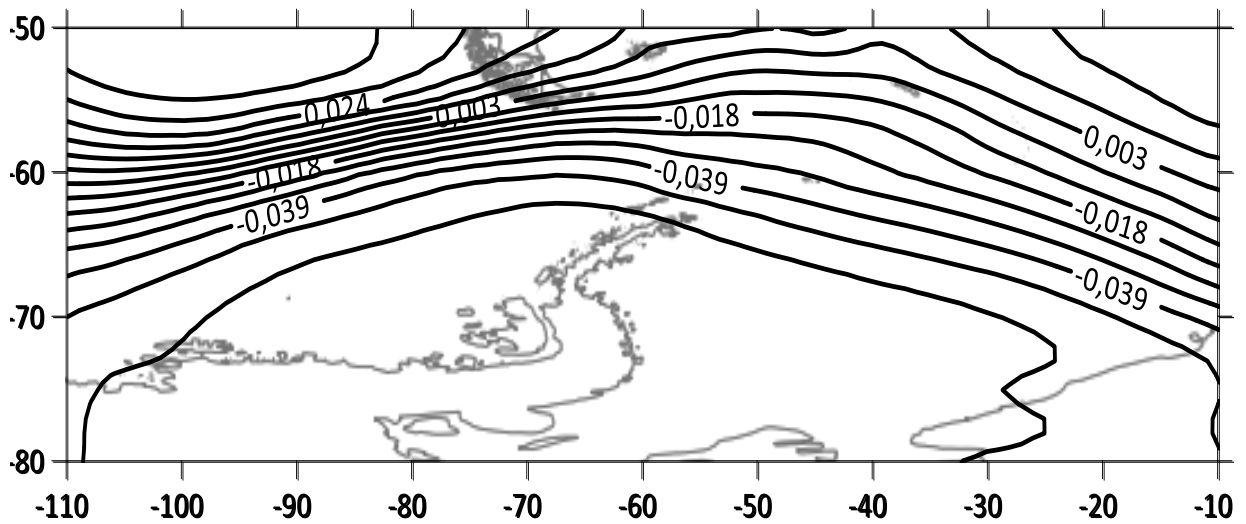


Рисунок Б.5 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, серпень

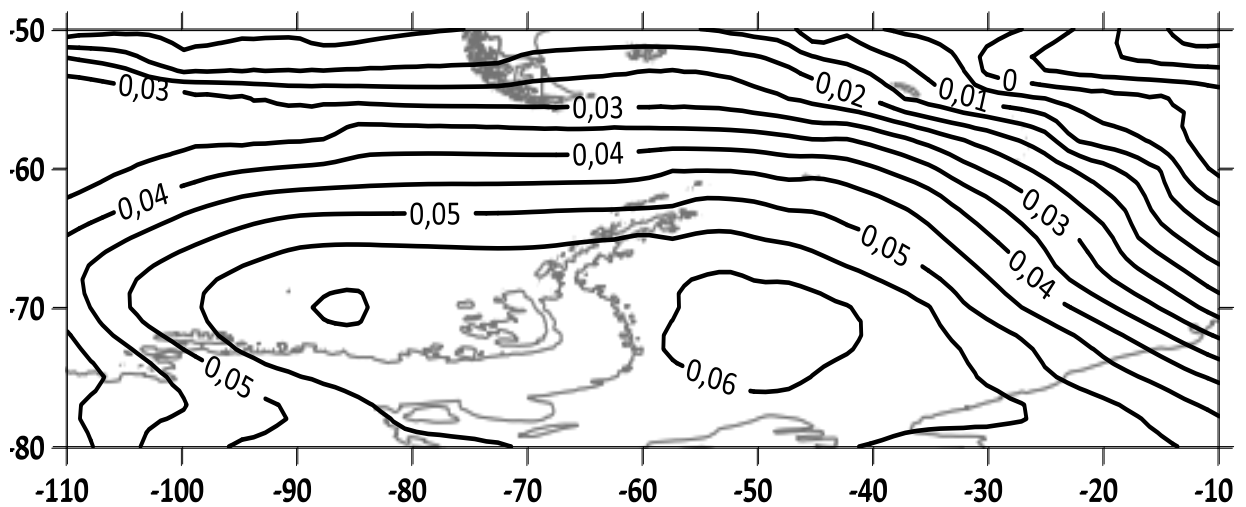


Рисунок Б.6 – Поле першого власного вектора атмосферного тиску, вересень

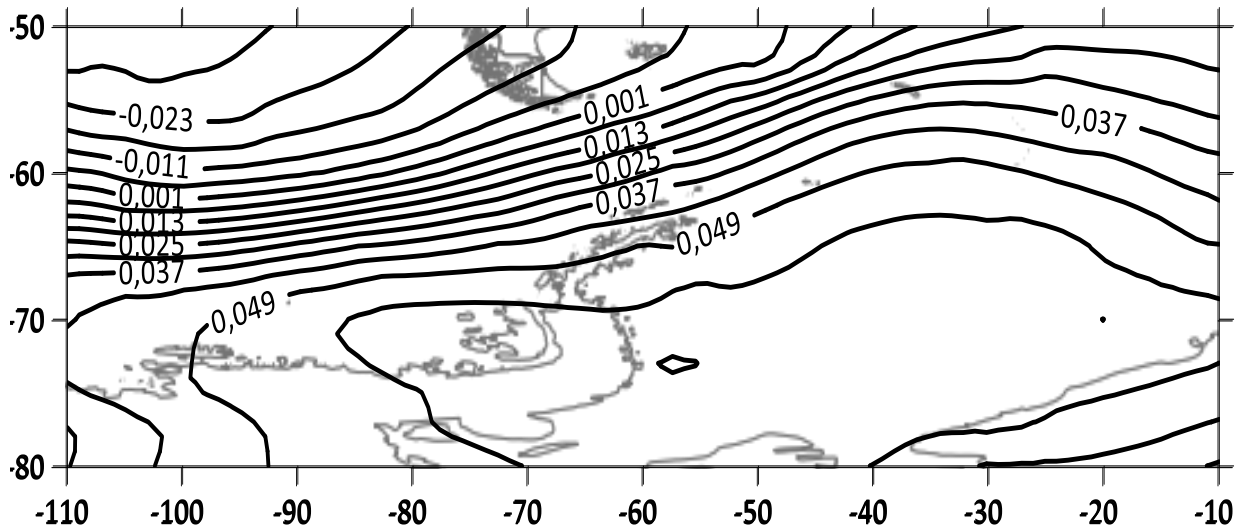


Рисунок Б.7 – Поле первого власного вектора атмосферного тиску, листопад

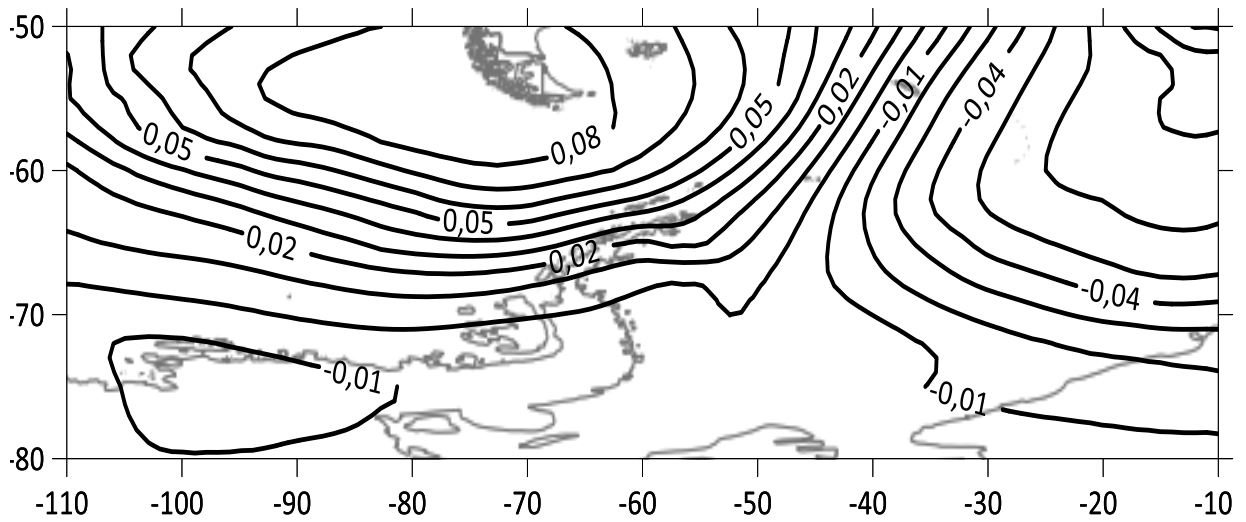


Рисунок Б.8 – Поле другого власного вектора атмосферного тиску, лютий

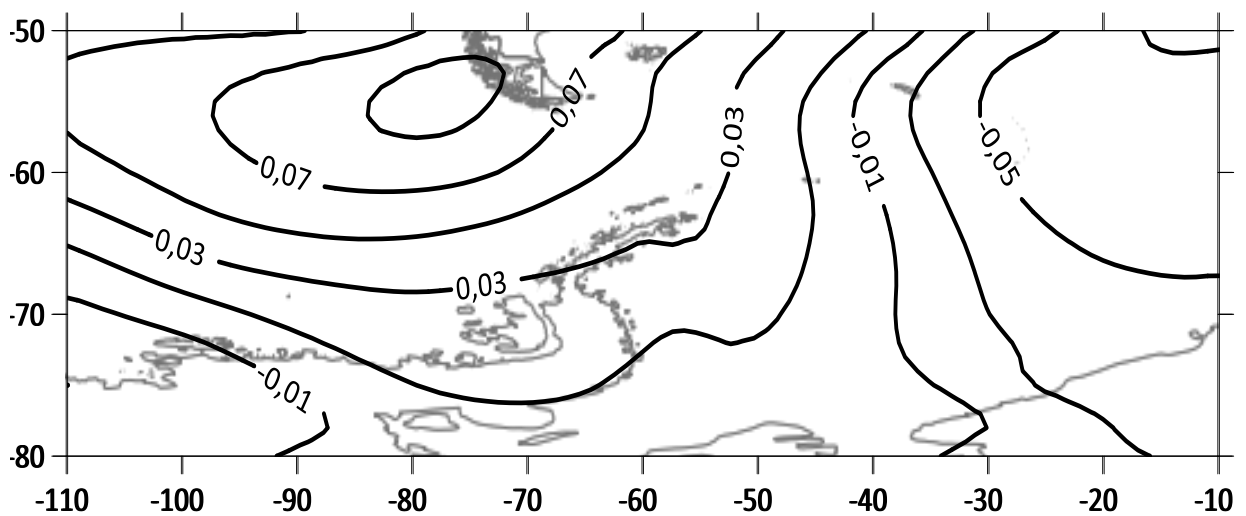


Рисунок Б.9 – Поле другого власного вектора атмосферного тиску, березень

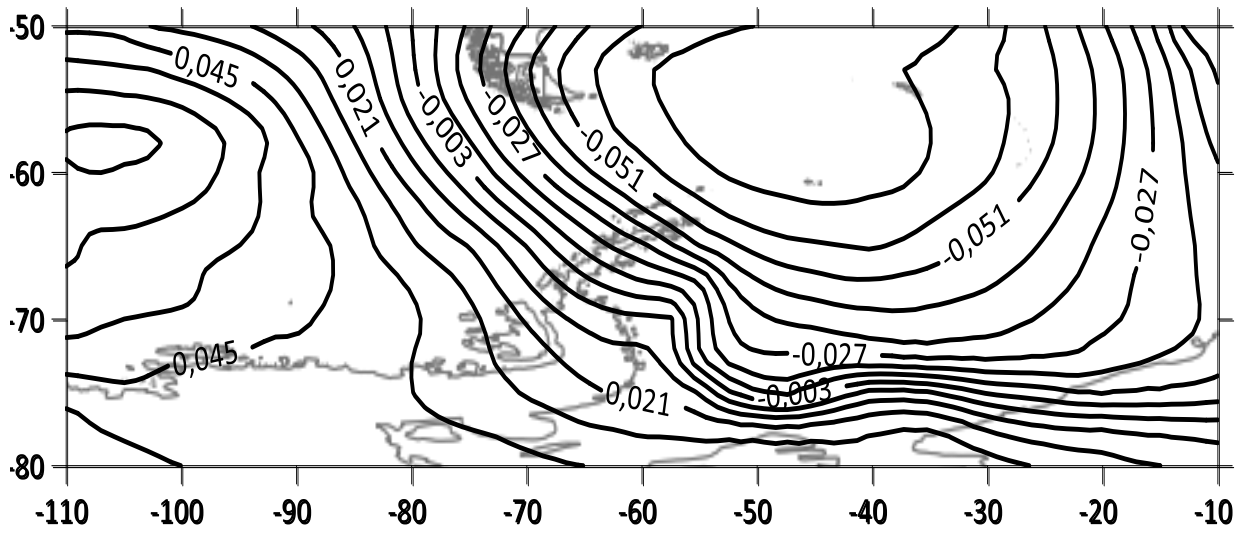


Рисунок Б.10 – Поле второго власного вектора атмосферного тиску, травень

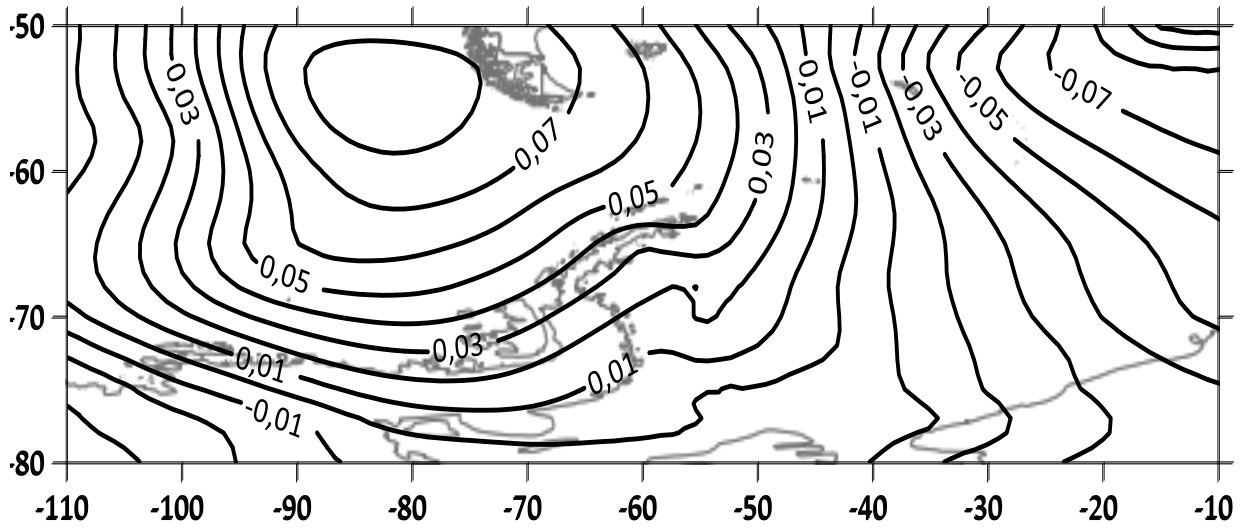


Рисунок Б.11 – Поле второго власного вектора атмосферного тиску, червень

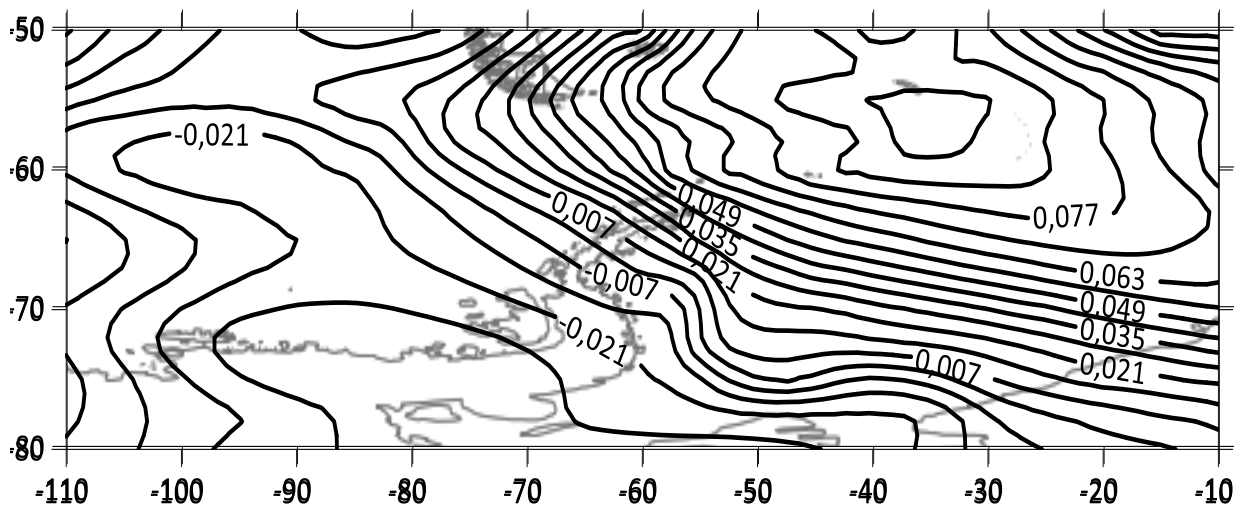


Рисунок Б.12 – Поле второго власного вектора атмосферного тиску, серпень

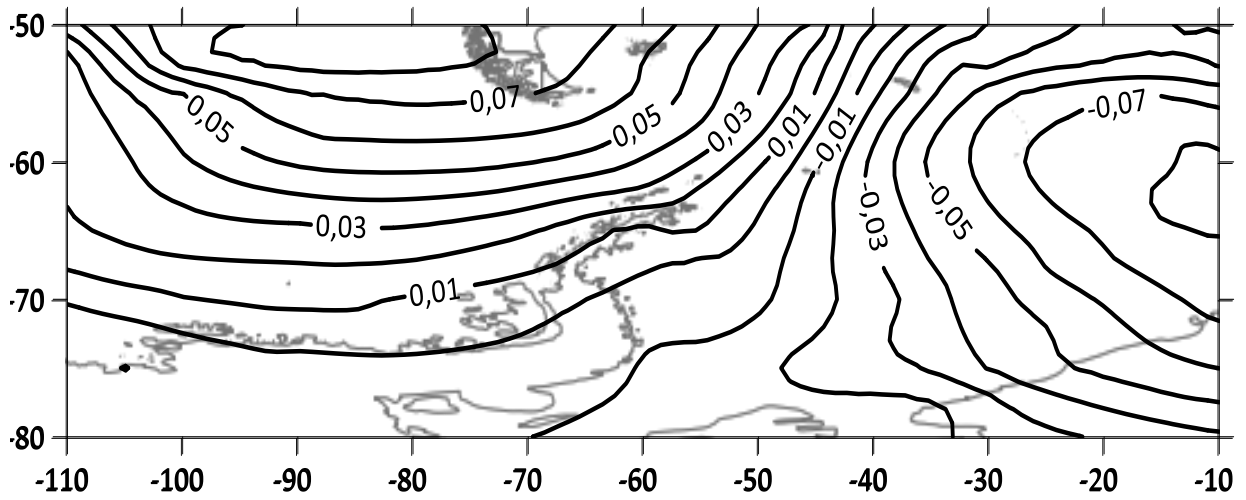


Рисунок Б.13 – Поле второго власного вектора атмосферного тиску, вересень

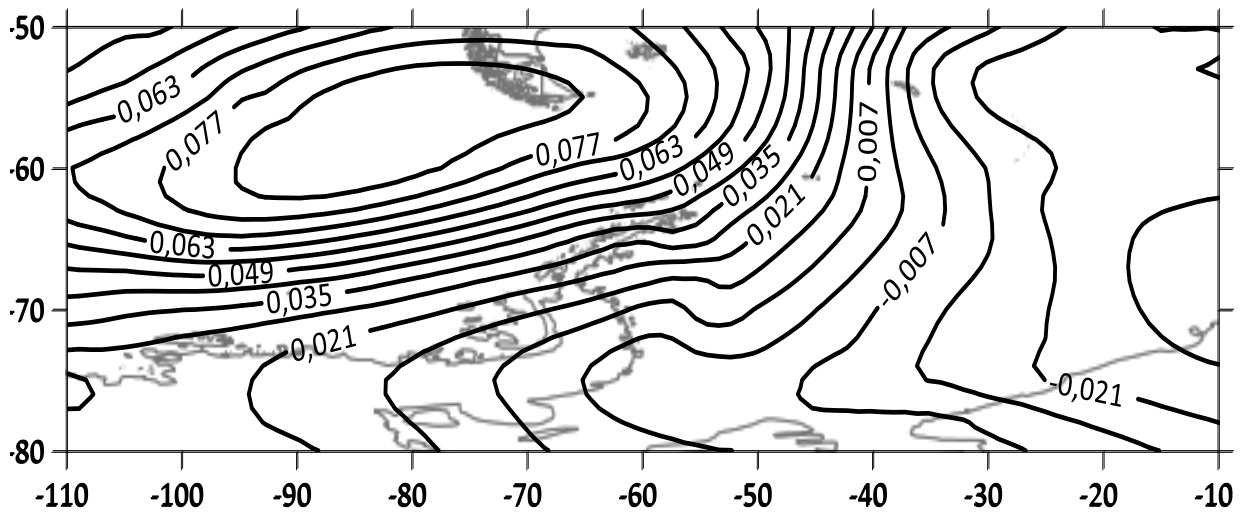


Рисунок Б.14 – Поле второго власного вектора атмосферного тиску, листопад