

УКРАЇНСЬКИЙ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЧИГАРЕВА АНАСТАСІЯ ЮРІЇВНА**

УДК 551.5/ 551.58

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ХМАРИ ТА ОПАДИ В РАЙОНІ АНТАРКТИЧНОГО ПІВОСТРОВА:  
МІКРОФІЗИКА, МЕЗОМАСШТАБНІ ПРОЦЕСИ, КЛІМАТИЧНІ ПРОЄКЦІЇ  
ДО КІНЦЯ ХХІ СТ.**

103 Науки про Землю

10 Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ А.Ю. Чигарева

Науковий керівник: Краковська Світлана Володимирівна, кандидат фізико-  
математичних наук, старший науковий співробітник

Київ – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Чигарева А.Ю.* Хмари та опади в районі Антарктичного півострова: мікрофізика, мезомасштабні процеси, кліматичні проєкції до кінця XXI ст. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 Науки про Землю. – Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена визначенню особливостей утворення хмар та опадів на мікро-, мезо- та кліматичному просторово-часових масштабах. Основна увага приділялась випадкам інтенсивних опадів зі зміною фази та багаторічним характеристикам кліматичних індексів і параметрів атмосфери, пов'язаних із зміною хмаро- та опадоутворення в регіоні з кінця XX до кінця XXI сторіччя за сучасними кліматичними проєкціями для регіону Антарктичного півострова.

Актуальність роботи полягає у необхідності вивчення властивостей хмар та опадів у полярних регіонах, оскільки полярні атмосферні процеси, які є істотною складовою глобальної циркуляції, значно чутливі до зміни клімату та безпосередньо впливають на формування режиму погоди у помірних широтах. Однак властивості хмар і опадів у полярних регіонах залишаються недостатньо вивченими через відсутність польових, аерологічних і супутникових даних вимірювань. Саме тому параметризація хмар і опадів у кліматичних і прогностичних регіональних моделях залишається джерелом помилок, що унеможлиблює отримання достовірної інформації про стан полярної екосистеми загалом і атмосфери зокрема. Таким чином, ґрунтовне вивчення процесів утворення хмар і опадів за допомогою регіонального моделювання з високою просторовою і часовою роздільною здатністю та їх верифікація за даними вимірювань, а також оцінка кліматичних проєкцій може

покращити розуміння атмосферних процесів у полярних регіонах і якість числового моделювання, включаючи моделювання клімату, у майбутньому.

*Метою дисертаційної роботи є визначення мезомасштабних та мікрофізичних особливостей процесів хмаро- та опадоутворення під час випадків інтенсивних опадів в районі Антарктичного півострова та аналіз їх кліматичних проєкцій до кінця XXI століття. Об'єктом дослідження є хмари і опади в районі Антарктичного півострова. Предметом дослідження є мезомасштабні та мікрофізичні процеси хмаро- та опадоутворення під час випадків інтенсивних опадів зі зміною фази в регіоні Антарктичного півострова.*

За результатами аналізу попередніх досліджень за темою дисертації, які представлені в першому розділі, встановлено, що переважну більшість досліджень метеорологічних процесів в Антарктиці можна розділити на дві групи. Дослідження першої групи присвячені температурному режиму та простим показникам режиму опадів. У таких роботах Антарктиду зазвичай розглядають у цілому, а Антарктичний півострів виокремлюють в окрему область, де не розділяють особливості кліматичних умов. Дослідження другої групи переважно зосереджені на конкретних випадках із екстремальними метеорологічними явищами та їх впливом на баланс маси льодовиків. Також деякі дослідження базуються на унікальних польових вимірюваннях, але в основному поблизу антарктичних науково-дослідних станцій. Кількість таких досліджень зростає, але досі є недостатньою для розуміння особливостей процесів опадо- та хмароутворення в регіоні. Тому актуальним для покращення розуміння атмосферних процесів Антарктиди залишається ґрунтовне дослідження атмосферних процесів для конкретних антарктичних регіонів із залученням чисельного моделювання високої роздільної здатності.

У другому розділі дисертаційного дослідження аналізуються початкові дані прямих і дистанційних вимірювань, реаналізу та числових моделей з методичними підходами до їх обробки, які використовувалися як для оцінки змін клімату в регіоні,

так і для дослідження процесів опадів і хмароутворення. Версії використаних даних і моделей були найновішими на момент дослідження. Використання представлених методичних підходів забезпечило комплексне вивчення характеристик полярних хмар та опадів в регіоні Антарктичного півострова.

До сучасних інструментів, що використовуються для дослідження процесів хмаро- та опадоутворення і зміни клімату належать глобальні кліматичні моделі, реаналізи, наприклад ERA5, та мезомасштабні числові моделі, наприклад Polar WRF у кліматичній моді чи інші РКМ. Проведений порівняльний аналіз конфігурацій моделі дає можливість зробити припущення, що обрана конфігурація Polar WRF з мікрофізичною параметризацією Томсона із значенням концентрації крапель 50 на см<sup>3</sup> найкраще передає характеристики хмар та опадів в районі північно-західного Антарктичного півострова. Виконано апробацію запропонованої конфігурації моделі Polar WRF для моделювання випадку інтенсивного снігопаду у березні 2013 року для території Європи (домен з просторовою роздільною здатністю 6 км), всієї України (домен з просторовою роздільною здатністю 2 км) та центру і заходу України (домени з просторовою роздільною здатністю 0,6 км). В дослідженні показано, що отримана кількість опадів за обраною конфігурацією чисельної моделі WRF є достатньо наближеною до вимірної кількості опадів, і тому апробована конфігурація моделі може бути використана для дослідження інтенсивних процесів снігопаду в Україні.

Обрано та розраховано кліматичні індекси і параметри, що запропоновані ВМО, для уніфікації досліджень зміни клімату. Використання спеціальних кліматичних індексів забезпечує представлення зміни різних кліматичних характеристик від кількості днів з температурою нижчою за нуль, що асоціюється з наявністю чи відсутністю процесів танення криги; до безперервних періодів з/без суттєвих опадів які асоціюються з накопиченням/абляцією маси льодовиків. Просторовий аналіз обраних індексів забезпечує можливість визначення регіональних особливостей клімату Антарктичного півострова, оскільки представляють не тільки часовий хід

базового кліматичного параметру, а й зміну режиму температури, опадів чи хмарності. Такий підхід дозволяє провести районування території на основі схожої прогнозованої динаміки зміни обраних параметрів, що в свою чергу, є основою для визначення найбільш вразливих до зміни клімату областей регіону Антарктичного півострова.

У третьому розділі дисертаційного дослідження було проаналізовано процеси атмосферної циркуляції, мезомасштабні умови та мікрофізичні процеси формування хмар та опадів, що асоціюються з утворенням інтенсивних опадів зі зміною фази в районі Антарктичного півострова. Розглянуті випадки були обрані тому, що вони типові для регіону і представляють різні пори року: зимовий, літній і перехідний. Завдяки можливості автора взяти особисту участь у Міжнародній ініціативі YOPP-SH Winter-2022 вперше було проведено комплексне дослідження хмарності та опадів у зимовий період. Їх повторюваність зросла в останнє десятиліття, і очікується, що потепління клімату ще більше посилить такі процеси.

За даними реаналізу виявлено, що для розглянутих випадків інтенсивних опадів у літній, зимовий та перехідний періоди характерно розташування глибокого циклону у морі Амундсена з подальшим формуванням у його північному секторі улоговини, що простягається до помірних широт, та приземного циклону біля узбережжя Північної Америки, близько  $60^{\circ}$  пд.ш.,  $90^{\circ}$  зх.д., що посилює перенесення теплого, насиченого вологою повітря у бік Антарктичного півострова, що характерне для атмосферних річок з інтенсивним затоком вологи з тропічних широт Тихого океану. В результаті проведеного вперше комплексного аналізу випадку інтенсивних опадів взимку 2022 року виявлено мінімум атмосферного тиску на рівні моря 918 гПа в центрі такого глибокого циклону у морі Амундсена.

За даними моделювання Polar WRF порівнювалися циркуляційні процеси, що створювалися над обома схилами Антарктичних гір під час інтенсивних циклонічних подій, а саме розподіли полів вертикальної та горизонтальної компонент швидкості

вітру, температури повітря, значень відбивної здатності хмар, і виявлено: наявність орографічного підсилення опадів і формування хмар, а саме утворення осередків на висоті від 2 до 4 км над навітряною західною частиною гір з максимальними масовими концентраціями кристалів та крапель до 1 г/кг; характеристики і висоту переважаючих атмосферних потоків, зокрема максимальні горизонтальні швидкості вітру спостерігалися над станцією «Академік Вернадський» під час випадку у перехідний сезон у шарі від 8 до 10 км та становили 60 м/с; моменти настання та протяжність областей додатних температур повітря внаслідок надходження теплих повітряних мас чи утворення фенових ефектів у районі бухти льодовика Ларсен В, зокрема для розглянутих випадків характерне короткочасне потепління до +2 °С з навітряного боку гір до висоти 500-700 м до та під час інтенсивних опадів, у той час як для підвітряного схилу гір характерне тривале потепління до +6 °С у шарі до 1,5 (іноді 2,5) км; визначено кількісні різниці у розподілі кристалів та крапель у хмарах з навітряного та підвітряного схилів гір під час, до та після моментів настання максимальної інтенсивності опадів; отримано якісну різницю у вертикальному розподілі часточок та кількісні відмінності у розподілі масової концентрації водяної пари для різних випадків інтенсивних опадів зимового і перехідного сезонів.

На основі аналізу 3D візуалізації розподілу крапель та кристалів було визначено наявність осередків дощу вздовж західного узбережжя Антарктичного півострова, навіть впродовж зимової циклонічної події, а також взаємне розташування кристалів снігу, льоду та крапель різного розміру в регіоні Антарктичного півострова під час моментів настання інтенсивних опадів на західному узбережжі півострова.

В четвертому розділі представлено результати дослідження просторово-часових кліматичних характеристик, що асоціюються з режимом формування опадів та хмарності. Аналіз було виконано для інтегрального вмісту сконденсованої вологи та окремо льоду в атмосфері, рідкої фази опадів та співвідношення рідкої і твердої фаз опадів, сумарної кількості опадів, екстремальності опадів відповідно до значень їхніх

95го процентилю та показника простої добової інтенсивності. Додатково оцінювалась зміна показників зволоження/посушливості клімату за тривалістю періодів з опадами і без та температурного режиму холодного періоду за кількістю днів з мінімальною та максимальною температурами нижче 0°C. Оцінка визначених параметрів ґрунтувалася на даних регіональних кліматичних моделей проєкту Polar-CORDEX, що використовували граничні та початкові умови з глобальних кліматичних моделей CMIP5, додатково для порівняння використовувались значення реаналізу ERA5. Дослідження виконувалось для періодів 1986-2005, 2041-2060 та 2081-2100. Ідекси були обрані відповідно до рекомендацій Міжнародної програми дослідження клімату (WCRP) та характеристик хмарності, які розраховуються у регіональних кліматичних моделях. Дані кліматичних моделей оброблялися за допомогою відкритих програмних продуктів Climate4R, Climate Data Operators (CDO) та Python.

Виявлено, що зміни розглянутих параметрів наприкінці століття за сценарієм RCP 4.5 переважно співставні зі змінами у середині століття за сценарієм RCP 8.5. Встановлено окремі субрегіони Антарктичного півострова з різними прогнозованими змінами кліматичних умов. Зокрема це:

- *підвітряні схили Землі Греяма і Землі Палмера*, для яких прогнозується значне потепління, найменше в регіоні зростання значень інтегральної сконденсованої вологи та вмісту льоду в атмосфері, незначне зростання кількості опадів і скорочення тривалості періодів з опадами;

- *навітряні схили хребтів Землі Греяма і Землі Палмера*, де виявлено максимальне прогнозоване збільшення опадів і порівняно низький показник потепління одночасно з суттєвим скороченням тривалості посушливих періодів та зростанням тривалості періодів з опадами, ділянка між станціями «Академік Вернадський» і «Розера» має найбільшу річну кількість рідких опадів у досліджуваному регіоні та помірне зростання значень інтегрального вмісту всієї сконденсованої вологи та льоду в атмосфері;

- *західне узбережжя та острови, включаючи Острів Олександра I та протоку Георга VI*, де очікується зростання суми опадів та їхньої інтенсивності, зростання тривалості періодів з опадами та значне потепління; при цьому найменша кількість опадів і їх рідкої частки, найбільше в досліджуваному регіоні зростання інтегрального вмісту всієї сконденсованої вологи та льоду в атмосфері;

- *Море Уедделла*, де зміни інтегрального вмісту льоду мають меридіональний розподіл з максимальними значеннями на півдні, зокрема інтегральний вміст всієї сконденсованої вологи зростає, значення 95 перцентилі інтенсивності опадів найнижчі, але найбільші зміни в кількості днів із добовою кількістю опадів, вищою за середнє значення 95 перцентилі за історичний період, одночасно із значно меншою кількістю днів з опадами, ніж в інших частинах регіону Антарктичного півострова;

- *Південно-східна частина Тихого океану*, для якої характерна висока річна сума опадів і найбільша частка дощу в загальній кількості опадів з її прогнозованим найбільшим зростанням впродовж XXI ст. порівняно з історичним періодом.

Отримані результати можуть бути використані для покращення прогнозу інтенсивних опадів, а отже планування безпечніших експедиційних місій та навігації у регіоні; для визначення мас-балансу льодовиків, формування поверхневого стоку та інших процесів в регіоні Антарктичного півострова, а також у помірних широтах, наприклад для випадків інтенсивних снігопадів в Україні. Результати дослідження можуть бути використані як база для досліджень у суміжних наукових галузях, наприклад для оцінки впливу на екосистеми і зміни біорізноманіття в регіоні.

**Ключові слова:** хмароутворення, опадоутворення, Антарктичний півострів, репрезентативні шляхи концентрацій, Polar WRF, зміна клімату, мікрофізика хмар, мікрофізика опадів, орографічне підсилення, мезомасштабна циркуляція, регіональна кліматична модель, числове моделювання, температурний режим, режим зволоження, кліматичний індекс.



## ABSTRACT

*Chyhareva A.* Clouds and precipitation in the Antarctic Peninsula region: microphysics, mesoscale processes and climate projections to the end of the 21st century. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy (PhD) degree in the specialty 103 – Earth Sciences in the field of knowledge 10 – Natural Sciences. – Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The study is devoted to determining the cloud and precipitation formation features on the microphysical, mesoscale and climatic scales. The study focuses on the intense precipitation events with a precipitation phase change and on the multi-year characteristics of climate indices and atmospheric parameters associated with a change in the cloud and precipitation formation in the region from the end of the 20th to the end of the 21st century according to the modern climate projections for the region of the Antarctic Peninsula.

Polar atmospheric processes are an essential component of global circulation, significantly sensitive to climate change, and directly affect the formation of the weather regime in lower latitudes. However, the properties of clouds and precipitation in polar regions remain to be understudied due to the lack of field, aerological and satellite measurement data. It is also why the parameterization of clouds and precipitation in climate and forecast models remains a source of errors, making it impossible to obtain reliable information about the state of the polar ecosystem in general and the atmosphere in particular. Therefore, a thorough study of cloud and precipitation formation processes by the high spatial and temporal resolution regional simulations and their verification with the measurement data, as well as assessing their climate projections, can improve the

understanding of atmospheric processes in the polar regions and the quality of numerical modelling, including climate modelling, in the future.

The study aims to determine the mesoscale and microphysical features of cloud and precipitation processes during intense precipitation events in the Antarctic Peninsula and to analyze climate projections of the respective parameters until the end of the 21st century. The object of the study is clouds and precipitation over the Antarctic Peninsula region. The subjects of the study are the mesoscale and microphysical processes of cloud and precipitation formation during intense precipitation events with a phase transition over the Antarctic Peninsula region.

According to the results of the previous studies' analysis on the dissertation subject, which is presented in the first chapter, it was found that the vast majority of studies on Antarctic meteorological processes could be divided into two groups. The studies in the first group focus on the temperature regime and simple precipitation indices. In such works, Antarctica is usually considered in general, and the Antarctic Peninsula is as a separate region where the climatic conditions are not distinguished. The studies in the second group focus on the specific cases with extreme meteorological events and their impact on the glaciers' ice mass balance. Also, some studies are based on unique field measurements, but mainly near the Antarctic scientific research stations. The number of such studies is increasing, but very slow and more is needed to understand the peculiarities of precipitation and cloud formation processes in the region. Therefore, a thorough study of the atmospheric processes for the specific Antarctic regions with the involvement of high-resolution numerical modelling remains relevant for improving the understanding of atmospheric processes in Antarctica.

Initial and obtained data of direct and remote measurements, reanalysis and numerical models with methodological approaches for their processing, which were used both for the assessment of climate change in the region and for the study of precipitation and cloud formation processes, are analyzed in the second chapter of the thesis. The versions of the

used data and models were the most recent at the time of the study. The presented methodological approaches provided a comprehensive study of the characteristics of polar clouds and precipitation for the Antarctic Peninsula region.

Modern tools used to study the processes of cloud and precipitation formation and climate change include global climate models, reanalyses, such as ERA5, and mesoscale numerical models, such as Polar WRF in climate mode or other RCMs. A comparative analysis of model configurations was conducted. We can assume that the selected configuration of Polar WRF with Thomson microphysical parameterization and a droplet concentration value of  $50 \text{ cm}^{-3}$  better represents the characteristics of clouds and precipitation in the northwestern Antarctic Peninsula. This chosen Polar WRF model configuration was applied and tested for the intense snowfall event in March 2013 over Europe (domain with a spatial resolution of 6 km), Ukraine (domain with a spatial resolution of 2 km) and the central and western Ukraine (domains with a spatial resolution of 0.6 km). It was shown that the chosen microphysical configuration of the WRF numerical model produced similar amount of measured precipitation and therefore could be used to study the intense snowfall processes over Ukraine.

For the study purposes, we analyzed several indices and parameters proposed by WMO to unify assessment of meteorological processes, but we selected mostly indices that represent climate changes near melting point. Namely, they are numbers of ice and frost days associated with the presence or absence of ice melting processes, continuous periods with/without significant precipitation associated with accumulation/ablation of glacier mass, liquid fraction and extreme precipitation. Spatial analysis of the selected indices provides an opportunity to determine the regional features of the Antarctic Peninsula climate, as they represent not only the change of the essential climate parameters but more generally the regime of temperature, precipitation or cloud cover. This approach allowed to zone the region based on similarities of parameters' projected changes and to distinguish the most vulnerable to climate change territories of the Antarctic Peninsula.

Atmospheric circulation processes, mesoscale conditions, and microphysical characteristics of cloud and precipitation formation during the intense precipitation events with a phase transition over the Antarctic Peninsula were analyzed in the third chapter of the thesis. The considered cases were chosen because they are typical for the region and represent different seasons: winter, summer, and transitional. Due to possibility of the author to participate personally in the International YOPP-SH Winter-2022 initiative, a comprehensive study of clouds and precipitation in the winter period was conducted for the first time. Their recurrence has increased in the last decade, and climate warming is expected to intensify such processes further.

According to the reanalysis data, it was found that for the considered cases of intense precipitation events in the summer, winter and transition seasons, the typical composition of surface pressure conditions is: a deep cyclone in the Amundsen Sea, a surface cyclone near the coast of South America, about  $60^{\circ}\text{S}$ ,  $90^{\circ}\text{W}$ . The surface cyclone enhances the transfer of warm, moist air towards the Antarctic Peninsula, which is typical for atmospheric rivers with an intensive influx of moisture from the tropical latitudes of the Pacific Ocean. As a result of the first comprehensive analysis of the event of intense precipitation in the winter of 2022, a minimum atmospheric pressure at sea level of 918 hPa was found in the centre of such a deep cyclone in the Amundsen Sea.

The circulation processes over both slopes of the Antarctic Mountains during intense cyclonic events were compared based on the Polar WRF simulation data. Were analyzed the cross-sections of vertical and horizontal components of wind speed, air temperature, cloud reflectivity values and found: the presence of orographic amplification of precipitation and cloud with the of centers occurred at an altitude of 2 to 4 km above the windward western part of the mountains with maximum mixing ratio of crystals and droplets up to 1 g/kg; the maximum horizontal wind speeds up to 60 m/s in a layer is from 8 to 10 km were simulated for the Akademik Vernadsky station during the event in the transition season; the onset and duration of areas of positive air temperatures due to the arrival of warm air masses or the

formation of foehn effects in the area of the Larsen B glacier bay, in particular, the considered cases are characterized by a short-term warming up to +2 °C from the windward side of the mountains to a height of 500-700 m before and during intense precipitation, while the leeward slope of the mountains is characterized by prolonged warming up to +6 °C in a layer up to 1.5 (sometimes 2.5) km; were determined the quantitative differences in the distribution of crystals and droplets in clouds from the windward and leeward slopes of the mountains during, before and after the moments of maximum precipitation intensity; a qualitative difference in the vertical distribution of particles and quantitative differences in the distribution of the mass concentration of water vapor were obtained for various cases of intense precipitation in the winter and transition seasons.

Based on the analysis of droplet and crystal distributions' 3D visualization, the presence of rain cells along the west coast of the Antarctic Peninsula, even during the winter cyclonic event, was determined, as well as the relative location of snow, ice crystals and droplets of different sizes in the Antarctic Peninsula region during moments of intense precipitation on the west coast of the peninsula.

The study results of the spatiotemporal climatic characteristics associated with the precipitation and cloud cover formation process are presented in the fourth chapter. The analysis was made for the Ice Water Path and Condensed Water Path, the liquid sum and fraction of precipitation, the total amount of precipitation, and the extremity of precipitation according to their 95th percentile and Simple Daily Intensity Index. In addition, the change in the number of consecutive wet and dry days was evaluated as an indicator of climate humidity/aridity, and the cold temperature regime by the number of ice and frost days. The determined parameters were assessed based on the Polar-CORDEX regional climate models' data, where the boundary and initial conditions of the CMIP5 global climate model's data were used. Additionally, for the comparison, the values of the ERA5 reanalysis were used. The study was conducted for 1986-2005, 2041-2060 and 2081-2100 periods. The studied indices were selected according to the World Climate Research Program recommendations;

cloudiness characteristics were available in regional climate models. Climate model data were processed with the open-source environment Climate4R, Climate Data Operators (CDO), and Python.

It was found that the changes in the considered parameters at the end of the century under the RCP 4.5 scenario are mainly comparable to those in the middle of the century under the RCP 8.5 scenario. Separate subregions of the Antarctic Peninsula with different predicted changes in climatic conditions have been distinguished by visual analysis. In particular, they are:

- The leeward slopes of Graham Land and Palmer Land: high warming rate, the smallest increase in the values of condensed water and ice water path in the region, a slight increase of the precipitation amount, and a reduction of the consecutive wet day periods;
- The windward slopes of the ridges of Graham Land and Palmer Land: maximum of precipitation increase; relatively low warming rate; a significant reduction in the number of consecutive dry days and increase in the number of consecutive wet days; the region between Vernadsky and Rosera stations has the most significant annual amount of liquid precipitation in the studied area, and a moderate increase in the condensed water and ice water path;
- The west coast and islands, including Alexander I Island and George VI Strait: significant warming; precipitation amounts and intensity are expected to increase; more extended periods of consecutive wet days; at the same time, the lowest amount of precipitation and its liquid fraction; the most significant increase in the condensed water and ice water path over the studied region;
- The Weddell Sea region: changes in ice water path have a meridional distribution with maximum values in the south; condensed water path is increased; 95th percentile precipitation intensity values are the lowest but the most considerable changes in the number of days with daily precipitation greater than the 95th percentile mean of a

historical period; significantly fewer days with precipitation than in other parts of the Antarctic Peninsula region;

- The southeast Pacific Ocean: high annual precipitation and the largest share of rain in total precipitation with the most significant projected increase in the share of liquid precipitation during the 21st century compared to the historical period.

The obtained results can be used to improve the forecast of intense precipitation and, therefore, for the planning of safer expeditionary missions and navigation in the region; to determine the mass balance of glaciers, the formation of surface runoff and other processes in the region of the Antarctic Peninsula, as well as in mid-latitudes, for example, for cases of intense snowfall in Ukraine. Gained results could be used as a basis for research in related scientific fields, for example, the impact on ecosystems and for assessing changes in biodiversity in the region.

**Keywords:** cloud formation, precipitation formation, Antarctic Peninsula, Representative Concentration Pathways, Polar WRF, climate change, cloud microphysics, precipitation microphysics, orographic amplification, mesoscale circulation, regional climate model, numerical simulation, temperature regime, moisture regime, climate index.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та /або Scopus

1. Chyhareva, A., Krakovska, S., & Pishniak, D. (2019). Climate projections over the Antarctic Peninsula region to the end of the 21st century. Part 1: cold temperature indices. *Ukrainian Antarctic Journal*, 1(18), 62-74. [https://doi.org/10.33275/1727-7485.1\(18\).2019.131](https://doi.org/10.33275/1727-7485.1(18).2019.131) (Q4 Scopus). *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій, розрахунки, візуалізація результатів, узагальнення та опис отриманих результатів)*
2. Chyhareva A., Krakovska S., Pishniak D. Climate projections over the Antarctic Peninsula region to the end of the 21st century. Part II: wet/dry indices. *Ukrainian Antarctic Journal* 2019. № 2 (19), p. 47 – 63, DOI: [https://doi.org/10.33275/1727-7485.2\(19\).2019.151](https://doi.org/10.33275/1727-7485.2(19).2019.151). (Q4 Scopus). *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій, розрахунки, візуалізація результатів, узагальнення та опис отриманих результатів)*
3. Chyhareva, A., I. V. Gorodetskaya, S. Krakovska, D. Pishniak, P. Rowe. Precipitation phase transition in austral summer over the Antarctic Peninsula *Ukrainian Antarctic Journal*, 2021. № 1(2021), DOI: <https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2021.664> ст. 32-46 (Q4 Scopus). *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень, реаналізу, моделювання за допомогою чисельної моделі Polar WRF, обробка та візуалізація результатів, узагальнення та опис отриманих результатів)*
4. Chyhareva, A., & Krakovska, S. (2022). Climate projections over the Antarctic Peninsula region to the end of the 21st century. Part III: clouds and extreme precipitation. *Ukrainian Antarctic Journal*, 20(2), 188–202. DOI: <https://doi.org/10.33275/1727-7485.2.2022.699> (Q4 Scopus). *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій, розрахунки, візуалізація результатів, узагальнення та опис отриманих результатів)б*



5. Osypov, V., Speka, O., **Chyhareva, A.**, Osadcha, N., Krakovska, S., Osadchyi, V. (2021) Water resources of the Desna river basin under future climate. Journal of Water and Climate Change ; 12 (7): 3355–3372. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.034> (*Q2 Web of Science*) (*Особистий внесок автора – аналіз літературних джерел, збір та обробка даних кліматичних проєкцій за методикою, описаною в дисертації, розрахунки кліматичних змін метеорологічних параметрів, узагальнення результатів*)
6. Krakovska S., Palamarchuk, L., Azarov Y., **Chyhareva A.**, & Shpytal T. (2023). The least squares method in estimating the accuracy of surface air temperature projections based on ensembles of regional climate models. Geofizicheskiy Zhurnal, 44(5), 34–53. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i5.272326> (*Q4 Web of Science*) (*Особистий внесок автора – аналіз літературних джерел, збір та обробка даних кліматичних проєкцій за методикою, описаною в дисертації*)

#### **Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

7. **Chyhareva A.**, Gorodetskaya I., Luis D., Wille J., Passalacqua G., Krakovska S., Cloud and precipitation microphysics during atmospheric river events at the Antarctic Peninsula». Virtual Symposium by the International Atmospheric Rivers Conference (IARC) Community (5-9 жовтня 2020), Book of Abstracts [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2020/IARC\\_Book\\_of\\_Abstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2020/IARC_Book_of_Abstracts.pdf) (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення*)
8. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Gorodetskaya, I., Pishniak, D., Wille, J., and Rowe, P.: Cloud and precipitation microphysics evaluated with ERA-5 and Polar WRF over the northern Antarctic Peninsula, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13058, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13058>, 2021 (*Особистий*

*внесок автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення )*

9. Pishniak, D., Krakovska, S., **Chyhareva, A.**, and Razumnyi, S.: Preliminary analysis and main problems of instrumental measurement complex at the Vernadsky Antarctic Station, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13591, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13591> , 2021. *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень, аналіз результатів)*
10. Krakovska, S., Balabukh, V., **Chyhareva, A.**, Pysarenko, L., Trofimova, I., and Shpytal, T.: Projections of regional climate change in Ukraine based on multi-model ensembles of Euro-CORDEX, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13821, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13821> , 2021. *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів)*
11. **Chyhareva A.**, S. Krakovska, I. Gorodetskaya, D. Pishniak. Preliminary results of PolarWRF application for cloud and precipitation study at Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station». X International Antarctic Conference (Kyiv, Ukraine, May 11-13, 2021). Book of Abstracts <http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Abstracts-X-IAC-2021.pdf> *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення )*
12. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Palamarchuk, L., and Gorodetskaya, I.: Mixed cloud properties during high-intensity precipitation events over Northern Antarctic Peninsula, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10388, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10388> , 2022. *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення)*

13. Krakovska, S., Shpytal, T., **Chyhareva, A.**, Pysarenko, L., Trofimova, I., and Kryshp, L.: Ensembles of Euro-CORDEX RCMs for assessment of specialized climate indices in Ukraine, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10724, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10724> , 2022. *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів)*
14. Rowe P., Zou X., Gorodetskaya I., Cordero R., Wille J., **Chyhareva A.**, Ralph F.M., Bromwich D., Kawzenuk B., and Zhang Z.: Foehn Warming over the Antarctic Peninsula Amplified by Strong Atmospheric Rivers. International Atmospheric River Conference 2022, [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf) *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський)*
15. Durán-Alarcón C., Gorodetskaya I., **Chyhareva A.**, Rowe P., Zou X., Dutrievoz N., Krakovska S., Afteniuk O., Favier V., Campos D, Cordero R., Cabello F., Jiménez-Sánchez G., Chicaeme K.: Rainfall and snowfall during two strong atmospheric river events in the Antarctic Peninsula in summer 2022: characterization and evaluation of impact on surface mass balance. International Atmospheric River Conference 2022 [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf) *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський)*
16. Dutrievoz N, Gorodetskaya I., Durán-Alarcón C., Santos C. L.-D., **Chyhareva A.**, Krakovska S, Agosta C., Fourre E., Landais A., Wille J., Favier V., Dethinne. T., Kittel C.: Summer atmospheric rivers during February 2022 at the Antarctic Peninsula: large-scale circulation, moisture sources and precipitation. International Atmospheric River Conference 2022. [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf) *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський)*

17. Gorodetskaya I., Zou X., Durán-Alarcón C., Rowe P., González-Herrero S., Dutrievoz I. N., Imazio P., Wille J., Park S., Campos D., Cordero R., Carrasco J., Colwell S., Gulisano A., **Chyhareva A.**, Krakovska S., Ralph F.M.: Summer 2022 temperature extremes at the Antarctic Peninsula triggered by a strong atmospheric river and foehn. International Atmospheric River Conference 2022 [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf) (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський*)
18. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Gorodetskaya, I., and Palamarchuk, L.: Cloud and precipitation profiles from observations and Polar-WRF simulations over Vernadsky station (western Antarctic Peninsula) during austral winter 2022, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-667, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-667> , 2023. (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення* )
19. Pysarenko, L., Krakovska, S., Shpytal, T., **Chyhareva, A.**, Trofimova, I., and Kryshtop, L.: Projections of continentality and cold season indices in Ukraine based on the ensembles of Euro-CORDEX RCMs, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-727, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-727>, 2023. (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів*)
20. Krakovska, S., Balabukh, V., **Chyhareva, A.**, Shpytal, T., Pysarenko, L., Trofimova, I., and Kryshtop, L.: Assessment of climatic season changes in Ukraine during 21st century based on an ensemble of 34 RCM projections of Euro-CORDEX, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-835, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-835> , 2023. (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів*)

21. Mottram, R., Mooney, P., and Torres, J. A., Chyhareva, A., and the PolarRES Consortium: A first look at the new PolarRES ensemble of polar regional climate model storylines to 2100, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-14470, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-14470> , 2023. *(Особистий внесок автора – збір, обробка та аналіз даних в межах виконання завдань у Work Packages 3, 4 та 5 проекту PolarRES, за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів)*
22. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S. Year of Polar Prediction in the Southern Hemisphere at Vernadsky station: Preliminary results on cloud characteristics from the radiosounding measurements and modelling. XI International Antarctic Conference (Kyiv, Ukraine, May 10-12, 2023) Book of Abstracts [http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts\\_IAC-11\\_2023\\_.pdf](http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts_IAC-11_2023_.pdf) *(Особистий внесок автора – збір, обробка та аналіз даних спостережень на станції Академік Вернадський, моделювання з чисельною моделлю PolarWRF)*
23. Krakovska, S., **Chyhareva, A.** Rain fraction of precipitation during the 21st century as an indicator of climate change in the Antarctic peninsula region. XI International Antarctic Conference (Kyiv, Ukraine, May 10-12, 2023) Book of Abstracts [http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts\\_IAC-11\\_2023\\_.pdf](http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts_IAC-11_2023_.pdf) *(Особистий внесок автора – збір, обробка аналіз та візуалізація даних проєкцій змін клімату)*
24. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S. (2023): PolarWRF microphysics' schemes sensitivity to cloud droplets concentration in the Antarctic Peninsula region, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4618>. *(Особистий внесок автора – збір та обробка вхідних даних, моделювання з чисельною моделлю PolarWRF, аналіз та візуалізація отриманих результатів)*

25. Dutrievoz, N., Agosta, C., Nguyen, S., Risi, C., Vignon, E., Landais, A., Leroy-Dos Santos, C., Fourné, E., Cauquoin, A., Werner, M., Gorodetskaya, I., **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Minster, B., Prié, F. (2023): An observational benchmark for water isotope-enabled atmospheric general circulation models in Antarctica, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4358>. (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський*).
26. Mottram, R., Mooney, P., Chyhareva, A., PolarRES Consortium. (2023): A new ensemble of Arctic and Antarctic regional climate models with storylines to 2100, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-3080> (*Особистий внесок автора – збір, обробка та аналіз даних в межах виконання завдань у Work Packages 3, 4 та 5 проекту PolarRES, за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів*)

## ЗМІСТ

Список скорочень .....	27
Вступ .....	29
Розділ 1. Сучасні дослідження характеристик хмар та опадів в полярних регіонах.....	37
Підсумки першого розділу.....	46
Розділ 2 Початкові дані та методичні підходи до дослідження полярних хмар та опадів .....	48
2.1 Методичні підходи до аналізу процесів хмаро- та опадоутворення регіонального та мікрофізичного масштабу .....	48
2.1.1. Наземні спостереження.....	49
2.1.2 База даних ERA5.....	51
2.1.3 Числова модель Polar WRF.....	52
2.1.4 Вибір мікрофізичної параметризації моделі Polar WRF для регіону Антарктичного півострова та її апробація для території України.....	55
2.1.5. Візуалізація даних спостережень та моделювань .....	64
2.2. Методичні підходи до аналізу кліматичних характеристик хмар та опадів у регіоні .....	65
2.2.1 Ансамбль кліматичних моделей та сценарії.....	65
2.2.2 Програмне забезпечення для обробки даних РКМ.....	67
2.2.3 Кліматичні індекси .....	68
2.2.4 Методологія аналізу змін значень кліматичних індексів.....	70
Підсумки другого розділу .....	71

Розділ 3 Процеси формування полярних хмар та інтенсивних опадів в районі Антарктичного півострова .....	74
3.1. Літні хмари і опади .....	76
3.1.1. Синоптична характеристика.....	76
3.1.2. Мезомасштабні атмосферні процеси.....	79
3.1.3. Умови формування інтенсивних опадів із екстремальними температурами.....	86
3.2. Хмари та опади в перехідний сезон.....	91
3.2.1 Синоптичні умови .....	92
3.2.2 Мезомасштабні атмосферні процеси.....	96
3.2.3 Мікрофізичні характеристики хмар та опадів .....	102
3.3. Зимові хмари та опади.....	115
3.3.1 Синоптичні умови .....	116
3.3.2. Мезомасштабні характеристики .....	120
3.3.3. Мікрофізичні характеристики .....	130
Підсумки третього розділу .....	141
Розділ 4 Кліматичні проєкції хмар та опадів в районі Антарктичного півострова до кінця XXI ст. ....	145
4.1. Зміни температурних характеристик холодного періоду.....	146
4.1.1 Індекс на основі мінімальної температури повітря (FD).....	146
4.1.2 Індекс на основі максимальної температури повітря (ID) .....	150
4.2. Зміна режиму зволоження/посушливості .....	155
4.2.1. Аналіз індексів зволоження/посушливості в районі Антарктичного півострова в історичний період .....	156



	25
4.2.2. Проекції індексів у ХХІ столітті .....	157
1.2.3. Просторовий розподіл.....	159
4.3. Зміна характеристик хмар та екстремальних опадів.....	163
4.3.1. Інтегральний вміст сконденсованої вологи і льоду в атмосфері.....	163
4.3.2. Рідка фаза опадів .....	165
4.3.3. Дуже сильні опади.....	172
Підсумки четвертого розділу.....	175
Висновки .....	181
Список використаних джерел.....	185
Додатки .....	207
Додаток А. Структура дисертації, район дослідження та особливості конфігурації моделі Polar WRF.....	207
Додаток Б. Характеристики хмар та опадів 31 березня– 2 квітня 2021 року	211
Б1. 3D візуалізація масових концентрацій крапель дощу, хмар, кристалів льоду та снігу для Антарктичного півострова (г/кг) 1 квітня 2021 20 UTC .....	211
Б2. Профіль температури повітря у шарі до 2,5 км .....	216
Б3. Масові концентрації крапель дощу, хмар, кристалів льоду та снігу у вертикальному перерізі (г/кг) .....	221
Б4. Кількісні концентрації льоду та крапель води у вертикальному перерізі (од/г) .....	226
Додаток В. Вертикальний переріз через станцію «Академік Вернадський», гори Антарктичного півострова та бухту льодовика Ларсен В 21– 22 серпня 2022 року .....	231
В1. Профіль температури повітря у шарі до 2,5 км .....	231

В2. Масові концентрації крапель дощу (rain) і хмар (cloud), кристалів льоду (ice) та снігу (snow) .....	237
В3. Кількісні концентрації льоду (ice) та рідких опадів (droplet) у вертикальному перерізі .....	243
В4. 3D візуалізація масових концентрацій крапель дощу, хмар, кристалів льоду та снігу для регіону Антарктичного півострова (г/кг) 21серпня 2022 08:00UTC.....	249
Додаток Г. Часовий хід зміни індексів режиму зволоження для Антарктичного півострова та для району станції «Академік Вернадський».....	254
Додаток Д. Список публікацій за темою дисертації .....	258

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

- ГКМ – глобальні кліматичні моделі
- МГЕЗК – Міжурядова група експертів зі зміни клімату
- РКМ – регіональні кліматичні моделі
- CALIPSO – Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations.
- CAPE – Convective Available Potential Energy
- CDD – Consecutive dry days
- CDO – Climate data operators
- CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
- CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
- CWD – Consecutive wet days
- CWP – Condensed Water Path,
- ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- ERA5 – п'яте покоління реаналізу ECMWF глобального клімату та погоди за останні 8 декад
- FD – Frost days
- GCOM – W1 / AMSR2 - Global Change Observation Mission – Water . Радіометр The Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 на супутнику місії the Global Change Observation Mission - Water1
- ID – Ice days
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
- IWP – Ice Water Path
- MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, спектрорадіометр з візуалізацією середньої роздільної здатності, що встановлений на супутниках Terra (EOS AM-1) та Aqua (EOS PM-1)

MOSAiC – The Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate expedition

NCAR – National Center for Atmospheric Research

POI – Point of Interest

Polar-CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment for the Polar Regions

PRCPTOT – Precipitation total

RCP – Representative Concentration Pathway

SDII – Simple daily intensity index

SYNOP – surface synoptic observations

UTC – Coordinated Universal Time

WCRP – World Climate Research Program

WRF – Weather Research and Forecasting Model

YOPP-SH – Рік Полярного Прогнозування в Південній Півкулі

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Атмосферні процеси в полярних регіонах є важливою складовою глобальної циркуляції та значно чутливі до зміни клімату та безпосередньо впливають на формування режиму погоди у помірних широтах. Підвищення температури у високих широтах спричиняє танення льодовиків, пакового льоду та зміни у кріосфері в цілому, що в свою чергу впливає на інші складові кліматичної системи. Впродовж останніх десятиліть найсуттєвіше потепління в кліматичній системі спостерігається саме в полярних регіонах, зокрема і в регіоні Антарктичного півострова, де розташована українська антарктична станція «Академік Вернадський». Відповідно до 5-го та 6-го звітів Першої робочої групи Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК / Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) за проєкціями кліматичних моделей за усіма сценаріями середня приземна температура повітря найшвидше буде зростати у полярних широтах, де також очікується значне зростання кількості опадів, але їхній фазовий стан не досліджувався, хоча він має визначний вплив на стан кріосфери і відповідно кліматичну систему у цілому. У зв'язку з цим необхідно провести комплексну оцінку тенденцій зміни кліматичних показників, які визначатимуть стан полярних регіонів у майбутньому, що можна зробити на основі даних кліматичних проєкцій.

Представлення в числових моделях хмаро- та опадоутворюючих процесів є одним з основних факторів появи похибок у всіх регіонах. Але в полярних регіонах все ще бракує даних наземних, аерологічних, супутникових та інших прямих та дистанційних вимірів для верифікації числових моделей, що значно знижує можливості дослідження. Через це в останні десятиліття провідні наукові центри об'єдналися навколо міжнародних ініціатив для дослідження полярних регіонів. Це зокрема Проєкт координованого масштабування регіональними кліматичними моделями для полярних регіонів (Polar CORDEX), розробка числової моделі Polar

WRF – версії Weather Research and Forecasting Model, що оптимізована для полярних регіонів, та інші наукові розробки та проекти, кількість яких значно зросла особливо після Міжнародного полярного року 2007-2008.

Таким чином є необхідність та можливість проведення ґрунтовних досліджень мікрофізичних та мезомасштабних властивостей хмар та опадів у полярних регіонах з метою покращення розуміння процесів їхнього утворення для моделей прогнозу погоди та зміни клімату, що сприятиме розробці кращих адаптаційних заходів у майбутньому в полярних регіонах.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.**

Дослідження за темою дисертації виконано в лабораторії прикладної кліматології Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України, де в рамках виконання НДР № 3/19 (ДР № 0119U001123) «Розроблення оновлених сценаріїв зміни характеристик регіонального клімату України до кінця ХХІ ст.» були розроблені методичні підходи до обробки та аналізу даних кліматичних проєкцій. Основні результати дисертаційного дослідження були отримані в рамках виконання НДР відповідно до Договорів з Державною установою Національний антарктичний науковий центр МОН України за Державною цільовою науково-технічною програмою проведення досліджень в Антарктиці на 2011-2023 роки:

- НДР «Формування атмосферних опадів та їхній вплив на поверхневий стік в регіоні Антарктичного півострову» (2021 рік; № д.р. 0121U112395);
- НДР «Узагальнення регіональних кліматичних умов на основі даних спостережень та моделювання» (2023 рік; № д.р. 0123U103709);
- «Дослідження мікрофізичних властивостей хмар та опадів в районі Антарктичної станції «Академік Вернадський»» (ТЗ на участь у сезонній роботі 26 Української антарктичної експедиції 2021 року);
- «Дослідження вертикальних профілів термодинамічних характеристик атмосфери та мікрофізичних властивостей хмар і опадів у районі Антарктичної станції

«Академік Вернадський»» (ТЗ на участь у сезонній роботі 27 Української антарктичної експедиції 2022 року).

Окремі завдання дослідження реалізовано в рамках міжнародного проєкту PolarRES, що фінансується програмою Європейського Союзу з досліджень та інновацій Horizon-2020 H2020-LC-CLA-2018-2019-2020, номер грантової угоди 101003590 (<https://polarres.eu>).

**Об'єктом** дисертаційного дослідження є хмари та опади в районі Антарктичного півострова.

**Предметом** є мезомасштабні та мікрофізичні процеси хмаро- та опадоутворення під час випадків інтенсивних опадів зі зміною фази в районі Антарктичного півострова.

**Метою** дисертаційної роботи є визначення мезомасштабних та мікрофізичних особливостей процесів хмаро- та опадоутворення під час випадків інтенсивних опадів в районі Антарктичного півострова та аналіз їх кліматичних проєкцій до кінця XXI століття. Відповідно до поставленої мети в роботі вирішувались наступні **завдання**:

1. Визначення відповідних методичних підходів до аналізу характеристик режиму хмар та опадів до кінця XXI ст., зокрема оптимальних налаштувань регіональної чисельної моделі Polar WRF для моделювання випадків з інтенсивними опадами
2. Оцінка мезомасштабних умов формування інтенсивних опадів, що впливають на вразливі до зміни клімату регіони Антарктичного півострова
3. Визначення особливостей мікрофізичних характеристик хмар та опадів під час випадків інтенсивних опадів зі зміною фази в районі Антарктичного півострова
4. Оцінка кліматичних проєкцій до кінця XXI століття та визначення областей з різною вразливістю до зміни кліматичних індексів, що асоціюються з режимом хмаро- та опадоутворення у районі Антарктичного півострова

**Матеріали та методи дослідження.** Для проведення дисертаційного дослідження використовувалися дані бази реаналізу ERA5, регіональних кліматичних моделей міжнародної ініціативи ANT-CORDEX з початковими і граничними умовами глобальних кліматичних моделей з проєкту CMIP5 та дані спостережень і вимірів на станції «Академік Вернадський» та інших в районі Антарктичного півострова.

Для виконання поставлених задач у дослідженні використовувалися наступні методи:

*1. Загальні методи наукових досліджень:*

- Емпіричні методи (порівняння, вимірювання, експеримент):
  - збір первинних даних під час участі у сезонному загоні 26 та 27 Українських антарктичних експедицій;
  - проведення радіозондування;
  - порівняння результатів моделювання різних конфігурацій моделі Polar WRF;
  - порівняння результатів моделювання для різних ділянок Антарктичного півострова
- Комплексні методи:
  - Абстрагування: досліджується регіон Антарктичного півострова, циркуляційні процеси розглядаються в межах виділеної ділянки, мікрофізичні процеси досліджуються на основі результатів моделювання, що мають просторове розділення 1 км;
  - Аналіз різних типів вхідних даних та їх синтез під час дослідження;
  - Числове моделювання (налаштування конфігурації числової моделі Polar WRF);
- Фундаментальні методи наукового дослідження полягали у використанні дедукції, а саме покроковому аналізі кліматичних характеристик, мезомасштабних процесів та мікрофізичних особливостей хмаро- та опадоутворення для окремих випадків інтенсивних опадів в регіоні, та індукції з узагальненням отриманих результатів.



## *2. Спеціальні методи наукового дослідження:*

- Кліматичний аналіз за даними реаналізу ERA5 та проєкцій зміни клімату ANT-CORDEX CMIP5 з використанням мов програмування Python та R;
- Синоптичний аналіз за даними реаналізу ERA5 та моделювання PolarWRF;
- Метод математичної статистики у середовищі Climate Data Operators (розрахунки усереднених та екстремальних показників за ансамблями кліматичних моделей);
- Графічні методи: візуалізація даних спостережень, вимірів, кліматичних моделей, реаналізу та даних моделювання, для чого адаптовано стандартні скрипти бібліотек wrf-python та MetPy;
- Візуальний аналіз просторово часових розподілів рядів даних.

## **Наукова новизна отриманих результатів**

### *Вперше:*

- за результатами числового моделювання Polar WRF кількісно оцінено та знайдено спільні і відмінні риси характеристик мікрофізичних процесів опадо- та хмароутворення на перерізі через гори Антарктичного півострова від станції «Академік Вернадський» до бухти на місці зруйнованого льодовика Ларсен В під час проходження інтенсивних циклонів;
- за проведеним комплексним аналізом на основі супутникових даних, реаналізу і числового моделювання визначено основні мезомасштабні процеси, що асоціювалися з інтенсивними опадами зі зміною фази для різних сезонів в районі Антарктичного півострова;
- за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей на основі аналізу спеціалізованих кліматичних індексів кількісно оцінено зміни температурного режиму холодного періоду, режиму рідких опадів та характеристик хмар, включно з водною фракцією, над Антарктичним півостровом;

- запропоновано районування регіону Антарктичного півострова на основі проведеного аналізу зміни кліматичних індексів та визначено території, що найбільш вразливі до зміни режиму опадів, хмарності та приземної температури.

*Удосконалено* методичний підхід до отримання кліматичної характеристики регіону Антарктичного півострова на основі даних РКМ включно з оцінкою змін кліматичних характеристик, що пов'язані з хмаро та опадоутворенням.

*Дістали подальший розвиток:*

- застосування числового моделювання з високою просторово-часовою роздільною здатністю для дослідження мезомасштабних та мікрофізичних процесів, що пов'язані з формуванням інтенсивних опадів в регіоні Антарктичного півострова;
- розуміння особливостей різних конфігурацій числової моделі Polar WRF щодо параметризацій фізичних процесів в регіоні Антарктичного півострова.

**Практичне значення отриманих результатів.** Визначена оптимальна конфігурація числової моделі Polar WRF для інтенсивних опадів може застосовуватися у подальших дослідженнях в регіоні Антарктичного півострова, зокрема для визначення процесів мас-балансу льодовиків, формування поверхневого стоку та інших, а також у помірних широтах, наприклад для випадків інтенсивних снігопадів в Україні (модифікація WRF). Удосконалений методичний підхід до отримання кліматичної характеристики регіону Антарктичного півострова може бути застосований із використанням нового покоління РКМ і сценаріїв, або оцінки проєкції інших атмосферних процесів, що не розглядалися в дослідженні, наприклад, зміни радіаційного балансу в регіоні для того самого набору РКМ з ANT CORDEX. Отримані результати можуть бути використані для підготовки бакалаврів та магістрів, зокрема у рамках дисциплін «Прикладна метеорологія», «Фізика атмосфери», «Гідродинамічні методи в метеорології. Основи синоптичної метеорології» на географічному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка; учасників антарктичних експедицій; як база для досліджень, наприклад

впливу на екосистеми і для оцінки зміни біорізноманіття в регіоні, зокрема через відкриття суходолу, який раніше був під снігом/льодом; для покращення прогнозу інтенсивних опадів, а отже планування безпечніших експедиційних місій та навігації у регіоні.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати та положення представленого дослідження отримані автором самостійно. Автором дисертації розроблено методичні підходи до візуалізації просторово-часових даних; адаптовано модель Polar WRF до регіону Антарктичного півострова (вибір на основі порівняльного аналізу результатів моделювання з різними мікрофізичними параметризаціями хмар та опадів). Результати радіозондування для серпня 2022 року, що використані у дослідженні, були виконані метеорологами зимового загону 27ї Української антарктичної експедиції, але авторка була ініціаторкою, організаторкою та виконавицею перших радіозондувань на станції «Академік Вернадський» для дослідження вертикальної структури атмосфери в регіоні Аргентинських островів під час міжнародного проєкту Year of Polar Prediction у березні-квітні 2022 року.

Постановку мети та завдань дослідження, інтерпретацію основних результатів здійснено разом з науковим керівником Краковською С.В. Особистий внесок автора у праці, що опубліковано у співавторстві, наведено окремо у списку публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження було представлено на 15 міжнародних конференціях:

1. 2020 Polar CORDEX Meeting, 5-7 жовтня 2020;
2. Virtual Symposium by the International Atmospheric Rivers Conference (IARC) Community, 5-9 жовтня 2020;
3. EGU General Assembly 2021 (Відень, Австрія, квітень 19–30, 2021);
4. X International Antarctic Conference (Київ, Україна, травень 11-13, 2021);
5. Workshop on Antarctic Meteorology and Climate (WAMC) - 21-23 червня 2021;
6. The international YOPP-SH meeting – 24-25 червня 2021;

7. Polar CORDEX Meeting – 14-16 жовтня 2021;
8. PolarRES Workshop “Earth Observation Data with Polar Climate Models” (11 травня 2022, Копенгаген, Данія);
9. EGU General Assembly, 23-27 травня 2022, Відень, Австрія;
10. IX Всеукраїнська молодіжна науково-практична конференція 21-22 червня 2022, Київ, Україна (онлайн);
11. Cryosphere 2022, 21–26 серпня, 2022, Рейк’явік, Ісландія (онлайн);
12. International Atmospheric River Conference, 10-14 жовтня 2022, Сантьяго, Чилі (онлайн);
13. EGU General Assembly, 23-28 квітня 2023, Відень, Австрія;
14. XI International Antarctic Conference (Київ, Україна, травень 10-12, 2023);
15. XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), 11-20 липня 2023, Берлін, Німеччина.

Також основні результати дисертаційного дослідження було представлено на наукових семінарах відділу прикладної метеорології та кліматології Українського гідрометеорологічного інституту, відділу фізики атмосфери та геокосмосу Державної установи Національний антарктичний науковий центр та під час участі у міжнародній онлайн школі IS-ENES3 autumn school, 4 листопада – 11 грудня 2021 року; PolarRES early carrier scientists bootcamp 2-8 липня 2023 року; стажуванні у National Center for Atmospheric Research 23 лютого 2023.

**Публікації:** основні результати досліджень опубліковано у 26 наукових працях, зокрема у 6 статтях у наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science та 20 тезах конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел (133 найменування) та додатків. Повний обсяг роботи становить 263 сторінки тексту. Основна частина дисертаційної роботи складається з 150 сторінок та налічує 76 рисунків і 5 таблиць.

## РОЗДІЛ 1.

### СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ХМАР ТА ОПАДІВ В ПОЛЯРНИХ РЕГІОНАХ

Полярні регіони є важливими компонентами глобальної кліматичної системи та мають значний вплив на взаємодію океан-суходіл-атмосфера. Підвищення температури у полярних широтах спричиняє танення льодовиків, пакового льоду та зміни граничних умов кріосфери, що, у свою чергу, впливає на інші компоненти кліматичної системи (IPCC, 2013). Оцінка динаміки зміни клімату в полярних регіонах за різними сценаріями антропогенних викидів є важливим для ранньої адаптації людства до можливих наслідків зміни клімату.

В останні десятиліття найбільше потепління в кліматичній системі спостерігається саме в полярних регіонах, однак над Антарктичним континентом воно не є однорідним. За даними вимірів антарктичних науково-дослідних станцій за період 1966-2000 найвищий показник потепління спостерігається саме в районі Антарктичного півострова, де розташована і українська науково-дослідна станція «Академік Вернадський». (Doran et al., 2002; Steig et al., 2009; Convey and Smith et al., 2005; Krakovska et al., 2010; Krakovska et al., 2017; Gutiérrez et al., 2021). За результатами дослідження (Jones et al., 2019) на станції «Фарадей»/«Академік Вернадський» спостерігається статистично значущий тренд до потепління, що становить  $0,49 \pm 0,28$  °C за декаду у період 1957-2016 роках. Відповідно до проєкцій кліматичних моделей з 5-го звіту Робочої групи Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC, 2013), середня приземна температура повітря в майбутньому продовжуватиме зростати найшвидше також у полярних широтах (Meredith et al., 2019).

Регіон Західної Антарктики та Антарктичного півострова входить до переліку основних так званих «елементів переходу» (tipping elements) у кліматичній системі,

які при досягненні «точки неповернення» (tipping point), можуть спричинити каскадні ефекти та зміни екосистеми планети у цілому (McKay et al., 2022). Тому цей регіон є особливо вразливим до потепління клімату через наявність великої кількості шельфових льодовиків, зокрема великого шельфового льодовика Ларсена, де в останні десятиліття спостерігаються значні процеси руйнування та танення (Marshall et al. 2006). В цьому регіоні існують унікальна наземна та морська екосистеми, які можуть бути зруйновані подальшим потеплінням в першу чергу через хвилі тепла в атмосфері та в океані, підкислення морської води, збільшення частки талої води, а також через відступ льодовиків (Smith et al., 1999; Trivelpiece et al., 2011; Siegert et al., 2019; Rörtner et al., 2019). Такі зміни можуть спричинити також значне підвищення рівня моря (IPCC, 2013, 2021).

Багато біологічних досліджень, наприклад Convey & Smith (2005), виявили, що підвищення температури повітря та морської води, зменшення льоду та снігового покриву на островах і материках в основному призводять до збільшення та розвитку біорізноманіття в цьому регіоні. У той же час нові більш м'які погодні умови літа південної півкулі сприяють зростанню туристичної індустрії та рибальства, а також спрощеним логістичним операціям для антарктичних станцій і біологічних, океанографічних та інших досліджень. Дослідження можливої зміни клімату в цьому регіоні стосується зміни розподілу снігового/льодового покриву в майбутньому і впливу на загальне біорізноманіття, розробки стратегії майбутніх логістичних та наукових операцій. У зв'язку з цим важливо розуміти прояви зміни клімату у полярних регіонах, які мають місце зараз і очікуються в майбутньому.

Атмосферні процеси в районі Антарктичного півострова відрізняються від континентальної Антарктики та морської Арктики (Bromwich et al., 2012). Оскільки, Антарктичний півострів перебуває під впливом як теплих океанічних західних вітрів, так і холодних вітрів з континенту (Turner et al., 2005), прогнозоване потепління посилить випаровування з океану, що призведе до збільшення вологовмісту в

атмосфері, тобто більшої кількості води в стовпі атмосфери, що потенційно доступна для формування хмар та опадів (Feng et al., 2019). І це змінюватиме характер опадів та кількість хмар у полярних регіонах (Pörtner et al., 2019).

Збільшення вологовмісту у стовпі атмосфери ймовірно, може посилити процеси формування атмосферних річок, які мають значний вплив на процеси хмаро- та опадоутворення, але досі невизначений вплив на формування снігового та льодового покриву в Антарктиці (Wille et al., 2019). Зростання кількості рідких опадів було зафіксовано під час попередніх подій, що асоціюються із затоком теплого повітря в регіон Антарктичного півострова (Chykhareva et al., 2021; Wille et al., 2022) та його посилення прогнозується у майбутньому за результатами оцінки наступного покоління ГKM CMIP6 (Vignon et al., 2021).

Формування та вплив хмар на кліматичну систему регіону може проявлятися опосередковано через розсіяну радіацію та напряму через формування опадів та зміну альbedo поверхні (Bennartz et al., 2013). Тверді і рідкі опади мають дуже різні властивості і, отже, різний вплив на альbedo суші, баланс маси, гідрологію та клімат (Dai, 2008). Опади в регіоні можуть викликати зміни маси льоду та спричинити танення через взаємодію з поверхнею снігу чи льоду. Було показано, що комбінація наявності хмар та рідких опадів, що випали, можуть посилити процеси танення перешкоджаючи процесам замерзання (Van Tricht et al., 2016). На формування опадів в районі Антарктичного півострова переважно впливають циркуляції синоптичного масштабу, що транспортують вологу з помірних широт (Turner et al., 1995; Krakovskaia & Pirnach, 2003; Gonzalez et al., 2018). Опади є основним додатнім компонентом рівняння балансу маси криги в Антарктиці та впливають на її міжрічну мінливість (The IMBIE team, 2018; Rignot et al., 2019). У дослідженні Vignon et al. (2021) зазначено, що значна частина річних опадів на західному узбережжі Антарктичного півострова випадає у вигляді дощу. В той же час у дослідженнях Wille et al. (2019) та Nicolas et al. (2017) виявлено, що імовірність дощу та пов'язаного з ним приповерхневого

танення у регіоні Західної Антарктиди зростає під час інтенсивних затоків тепла та наявності «атмосферних річок», які приносять з помірних та тропічних широт Тихого океану теплу, насичену вологою повітряну масу. Коли такі системи досягають Антарктичного півострова, вони викликають екстремальні опади над шельфовими льодовиками з навітряного західного боку півострова та феновий вітер над підвітряним східним узбережжям Антарктичного півострова, що було показано у дослідженнях Wille et al. (2022), Zou, X. et al. (2023) та Turton et al. (2018). Затоки теплої, насиченої вологою повітря можуть зруйнувати термальну ізоляцію континенту, що формувалася впродовж еволюції Землі (Li, 2022). Нещодавні дослідження проєкцій змін температури та кількості опадів показали, що за сучасними сценаріями зміни клімату до кінця XXI століття в районі Антарктичного півострова зростатиме кількість днів, коли відбуватиметься приповерхнєве танення (Bozkurt et al., 2021; Vignon et al., 2021).

Параметризація процесів хмароутворення, формування та зміна фази опадів у приземному шарі залишаються невирішеними завданнями для погодного та кліматичного прогнозування, що може викликати невизначеності у отриманих результатах моделювання (Bonu et al., 2015). Для Антарктичного регіону та особливо Південного океану є складнощі у моделюванні поглинутого випромінювання, активації ядер сублімації, розподілу ядер конденсації хмар та взаємодію у системі аерозоль-хмара в цілому. Вирішення цих завдань потребує більш детальних досліджень з використанням моделювання та верифікацією даними вимірів. Наступне покоління РКМ, наприклад, COSMO-CLM2 (Souverijns et al., 2019), та/або результати подальших міжнародних проєктів, наприклад, PolarRES (Lee et al., 2022), може покращити наше розуміння процесу формування опадів у Антарктиці, включаючи рідку фазу, з урахуванням інших факторів, наприклад, відновлення стратосферного озону, кліматичних режимів Southern Annular Mode (SAM) і El Niño–Southern Oscillation (ENSO) та інших. На даний момент оцінка можливої зміни клімату



Антарктики на основі наступного покоління сценаріїв, реалізованих в ансамблях СМІР6, прогнозовані зміни над прибережною Антарктикою не є лінійно залежними від глобального потепління (Bracegirdle et al., 2020).

Варто зауважити, що розуміння мікрофізичних характеристик хмар, опадів та їх зв'язку зі зміною фази опадів у полярних регіонах, особливо в Антарктиці обмежене браком відповідних досліджень і вимірів (Lachlan-Cope et al., 2016). Одне з перших застосувань спектральних моделей хмар для Антарктичного півострова було спрямоване на вивчення мікрофізичних властивостей хмар та опадів показало, що в термодинамічних умовах глибокого позатропічного циклону рідка фаза опадів менш залежала від концентрації в хмарі ядер конденсації, ніж тверда фаза від ядер сублімації (Krakovskaia & Pirnach, 2000). У цілому, точніше представлення процесів формування хмар та опадів, а також типу опадів у полярних регіонах залишається значним викликом сьогодення (Kay et al., 2016; Listowski & Lachlan-Cope, 2017).

Через брак даних спостережень для оцінки числових моделей та асиміляції даних у полярних регіонах невизначеність у прогнозі погоди є вищою, ніж у середніх широтах. За останні десятиліття було досягнуто значного прогресу як у збільшенні спостережень за хмарами та опадами, так і в покращенні параметризації полярних хмар (Bromwich et al., 2012). Кількість досліджень мікрофізичних характеристик хмар у Антарктичному регіоні на порядок менша за кількість відповідних досліджень у помірних широтах. Чотири спільні проекти нещодавно організовані різними науковими установами в Сполучених Штатах і Австралії, були зосереджені на покращенні розуміння хмар, аерозолів, опадів та їх взаємодії в Південному океані: «the Clouds Aerosols Precipitation Radiation and atmospheric Composition Over the Southern Ocean (CAPRICORN)», «Measurements of Aerosols, Radiation and Clouds over the Southern Ocean (MARCUS)», «Macquarie Island Cloud Radiation Experiment (MICRE)», та «Southern Ocean Cloud Radiation and Aerosol Transport Experimental Study (SOCRATES)» (McFarquhar et al., 2021). З метою покращення розуміння хмар

континентальної Антарктиди нещодавно було проведено декілька польових досліджень, зокрема аерологічне польове дослідження в районі станції Розера (Lachlan-Core et al., 2016), Західно-Антарктичний радіаційний експеримент (AWARE) – польові дослідження на базі станції МакМурдо (Lubin et al., 2017) та Рік Полярного Прогнозування в Південній Півкулі (YOPP-SH Bromwich et al., 2020) – спільні узгоджені польові дослідження переважної кількості антарктичних станцій. За даними (Lachlan-Core et al., 2016) для літнього сезону 2010 та 2011 років значення кількості крапель в районі Антарктичного півострова на висоті до 4 км становило від 60 до 200  $\text{cm}^{-3}$ , що є типовим значенням для концентрацій в морських районах. Кількість вимірених значень концентрацій льодяних кристалів була в 5-6 разів меншою за кількість хмарних рідких крапель, а відносна мінливість вищою. Наведені результати можуть використовуватися для дослідження та верифікації випадків опадів у перехідний період. Для зимового періоду відповідні дослідження до цього часу відсутні через складність проведення польових робіт, зокрема літакових зондувань, у регіоні.

Для вивчення переохолодженої води у хмарах використовувалися дані Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO). Такі дані вимірів супутникового лідара надають інформацію для оцінки географічного, вертикального та часового розподілу переохолоджених хмар, що містять воду, у порівнянні із загальною фракцією хмар і повністю крижаними хмарами (Winker et al., 2010; Listowski et al., 2019). Результати представлені у цьому дослідженні виявили, що частка переохолоджених крапельних хмар коливається приблизно від 50% влітку до 20% взимку по всій Антарктиді; середня загальна частка хмар становить близько 70% з незначною міжрічною мінливістю. Найбільша місячна мінливість спостерігається над Антарктичним плато, а найменша – над Західно-Антарктичним льодовиковим щитом.

Бази даних від CALIPSO та спектрорадіометра з помірною роздільною здатністю (MODIS) порівнювалися з проєкціями CMIP5 для інтегрованого вмісту сконденсованої води в атмосфері та компонентів випромінювання, що направлене до земної поверхні (Lenaerts et al., 2017). Було показано, що залежно від моделі в CMIP5 можуть спостерігатися великі стабільні відхилення, які спричиняють заниження або завищення кількості твердих опадів.

Показник хмарності має велику як міжрічну мінливість, так і на коротших часових проміжках, тобто не має чітко визначеного річного ходу в Антарктиці. Однак дослідження, засновані на даних мікроімпульсного лідара, показують, що середня за рік частка хмарності над станцією Мак-Мурдо, яка представляє західне Антарктичне узбережжя, становить 67%, тоді як над станцією Сьова, яка представляє східне Антарктичне узбережжя, становить 74%, а в районі південного полюса становить 40% (Shiobara et al., 2003; Mahesh et al., 2005; Silber et al., 2018).

Оцінка характеристик хмарності та опадів у майбутньому, відповідно до сценаріїв репрезентативних шляхів концентрації (RCP) і на основі кліматичних моделей, залишається важливим науковим завданням для кращого розуміння майбутніх викликів у полярних регіонах (Bennartz et al., 2013; Pörtner et al., 2019; Gutiérrez et al., 2021).

Хоча регіон Антарктичного півострова є найбільш вивченою частиною всієї Антарктиди, властивості хмар є малодослідженими, а опади вивчаються переважно у зв'язку з балансом маси поверхні та температурою, як у дослідженні Gutiérrez et al. (2021). У свою чергу, характеристики зміни режиму опадів допоможуть зрозуміти процес взаємодії крижана поверхня-атмосфера та можливі тенденції танення льодовиків, посилені екстремальними опадами.

Нині числове моделювання є найефективнішим інструментом для вивчення динаміки клімату у минулому, майбутньому та теперішньому, оскільки дозволяє кількісно оцінити можливу зміну характеристик клімату. На жаль, використання

числового моделювання в Антарктиці обмежене через недостатню щільність мережі спостережень. Таким чином, оцінка характеристик кліматичних проєкцій базується на числових методах інтерполяції та прогнозування (IPCC, 2013; Meredith et al., 2019; Pörtner et al., 2019; Gutiérrez et al., 2021; Covey et al., 2003; Giorgi et al., 2015). Застосування інтерполяції на великих просторово-часових масштабах викликає відмінності, у деяких випадках значні, між результатами моделювання та даними спостережень. Серед найбільш суттєвих розбіжностей можна виділити такі: відхилення температури зазвичай трохи вищі над океанами, ніж над континентами; згладження та спрощення в моделях рельєфу; відхилення у результатах проєкцій опадів від даних реаналізу, особливо під час інтенсивної циклонічної активності (Krakovska et al., 2017; IPCC, 2013).

Кліматичні моделі мають складнощі з представленням сумарної кількості твердих опадів в Антарктиді (Agosta et al., 2015). У Palerme et al. (2017), показано, що майже всі моделі CMIP5, з яких беруть початкові та граничні умови для РКМ з CORDEX, які розглянуті у дисертаційному дослідженні, завищують кількість опадів у історичний період порівняно з попередньою версією реаналізу ERA-Interim для всіх розглянутих у статті областей моделювання. У той же час для регіону Антарктичного півострова верхня межа стандартного відхилення середньорічної кількості опадів ансамблю всіх моделей CMIP5 відповідає супутниковим даним CloudSat і становила близько 700 мм – таке саме значення було отримано в Chyhareva et al. (2019b) у пункті 2.4.2 для рідкої фази сумарної кількості опадів. Roussel et al. (2020) дійшли висновку, що у порівнянні з CloudSat і ERA5, ансамбль ГKM CMIP6 не є принципово кращим за ансамбль ГKM CMIP5 у представленні опадів у антарктичному регіоні, особливо для Антарктичного півострова. Зменшення масштабу за допомогою РКМ забезпечило більш детальне та загалом покращене представлення фізичних процесів в атмосфері, особливо у дуже неоднорідному регіоні Антарктичного півострова з горами та фіордами. Незважаючи на деякі недоліки, регіональні та глобальні кліматичні моделі

наразі є єдиною можливістю спрогнозувати майбутні зміни клімату (Krakovska et al., 2017; IPCC, 2013; Krakovska et al., 2010). Перші глобальні моделі циркуляції (ГКМ) і регіональні кліматичні моделі (РКМ) вже передбачили, що середня приземна температура повітря підвищуватиметься найшвидше у високих широтах. Останні дані спостережень підтвердили ці перші прогнози, що також дозволяє з достатньою впевненістю використовувати ці моделі у подальших дослідженнях. Крім того, нові найсучасніші продукти реаналізу ECMWF ERA5 продемонстрували значні покращення в арктичному та антарктичному регіонах, зокрема, для явищ затоку вологи з тропічних широт (Gorodetskaya et al., 2020a; Wille et al., 2021).

Скоріш за все, похибки, пов'язані з кількістю та фазою опадів, викликані особливостями представлення мікрофізичних процесів хмаро- та опадоутворення, особливо зміни фазового стану хмар у глобальних та регіональних кліматичних моделях, що зазвичай спираються на спрощені мікрофізичні рівняння. Наприклад, в найпростіших параметризаціях прийнято припускати, що фаза опадів визначається тільки температурою повітря, тобто за температури вище  $0^{\circ}\text{C}$  іде дощ, нижче – сніг. Однак, температура замерзання води залежить від наявності та характеристик аерозолів і краплі майже дистильованої води можуть існувати за температур до  $-40^{\circ}\text{C}$ ; льодяні кристали можуть існувати у теплому шарі в залежності від швидкості їх падіння та танення (Yuter et al., 2006). Розрахунок фізичних процесів у моделі повинен завжди підтримувати баланс між якістю результату та необхідними обчислювальними та економічними витратами. Більш точне представлення будь-якого процесу потребує більшої кількості цих витрат, але врешті-решт результат такого моделювання може суттєво не відрізнятися від спрощених розрахунків. Крім того, похибки, які існують у моделях на всіх просторово-часових масштабах, пов'язані з обмеженнями параметризацій фізичних процесів (Covey et al., 2003; Giorgi et al., 2015; Taylor et al., 2011).

Крім фізичних параметризацій на якість результатів моделювання також значною мірою впливають просторова роздільна здатність, тобто, точність топографічної моделі, що використовується. Було показано, що згладжена і занижена висота рельєфу у РКМ може зменшити змодельовану кількість опадів у порівнянні з реальними значеннями. Це питання досліджувалося в багатьох роботах для різних частин світу (Cannon et al., 2017).

У дисертаційному дослідженні для аналізу процесів у атмосфері на макро, мезо і мікро масштабі було обрано модель Polar WRF, оскільки вона широко використовується як для прогнозування погоди в Антарктиді (Antarctic Mesoscale Prediction System <https://www2.mmm.ucar.edu/rt/amps/>), так і для прогнозування гідрологічних та метеорологічних явищ в Українському гідрометеорологічному інституті (<https://accuweather.org.ua/dnister/ua/index.php>; <https://www.nas.gov.ua/EN/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=9384>) та Українському гідрометеорологічному центрі. Ця модель була перевірена на чутливість до зростання деталізації параметризацій та моделі топографії, що використовується. Було показано (Хуе et al., 2022), що нові версії Polar WRF покоління 4.X краще представляють атмосферні параметри у порівнянні з попередніми версіями моделі та узгоджуються з даним вимірів. У той же час показано, що отримані результати моделювання зі збільшеною до 1км - 500м просторовою роздільною здатністю краще узгоджуються з даними вимірів інтенсивності опадів (Bonekamp et al. 2018).

Результати аналізу сучасних досліджень характеристик хмар та опадів у полярних регіонах, що представлені у першому розділі, опубліковано у працях автора Chyhareva et. al. (2019a, 2019b, 2021, 2022).

### Підсумки першого розділу

За результатами аналізу попередніх досліджень кліматичних особливостей полярних регіонів, характеристик мезо та мікромасштабних атмосферних процесів в

полярних регіонах та в Антарктиді зокрема було визначено наступні наукові задачі, що потребують вирішення:

1. Визначити оптимальні методологічні підходи до аналізу атмосферних процесів хмаро- та опадоутворення мікро, мезо та кліматичних масштабів.
2. Дослідити мезомасштабні процеси в атмосфері, що впливають на формування інтенсивних опадів зі зміною фази в регіоні Антарктичного півострова у різні сезони року, із визначенням мікрофізичних характеристик хмар та опадів за допомогою сучасних числових моделей
3. Визначити характерні прояви зміни властивостей хмар та опадів у регіоні Антарктичного півострова до кінця ХХІ століття, які по'язані зі зміною клімату, а саме з процесами, що визначаються переходом температури через точку замерзання води.

Для вирішення поставлених задач була розроблена структура дисертаційного дослідження, яка переставлена Додатку А на рисунку А.1

## РОЗДІЛ 2

### ПОЧАТКОВІ ДАНІ ТА МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРНИХ ХМАР ТА ОПАДІВ

Оскільки дисертаційна робота має на меті вивчення характеристик полярних хмар та опадів на різних просторово-часових масштабах, то це вимагає формування відповідних методичних підходів для дослідження, які мають базуватися на використанні різних сучасних інструментів та алгоритмів для вирішення поставлених у роботі завдань. Методи, що використовувалися у дослідженні, схематично представлені на рис. 2.1.

Загальні методи наукових досліджень			Спеціальні методи
Емпіричні	Комплексні	Фундаментальні	
<ul style="list-style-type: none"> <li>збір первинних даних під час участі у сезонному заході 26 та 27 Українських Антарктичних Експедицій;</li> <li>проведення радіозондування;</li> <li>оцінка вимірів автоматичних метеорологічних станцій;</li> <li>порівняння результатів моделювання різних конфігурацій моделі PolarWRF;</li> <li>порівняння результатів моделювання для різних ділянок Антарктичного півострова</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Абстрагування: досліджується регіон Антарктичного півострова, циркуляційні процеси розглядаються в межах виділеної ділянки, мікрофізичні процеси досліджуються на основі результатів моделювання що мають 1км просторове розділення;</li> <li>Аналіз різних типів вхідних даних та їх синтез під час дослідження</li> <li>Чисельне моделювання (налаштування конфігурації чисельної моделі PolarWRF);</li> </ul>	<p>Дедукція у покровокому аналізі кліматичних характеристик, мезомасштабних процесів та мікрофізичних особливостей хмаро- та опадоутворення для окремих випадків інтенсивних опадів в регіоні, та індукція з узагальненням отриманих результатів</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Кліматичний аналіз за даними реаналізу ERA5 та проєкції зміни клімату ANT-CORDEX CMIP5;</li> <li>Синоптичний аналіз за даними реаналізу ERA5 та Polar WRF;</li> <li>Метод математичної статистики у середовищі Climate Data Operators: визначення багаторічних усереднених значень ансамблю кліматичних моделей, їх зміни та значення 95 процентилю;</li> <li>Аналіз просторово-часових розподілів обраних характеристик та візуалізація результатів з використанням геоінформаційних систем та мови програмування Python</li> </ul>

Рисунок 2.1 Методи наукового дослідження, що використовувалися у дисертаційній роботі

#### 2.1 Методичні підходи до аналізу процесів хмаро- та опадоутворення регіонального та мікрофізичного масштабу

Оскільки вивчення процесів хмаро- та опадоутворення синоптичного, регіонального і мікрофізичного масштабів потребує інструментів з високою просторово-часовою роздільною здатністю і рівнем достовірності, то в якості початкових даних та інструменту дослідження було обрано дані реаналізу та числову модель Polar WRF



(Weather, Research and Forecast). З метою визначення переваг та недоліків конфігурацій моделі Polar WRF було виконано порівняльний аналіз результатів моделювання з використанням двох мікрофізичних схем параметризації процесів хмароутворення, які рекомендовані для симуляцій з високою просторово-часовою роздільною здатністю.

У третьому розділі представлені результати дослідження умов формування хмар та опадів в регіоні Антарктичного півострова на основі результатів моделювання. Нижче описані всі вхідні та початкові дані, що використовувалися для налаштування, запуску та верифікації числової моделі.

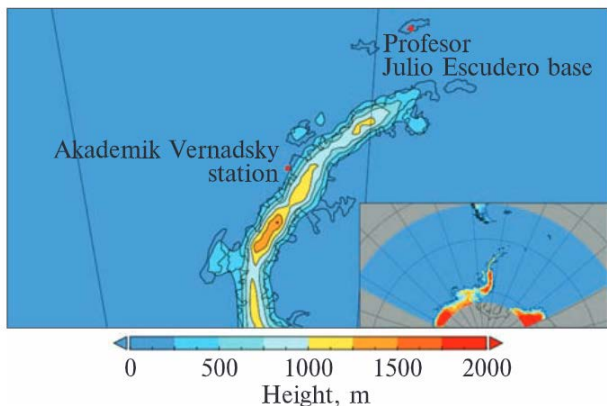
### **2.1.1. Наземні спостереження**

Для дослідження властивостей хмар та опадів та верифікації результатів моделювання у роботі використовувались наземні метеорологічні спостереження, що складаються із звітів SYNOP, дані радіозондування, проведені під час YOPP-SH SOP влітку 2018/2019 років на станції «Професор Хуліо Ескудеро» та взимку 2022 року над регіоном Антарктичного півострова, зокрема на станції «Академік Вернадський», та спостережень, отриманих під час участі у сезонних українських експедиціях у 2021 та 2022 роках. Метеорологічні змінні порівнювалися з даними реаналізу ERA-5 (Hersbach et al., 2020) і результатами симуляцій числової моделі Polar WRF (версія 4.1.5 та 4.3).

У представлений дисертаційній роботі дослідження фокусується на декількох локаціях, що представляють різні регіони та мікроклімат навколо Антарктичного півострова. Переважна кількість результатів отримана для станції «Академік Вернадський», що розташована на острові Галіндез із західної, переважно навітряної сторони Антарктичних гір, ближче до центральної частини півострова ( $65,25^{\circ}$  пд. ш.,  $64,26^{\circ}$  зх. д.). Також було проаналізовано дані, отримані для одного з випадків інтенсивних опадів, для чилійської станції «Професор Хуліо Ескудеро», що розташована на острові Кінг-Джордж на північному краю Антарктичного півострова

(62,20° пд. ш., 58,96° зх. д.). Розташування станцій представлено на рис. 2.2. Хоча клімат обох станцій морський, на станції «Академік Вернадського» більш відчутний орографічний ефект посилення опадів і надходження холодного повітря з континенту (Pishniak & Beznoshchenko, 2020). Район Антарктичного півострова з назвами географічних об'єктів, включно з тими, які використовуються у дослідженні, наведено у Додатку А на рис.А.2.

a)



b)

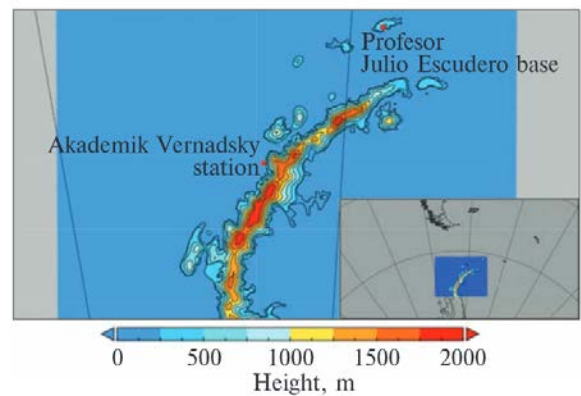


Рисунок 2.2 Розташування науково-дослідних станцій та карта рельєфу досліджуваного регіону: (а) вхідні дані ERA5 і найбільший домен -50 пд.ш., -140 зх.д., -78 пд.ш., 1 сх.д.; (б) модель рельєфу ASTER для Polar WRF ver.4.1.5

Дані метеорологічних спостережень на станції «Академік Вернадський», які використовуються в цьому дослідженні (приземна температура, кількість та фаза опадів), отримані з 3-годинних звітів SYNOP (формат Всесвітньої метеорологічної організації FM12-VII для наземних станцій), автоматичних метеорологічних станцій Vaisala AWS-100 та Lufft-310. Також для порівняння сумарної кількості опадів використовувалися данні опадоміра Третьякова за кожні 24 години.

Метеорологічні дані для станцій «Професор Хуліо Ескудеро» отримані з 3-годинних звітів SYNOP/METAR. Звіти містять приземну температуру й тиск, а також кількість і тип опадів на момент спостереження (<https://climatologia.meteo-chile.gob.cl>; Carrasco & Cordero, 2020). Звіти SYNOP на станціях «Професор Хуліо Ескудеро» та

«Академік Вернадський» включають такі типи опадів: мряка, дощ, злива, сніг, снігопад, суміш дощу та снігу, а також інтенсивність опадів.

Інтенсивність снігопаду на станції «Професор Хуліо Ескудеро» визначається на основі вимірювань глибини снігу кожні 6 годин за допомогою снігомірної рейки (з перерахунком 1 см снігу на 1 мм водного еквіваленту), припускаючи практичну відсутність опадів при глибині снігу  $<0,5$  см і до 1 мм, коли глибина снігу приблизно 0,6—0,9 см (Carrasco & Cordero, 2020). Дані про снігопади використовувалися в цьому дослідженні без будь-яких поправок (напр. на перенесення снігу через приземну хуртовину). Крім того, ці значення доступні лише для випадків снігопаду, без виділення опадів змішаної чи рідкої фази. Для рідких опадів доступна лише інформація про їх наявність, оскільки вимірювання інтенсивності та суми опадів відсутні. Крім того, спостереження за опадами та запуски радіозондів проводилися на станції «Професор Хуліо Ескудеро» протягом періоду YOPP-SH SOP та у рамках проєкту «Characterization of the Antarctic Atmosphere and Low Clouds» (Rowe et al., 2018; Gorodetskaya et al., 2020; Bromwich et al., 2020).

Поєднання даних регулярних та спеціальних спостережень на станції «Академік Вернадський» та на станції «Професор Хуліо Ескудеро» надало унікальну можливість більш детально дослідити випадки інтенсивних опадів в районі Антарктичного півострова та оцінити точність результатів моделювання обраної конфігурації числової моделі Polar WRF.

### **2.1.2 База даних ERA5**

Дані метеорологічних вимірювань використовувалися для оцінки даних реаналізу ERA5 (Hersbach та ін., 2020), які потім використовувалися для аналізу синоптичної ситуації та кількості та типу опадів. У дослідженні використовувались дані реаналізу ERA5 з роздільною здатністю  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  для температури повітря на висоті 2 метри, атмосферного тиску на рівні моря, загальної кількості опадів і типу опадів. База даних ERA5 надає інформацію про тип опадів, зокрема виділяються

наступні види опадів: дощ, льодяний дощ, сніг, мокрий сніг, змішаний дощ і сніг, а також крижана крупа. Ці дані порівнювалися з даними вимірів та метеорологічних спостережень на обох станціях, із застереженням, що застосування даних SYNOP для перевірки ERA5 має деякі обмеження через 3-годинну роздільну здатність даних спостережень.

База даних ERA5 надає початкові та граничні умови з погодинними інтервалами, включаючи приземні поля температури повітря, температури точки роси, маски суша-море, середнього атмосферного тиску на рівні моря, покриву морського льоду, температури поверхні моря, глибини снігу, температури ґрунту, а також вертикальні розподіли компонент вітру, температури повітря, геопотенціалу, питомої та відносної вологості повітря на рівнях атмосферного тиску.

### **2.1.3 Числова модель Polar WRF**

Polar WRF – це версія числової моделі WRF (Weather Research and Forecasting Model), що оптимізована для полярних регіонів (Skamarock et al 2019, Tewari et al 2004), включаючи модифіковану модель поверхні суші (land-surface model), яка дозволяє, наприклад, використовувати змінну товщину морського льоду та глибину снігу над морським льодом (Hines & Bromwich, 2008; Bromwich. та ін., 2009; Hines та ін., 2011).

Регіональна модель атмосфери Polar WRF застосовувалась для визначення зв'язків системи “макромасштабні атмосферні процеси – мезомасштабні атмосферні утворення – мікрофізичні процеси у хмарах та опадах”.

Polar WRF – це модифікація регіональної моделі прогнозу погоди WRF. Для підготовки основних моделювань було попередньо визначено оптимальну конфігурацію моделі Polar WRF та зроблено декілька тестових запусків.

Моделювання Polar WRF версії 4.1.5 (без вкладених доменів) було виконано в області  $130 \times 100$  вузлів сітки з просторовою роздільною здатністю 9 км з центром у  $63^\circ$  пд.ш.  $65^\circ$  з.д. (рис. 2.2). Моделювання Polar WRF версії 4.5 було виконано для

базового домену з просторовою роздільною здатністю 9 км і двох вкладених доменів 3 км і 1 км (рис.2.3). Для подальшої оцінки мікрофізики хмар і опадів було визначено схему, яка краще представляє регіональні особливості полярних хмар на основі результатів чотирьох моделювань Polar WRF із двохмоментною мікрофізичною схемою Моррісона (№10) і мікрофізичною схемою без аерозолів Thompson et al (№8). Використовувалася наступна конфігурація моделі (рис. 2.3):

- Три вкладених домени із шагом сітки відповідно 9 км - 3 км - 1 км;
- Розмір сітки становив для першого домену 256x294 вузлів, для другого 498x501 і для третього 189x240;
- Розмір доменів: перший 2304x2646 км, другий 1488x1503 км; третій 189x240;
- «one way nesting»: граничні умови зовнішнього домену використовуються як вхідні дані для внутрішнього домену;
- 38 вертикальних ета рівнів;
- картографічна проєкція Ламберта.

Інформація щодо відображення рельєфу, покриття регіону морським льодом та загального налаштування моделі подана у додатку А в табл. А.1.

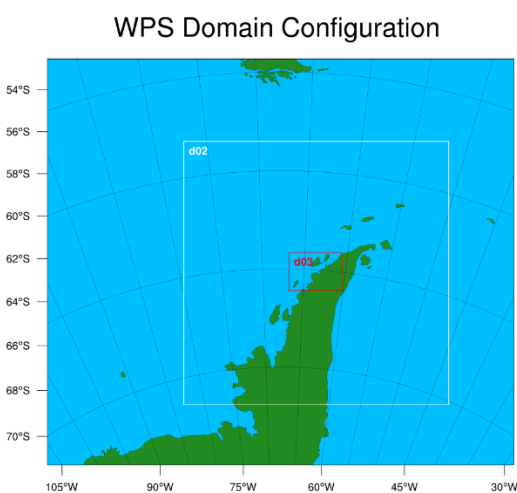


Рисунок 2.3 Розташування трьох доменів моделі Polar WRF

Домен було налаштовано в конформній картографічній проєкції Ламберта зі стандартною довготою 64,0 W і справжніми широтами 65,0 S і 60,0 S. Вертикальна роздільна здатність становить 38 шарів з типом вертикальних координат Eta. Для рельєфу моделі використовувався набір топографічних даних ASTER GDEM v.3 із просторовою роздільною здатністю 1 кутова секунда приблизно по горизонталі на екваторі (Abrams et al., 2020; NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems and U.S./Japan ASTER Science Team, 2019).

Таблиця 2.1.

Налаштування фізичних параметризацій у конфігурації моделі Polar WRF, що використовувалась у дослідженні

Назва параметризації	Назва типу моделі	Параметр-Назва		
		Домен #1	Домен #3	Домен #3
Мікрофізична	mp_physics	8 – Схема Томсона 10 –схема Моррісона		
Конвективні процеси	cu_physics	3 - RH-dependent Additional Perturbation to option 1 for the Kain-Fritsch Scheme	2 - Moisture-advection-based Trigger for Kain-Fritsch Cumulus Scheme	
Довгохвильова радіація	ra_lw_physics	1 – RRTM Longwave Scheme		
Короткохвильова радіація	ra_sw_physics	1 – Dudhia Shortwave Scheme		
Планетарний граничний шар	bl_pbl_physics	2 – Mellor–Yamada–Janjic Scheme (MYJ)		
Приповерхневий шар	sf_sfclay_physics	2 – Eta Similarity Scheme		
Земна поверхня	sf_surface_physics	2 – Unified Noah Land Surface Model		

Схема параметризації мікрофізичних процесів у хмарах Томсона (Thompson et al., 2008) була обрана для моделювання Polar WRF через покращене представлення хмар в Антарктиці (Listowski & Lachlan-Cope, 2017; Hines et al., 2019). Параметризація Томсона є одномоментною схемою з двохмоментними змінними хмарного льоду (Thompson et al., 2008). У цій параметризації передбачається, що розподіл снігу за розміром залежить від температури повітря та вмісту загальної маси льоду в стовпі

атмосфери, а форма частинок снігу є несферичною зі зміною об'ємної щільності обернено-пропорційно діаметру. Інші фізичні параметри, які були використані в моделюванні Polar WRF, перераховані в таблиці 2.1.

Вихідні дані Polar WRF, що використані в цьому дослідженні, включають загальну кількість опадів, тип опадів, вертикальний розподіл часточок снігу, льоду, дощу, хмарних водяних крапель, вертикальні та горизонтальні швидкості вітру, температуру повітря. Результати моделювання із просторовою роздільною здатністю 9 км та 3 км виводилися кожні 30 хвилин, а з 1 км – кожні 10 хвилин. Для порівняння з даними ERA5 та даними спостережень усі дані та результати було приведено до однакової часової дискретності.

#### **2.1.4 Вибір мікрофізичної параметризації моделі Polar WRF для регіону Антарктичного півострова та її апробація для території України**

Перевага використання регіонального моделювання полягає у можливості налаштування специфічних параметрів числової моделі для кращого відображення регіональних особливостей фізичних процесів на території, що вивчається. Оскільки для вивчення об'єкту дослідження – хмар та опадів в регіоні Антарктичного півострова, важливо визначити оптимальну мікрофізичну параметризацію, було проведено порівняння двох мікрофізичних схем, що рекомендовані для використання під час моделювання з високою роздільною здатністю, а саме мікрофізичні схеми Томсона та Моррісона. Також було змінено значення вхідного параметру концентрації крапельок (droplet concentration).

Враховуючи, що використовувалися досить складні двохмоментні параметризації мікрофізики хмар та опадів, які потребують значного об'єму розрахунків прогностичних змінних, розрахункова швидкість становила приблизно 1 до 3 для трьох областей моделювання, тобто одна година прогнозу розраховувалася приблизно три години реального часу. Відповідно, розрахунок для випадків впродовж чотирьох діб виконувався приблизно дванадцять діб. Згодом завдяки стажуванню і

доступу до суперкомп'ютера у National Center for Atmospheric Research стало можливим провести додаткові моделювання для визначення чутливості результатів до використання двох мікрофізичних схем параметризацій і різних початкових налаштувань. У цілому кінцевою метою числових експериментів було визначення конфігурації моделі, що найкраще відображає інтенсивні опади із можливою наявністю змішаної фази. Отже було порівняно результати моделювання, в яких використовувались дві різні схеми параметризацій, які представлені у табл.2.2, з різними початковими значеннями параметру концентрації крапельок: 50 та 100  $\text{cm}^{-3}$ .

Для визначення конфігурації моделі, яка краще представляє фазу опадів, було обрано випадок з інтенсивними опадами та наявністю змішаної фази у перехідний сезон, а саме впродовж 1-2 квітня 2021 року. Моделювання було виконано для періоду з 31го березня 00:00 годин до 3 квітня 00:00 2021 року, коли також проводилися додаткові візуальні та інструментальні виміри (персональна участь у сезонному загоні 26 УАЕ).

Таблиця 2.2.

Перелік змінних двохмоментних параметризацій мікрофізики Polar WRF

№ у WRF	Назва параметризацій	Співвідношення сумішей	Кількість часточок
8	Thompson (Томсона)	Qc Qr Qi Qs Qg	Ni Nr
10	Morrison (Моррісона)	Qc Qr Qi Qs Qg	Nr Ni Ns Ng

Результати моделювання представлені на рисунках 2.4-2.7. На рисунку 2.4 представлено сумарну кількість рідких опадів за період від 31 березня 12:00 до 2 квітня 00:00 годин для домену з кроком сітки 3 км.

При використанні мікрофізичної параметризації Моррісона результати моделювання рідких опадів більш чутливі до значення параметру концентрації крапельок, в той час як при використанні параметризації Томсона зміни не є



суттєвими. Порівнюючи параметризації з однаковою початковою концентрацією крапель можна зауважити, що сумарна кількість рідких опадів вища в обох випадках для результатів за схемою Томсона.

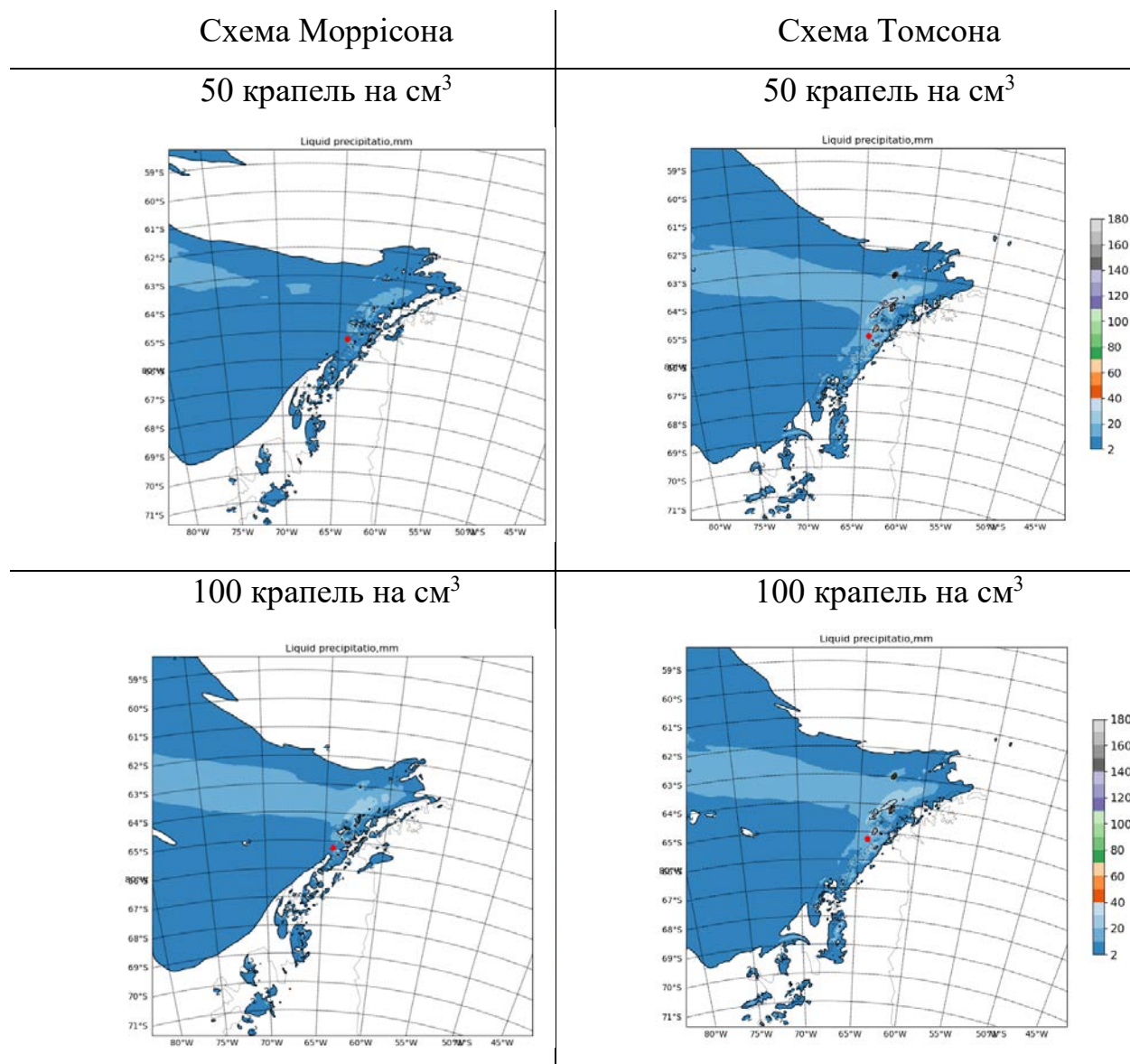


Рисунок 2.4 Сумарна кількість рідких опадів за період 31.03-2.04 за схемою Моррісона (а, с) та Томсона (b, d) з вхідним значенням концентрації крапель  $50/\text{см}^3$  (а, b) та  $100/\text{см}^3$  (с, d). Червоною точкою позначено станція «Академік Вернадський»

На рис. 2.5 представлена сумарна кількість твердих опадів за період від 31го березня 12:00 по 2ге квітня 00:00 годин для домену з кроком сітки 3 км. Можна відзначити, що результати моделювання для твердих опадів не сильно відрізняються за двома параметризаціями та значеннями концентрації крапельок.

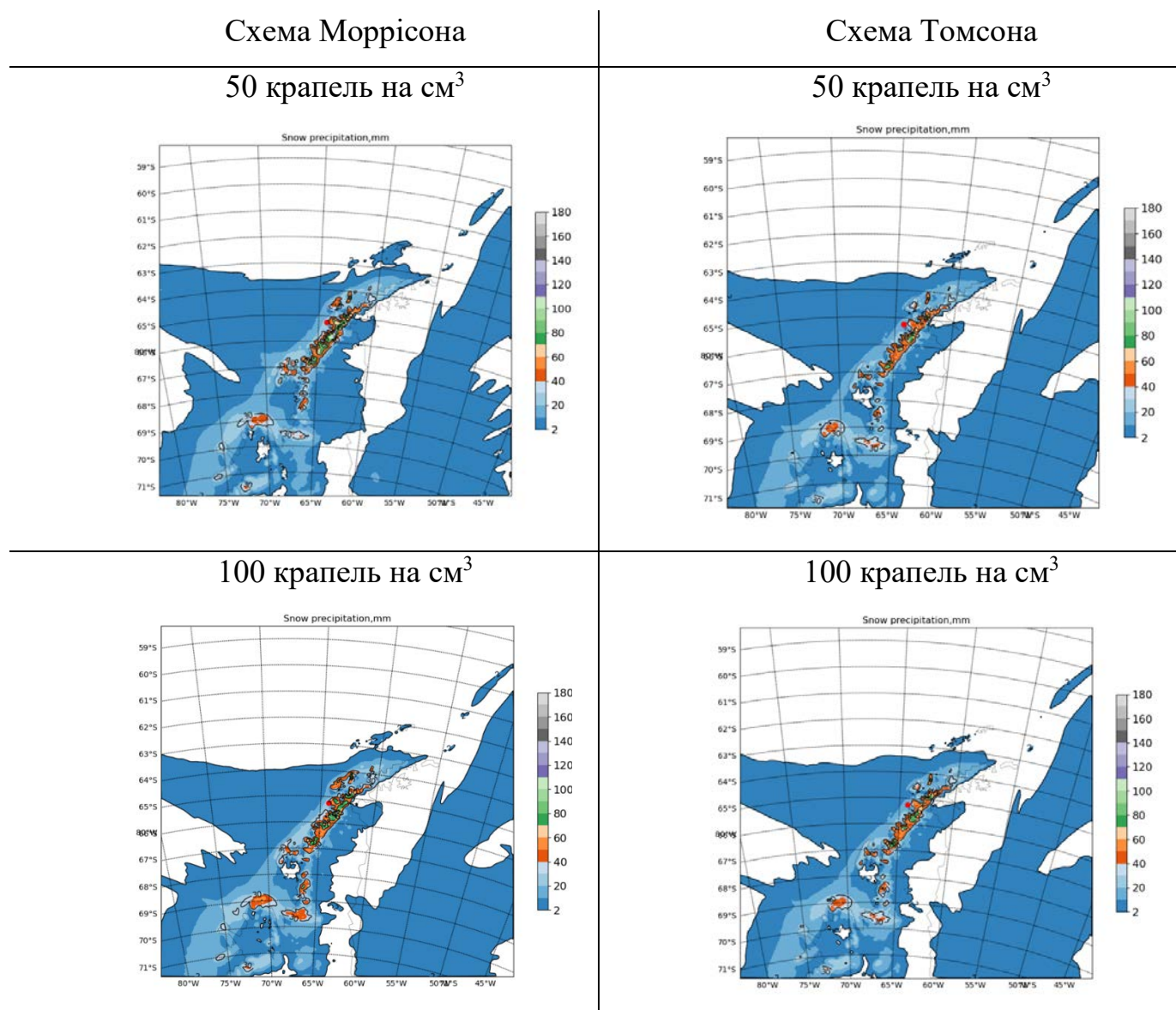


Рисунок 2.5 Сумарна кількість твердих опадів за період 31.03-2.03 за схемою Моррісона (а, с) та Томсона (b, d) з вхідним значенням концентрації крапельок  $50/\text{cm}^3$  (a, b) та  $100/\text{cm}^3$  (c, d)

Хоча моделювання з параметризацією Моррісона, як і для рідких опадів, є дещо більш чутливими до зміни значення концентрації крапельок, ніж моделювання з параметризацією Томсона.

Для визначення яка конфігурація моделі краще відображає фазу опадів та момент її зміни було порівняно результати моделювання з даними спостереження, а саме інтенсивність та фазу опадів в районі станції «Академік Вернадський». На рис. 2.6 представлено інтенсивність дощу та снігу у мм/10 хв відповідно до максимальної часової роздільної здатності, що доступна за результатами моделювання домена з кроком сітки 1 км.

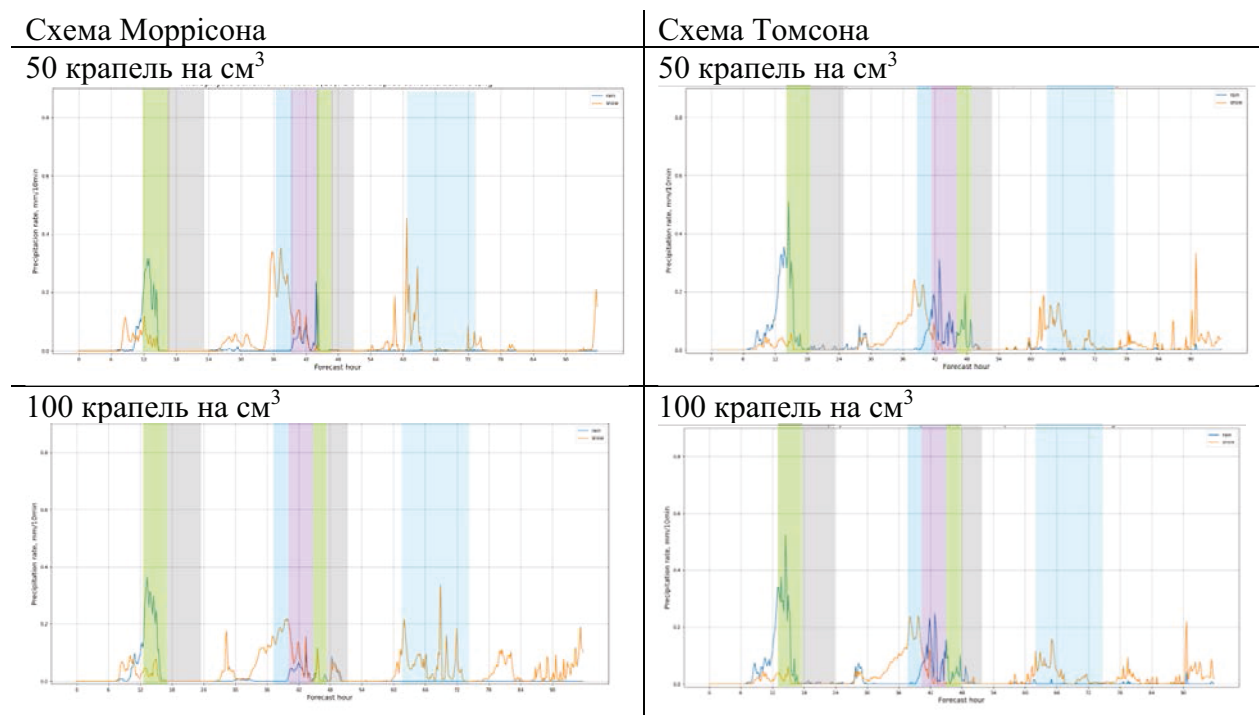


Рисунок 2.6 Інтенсивність (мм/10 хв) твердих опадів (помаранчева лінія) та рідких опадів (блакитна лінія) та фаза опадів за даними спостереження (заштриховані прямокутники: зелений – дощ, блакитний – сніг, сірий – мряка, рожевий - змішані опади)

За результатами моделювання з параметризацією Моррісона отримано більше твердих опадів для станції «Академік Вернадський». Частка рідких опадів на рис. 2.6 *a* та *c* впродовж усього досліджуваного періоду незначна. У той же час за параметризацією Томсона результати моделювання показують більшу інтенсивність та частоту дощу, що співпадає з даними спостережень. На рис. 2.6 *b* та *d* різкий перехід від снігу до дощу (позначено рожевим кольором) отримано в середині періоду моделювання між 40 та 42 годинами, що відповідає наявності змішаних опадів за даними візуальних спостережень. Таке відображення фази опадів було ключовим для вибору конфігурації моделі.

Зауважимо, що задача вибору оптимальної конфігурації моделі залежить від поставленої мети. Але з точки зору наявності, інтенсивності та фази опадів однозначно визначити оптимальну конфігурацію моделі неможливо на даний момент, зокрема і через те, що прилади виміру інтенсивності та фази опадів не завжди узгоджуються між собою. На рис. 2.7 представлено інтенсивність опадів за двома автоматичними метеорологічними станціями Lufft WS-100 (a) та Vaisala AWS-310 (b), що відображають суттєво різні значення інтенсивності. Значення інтенсивності наведені у одиницях мм/10хв для зручного порівняння з найбільш високою часовою роздільною здатністю результатів моделювання.

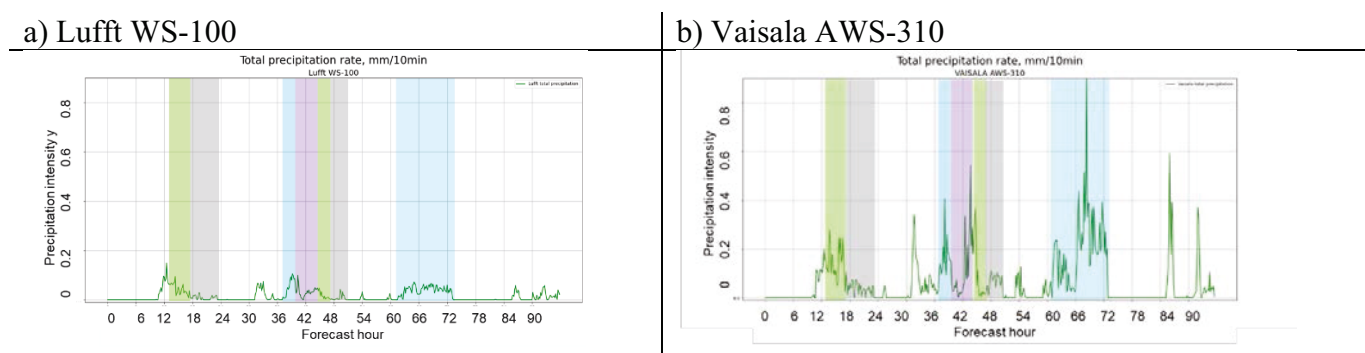


Рисунок 2.7. Інтенсивність опадів (мм/10хв) за даними автоматичних метеорологічних станцій Lufft WS-100 (a) та Vaisala AWS-310 (b)

У подальшому дані вимірів Vaisala AWS-310 використовуватимуться для порівняння з даними моделювання, оскільки отримана фаза опадів узгоджується з даними спостереження, а сума опадів, розрахована за значеннями інтенсивності, узгоджується з вимірами опадоміра Третьякова і снігомірної рейки.

Отже, за результатами проведеного аналізу можна стверджувати, що для обраного випадку інтенсивних опадів конфігурація моделі з мікрофізичною параметризацією Моррісона є більш чутливою до зміни концентрації крапель, показує меншу сумарну кількість рідких опадів та вищу сумарну кількість снігу в горах, не передає моменти переходу фази опадів через порівняно високу змодельовану кількість твердих опадів. У свою чергу, результати моделювання з використанням параметризації Томсона менш чутливі до зміни числа концентрації крапель, показують вищу сумарну кількість опадів в районі Антарктичного півострова та порівняно меншу сумарну кількість опадів у горах. Дані моделювання з використанням схеми Томсона дещо краще передають фазу опадів та моменти її переходу за рахунок наявності більшої частки дощу.

За результатами оцінки даних моделювання можна зробити припущення, що використання параметризації Томсона краще відображатиме процеси опадо- та хмароутворення для метеорологічних явищ, пов'язаних з проходженням теплих фронтів та затоків вологи з помірних широт Тихого океану, у той час як параметризація Моррісона можливо краще відображатиме метеорологічні явища, пов'язані з зимовими циркуляційними процесами.

На основі порівняльного аналізу результатів моделювання чотирьох конфігурацій моделі Polar WRF між собою та даними спостережень і вимірів, для подальшого дослідження було обрано конфігурацію з мікрофізичною схемою Томсона та початковими значеннями концентрації крапель  $50 \text{ на см}^3$ , оскільки результати моделювання краще узгоджуються з даними спостережень/вимірів у

представлені середньої та максимальної інтенсивності опадів, їх фази та моментів змішаної фази (рис. 2.6, рис. 2.7).

Для апробації обраної методики для території України було виконано моделювання числовою моделлю WRF (версія 4.5) для випадку інтенсивного снігопаду 21-22 березня 2013 року із застосуванням мікрофізичної схеми Томсона зі значеннями концентрації крапельок 50 на см<sup>3</sup> (рис. 2.8). Було виконано моделювання для регіону Європи з кроком сітки 6 км, трьома вкладеними доменами: регіон України – 2 км, Центральна Україна – 0,6 км та Карпати – 0,6 км.

Результати моделювання на прикладі значень накопичених твердих опадів представлені на рис. 2.8, де можна простежити формування смуги інтенсивних опадів з південного заходу на північний схід. За даними SYNOP станом впродовж 21-22го березня випало 59 мм опадів на станції Київ, що загалом узгоджується з даними моделювання, в яких отримано близько 70 мм. Варто відмітити, що для інтенсивних опадів зазвичай спостерігається значна просторова варіативність кількості опадів впродовж однієї метеорологічної події. Тому отримана різниця максимумів сум опадів близько 10 мм є цілком достовірним і задовільним результатом.

Можна простежити різницю у представлені кількості сумарних твердих опадів у результатах моделювання для доменів 6 км, 2 км і 0,6 км. Очікувано, що для 6-ти кілометрового домену сумарна кількість опадів менша, ніж для доменів з вищою просторовою роздільною здатністю. Також моделювання для кроків сітки 0,6 км детально відображає локальні особливості рельєфу та його вплив на розподіл опадів, що видно на відображенні сумарних опадів у карпатському регіоні.

Таким чином, можна стверджувати, що застосування числової моделі WRF з високою просторовою роздільною здатністю із запропонованою конфігурацією дозволить детальніше вивчати процеси розвитку хмар та формування твердих опадів та їх регіональні особливості і для території України.

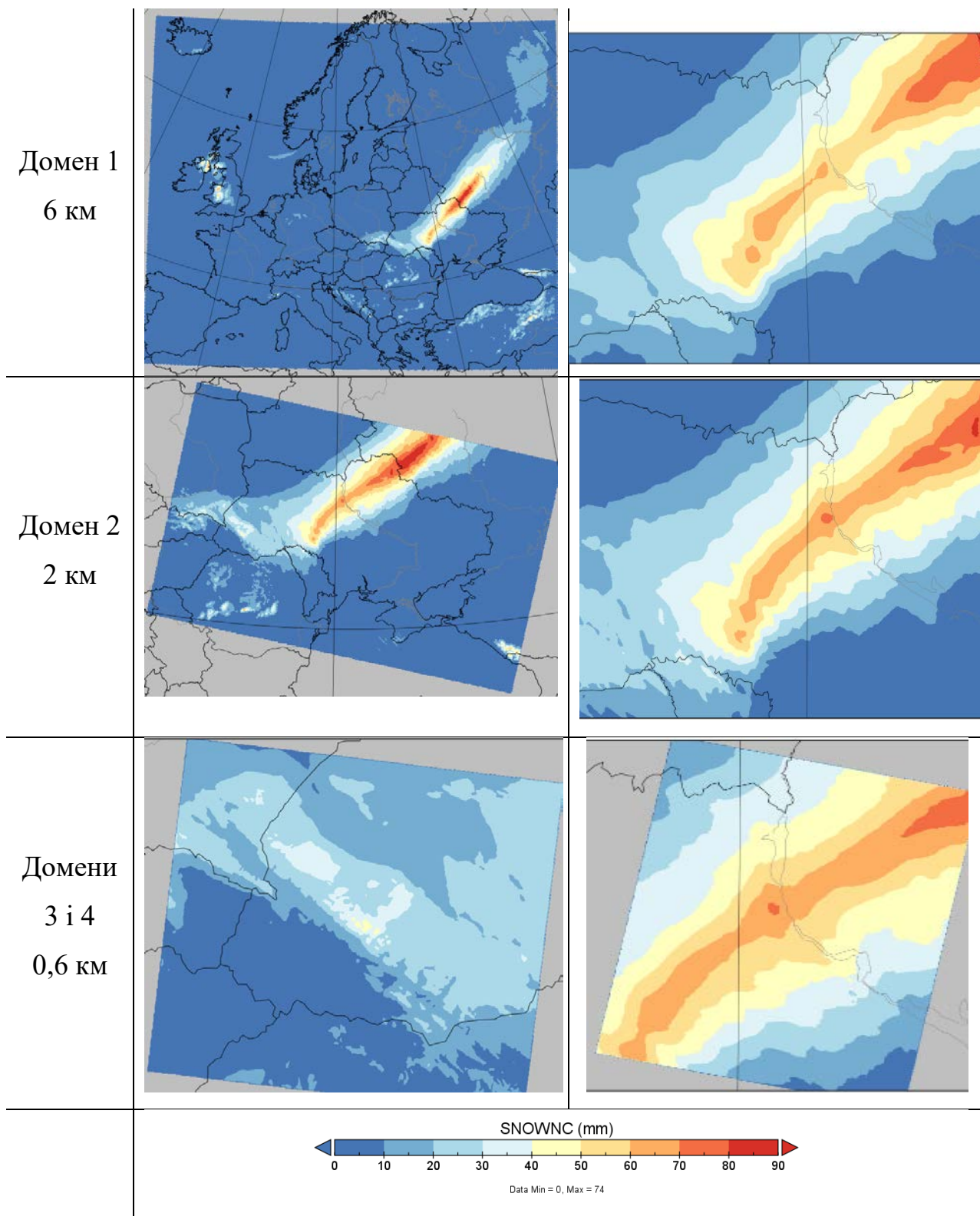


Рисунок 2.8. Сумарна кількість твердих опадів за 48 годин 21-22 березня 2013 року за даними моделювання WRF

### 2.1.5. Візуалізація даних спостережень та моделювань

Для аналізу даних бази ERA5, результатів радіозондування та даних моделювання різного масштабу, їх динаміку у часі та просторі використовувалися різноманітні методи візуалізації, зокрема:

1. Базу даних ERA5 було візуалізовано автоматично за допомогою застосунку NASA Panoply, що створений для даних з прив'язкою до географічних координат у форматах netCDF, HDF, GRIB.
2. Дані радіозондування було візуалізовано у форматі діаграми Skew-T за допомогою мови програмування Python з використанням бібліотеки MetPy (Ryan et al. 2022), що має відкритий код та створена для візуалізації специфічної метеорологічної інформації.
3. Дані моделювання Polar WRF було візуалізовано переважно за допомогою мови програмування Python та спеціальної бібліотеки wrf-python (Ladwig, 2017).

Використовуючи цей інструмент було зображено:

- вертикальні перерізи через гори та вздовж узбережжя Антарктичного півострова для окремих термодинамічних параметрів атмосфери, створено анімації їхнього розвитку з часом;
  - вертикальні перерізи через гори Антарктичного півострова для мікрофізичних параметрів хмар та опадів, створено анімації їхнього розвитку з часом;
  - вертикальний переріз через гори Антарктичного півострова з одночасним зображенням розподілів концентрацій кристалів та крапель;
  - інтерполяція швидкості та напрямку вітру на висоту 500 гПа;
  - вертикальний розподіл масових концентрації кристалів та крапель в точці над станцією «Академік Вернадський» та над бухтою льодовика Ларсен В.
4. Для просторового розподілу кристалів та крапель було виконано 3D візуалізацію у застосунку NCAR Varog, що є відкритим і розробленим для 3D візуалізації даних



моделювання, зокрема моделі WRF (Li et. al., 2019; Visualization & Analysis Systems Technologies, 2023).

## **2.2. Методичні підходи до аналізу кліматичних характеристик хмар та опадів у регіоні**

Для визначення кліматичних особливостей Антарктичного півострова, проведення його районування та визначення найбільш вразливих до зміни клімату районів було застосовано дані регіональних кліматичних моделей (РКМ) та обрано, розраховано і проаналізовано специфічні кліматичні індекси та параметри, що описано нижче.

### **2.2.1 Ансамбль кліматичних моделей та сценарії**

Згідно з оцінкою сучасних методичних підходів до застосування регіональних кліматичних моделей (Doblas-Reyes et al., 2021), значно знизити похибки індивідуальних РКМ можна, якщо застосувати ансамблеве усереднення. При цьому ансамбль має складатися з не менше трьох РКМ. У дослідженні кліматичних характеристик Антарктичного півострова використовувався ансамбль РКМ, застосованих в межах міжнародної ініціативи CORDEX, зокрема проєкту Polar CORDEX (Giorgi et al., 2015; Koenigk et al., 2015).

У дослідженні використовуються симуляції трьох регіональних кліматичних моделей Polar CORDEX: дві версії РКМ RACMO21P та РКМ HIRHAM5. Просторова роздільна здатність моделей  $0,44^\circ$ , що узгоджується з усіма іншими доменами CORDEX (Giorgi et al., 2015; Koenigk et al., 2015). РКМ RACMO21P розроблена Нідерландським Метеорологічним Інститутом (KNMI) та Утрехтським інститутом морських та атмосферних досліджень; розробник HIRHAM5 - Датський метеорологічний інститут (DMI) (Christensen et al., 2007). Граничні та початкові умови для CORDEX були визначені за даними симуляцій ансамблю ГКМ проєкту CMIP5 (Taylor et al., 2011). Для першої версії RACMO21P (van Meijgaard et al., 2008) та для

HIRHAM5 було використано вхідні дані РКМ EC-EARTH (<http://www.ec-earth.org>). Для другої версії RACMO21P вхідні та граничні умови бралися з HadGEM2 (Collins et al., 2008). Потрібно зауважити, що моделі були обрані через те, що тільки вони були у відкритому доступі на момент дослідження для регіону Антарктиди.

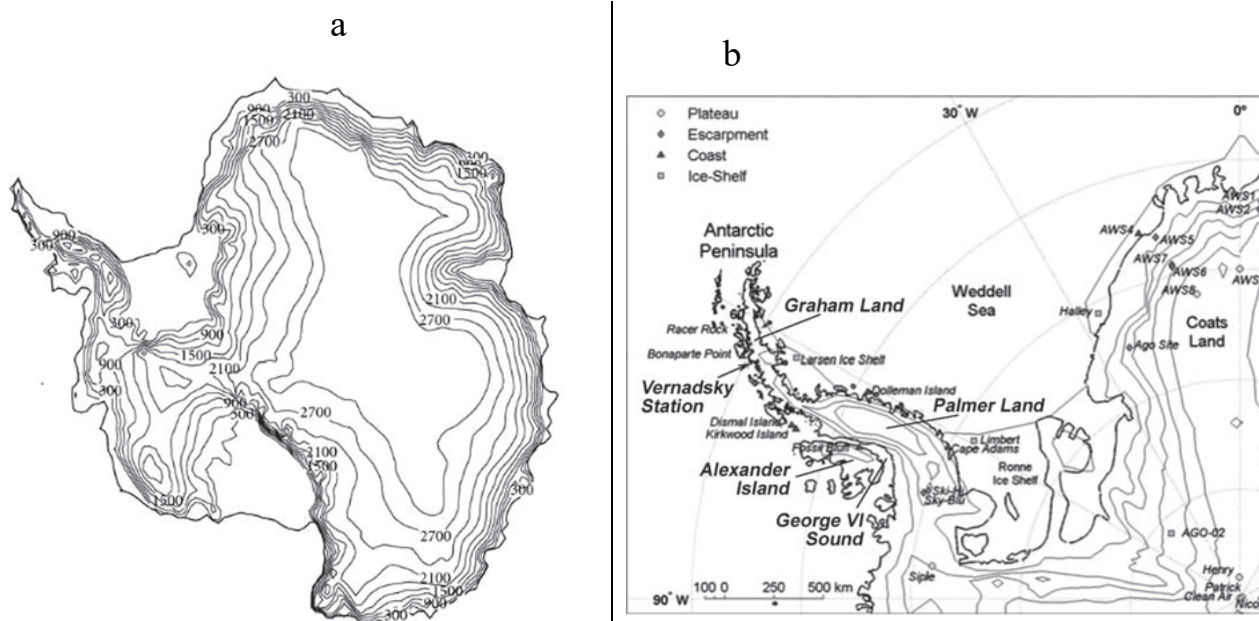


Рисунок 2.9. а - модель топографії Антарктиди у РКМ HIRHAM5 з Рис.1 у Dethloff et al. (2010); б – модель топографії частини Західної Антарктики у РКМ RACMO2 з Рис. 15 Rodrigo et al. (2013)

Моделі рельєфу усього Антарктичного домену та Західної Антарктики, що використовується у РКМ HIRHAM5 та РКМ RACMO2, зображені на рис. 2.9 а та б відповідно.

В міжнародній ініціативі CORDEX у цілому було розраховано кліматичні характеристики за такими сценаріями для наступних періодів:

1. Історичний: ретроспектива за період 1950–2005 (Granier et al., 2011);
2. RCP 4.5 для періоду 2006–2100 (Thomson et al., 2011), як помірний сценарій зміни клімату;

3. RCP 8.5 для періоду 2006–2100 (Riahi et al., 2011), як песимістичний сценарій зміни клімату.

Сценарії репрезентативних концентрацій RCP 4.5 та RCP 8.5 були обрані в Polar CORDEX для відображення помірних та найбільш вірогідних прогнозованих змін. Представлене дослідження фокусується на регіоні Антарктичного півострова, де вузька та висока смуга гір чітко виділяється на візуалізаціях топографічних моделей обох РКМ. Проте можна відзначити, що на рис. 2.9а найвищі ізолінії відповідають висотам 1800 м та 1500 м на рис. 2.9б в районі Землі Палмера, у той час як реальні висоти перевищують 2000 м (гори Джексон, Коман та Хоуп), що свідчить про недостатньо точне відображення рельєфу в обраних РКМ.

### **2.2.2 Програмне забезпечення для обробки даних РКМ**

Використання даних кліматичних моделей зазвичай вимагає багаторазовий доступ до баз даних, інтерполяцію до спільної сітки, гармонізацію у часі та просторі та пост-обробку з візуалізацією результатів. Це трудомістке завдання, задля якого зазвичай використовуються різні підходи, що неминуче супроводжується великою кількістю помилок через відсутність уніфікованого підходу до обробки даних.

У представленому дослідженні ансамбль кліматичних моделей для індексів режиму температури повітря та зволоження був частково оброблений за допомогою програмного забезпечення Climat4R, що розроблено на основі мови програмування R для кліматичних досліджень. Це програмне середовище, де найбільш поширенні завдання можуть бути виконані за допомогою спеціально створених бібліотек. Детальний опис Climat4R наведено в Iturbide et al. (2019). Climate4R забезпечує доступ, пост-обробку та візуалізацію локальних і віддалених (OPeNDAP) джерел даних, надаючи повну інформацію про походження даних за допомогою METACLIP (Semantic METAdata for CLimate Products) (Bedia et al., 2019). Додатково для обробки та візуалізації даних використовувалося програмне середовище CDO (Climate data operators) та мова програмування Python.

### 2.2.3 Кліматичні індекси

Історично, зміни клімату вивчаються за трендами відповідної величини на основі даних вимірів у визначених пунктах спостережень. Такий підхід не дає можливості вивчити та оцінити регіональний просторовий розподіл зміни клімату на відміну від РКМ, що поєднують як дані спостережень з різних джерел вимірів, так і інтерполяцію цих даних у вузли сітки. Для формування співставного універсального підходу до оцінки зміни погодних та кліматичних параметрів та екстремальних явищ, об'єднана група експертів CCI/WCRP-Clivar/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) визначила список індексів (WCRP; Karl et al., 1999; Peterson et al., 2001). За їхньою рекомендацією 27 основних індексів про основні метеорологічні параметри та частоту, амплітуду і тривалість періодів комплексно характеризують погодні та кліматичні, включно з екстремальними, умови.

Для дослідження режиму хмарності та опадів в полярних регіонах враховуючи зміну температурного фону із прогнозованим потеплінням, доцільно зосередити увагу на тих кліматичних індексах, які будуть характеризувати майбутні зміни включно зі зміною фазового складу хмар та опадів. Тому серед індексів, які характеризують температурний режим та режим опадів і зволоження/посушливості у цілому, було обрано для аналізу наступні індекси:

- FD (frost days) – кількість днів за рік, коли добова мінімальна температура  $< 0^{\circ}\text{C}$ .
- ID (ice days) – кількість днів за рік, коли добова максимальна температура  $< 0^{\circ}\text{C}$ .
- PRCPTOT (Precipitation total) – загальна кількість опадів у дні з опадами  $\geq 1$  мм;

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij},$$

де  $RR_{ij}$  – добова кількість опадів за день  $i$  за період  $j$  і загальною кількістю днів  $I$ .

- CWD (Consecutive wet days) – максимальна тривалість періоду (кількість днів поспіль) з добовою кількістю опадів  $\geq 1$  мм. Якщо  $RR_{ij}$  це добова кількість опадів за день  $i$  за період  $j$ , кількість послідовних днів обчислюється для  $RR_{ij} \geq 1$  мм.

- SDII (Simple daily intensity index) – простий індекс інтенсивності опадів:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W},$$

де  $RR_{wj}$  це щоденна кількість опадів у дні  $w$  з опадами  $\geq 1$  мм за період  $j$ ,  $W$  – кількість днів з опадами за період  $j$ .

- CDD (Consecutive dry days) – максимальна тривалість періоду (кількість днів поспіль) з щоденною кількістю опадів менше 1 мм. Якщо  $RR_{ij}$  це щоденна кількість опадів за день  $i$  за період  $j$ , кількість послідовних днів обчислюється для  $RR_{ij} < 1$  мм.

Хоча індекс CDD може бути нерепрезентативним для континентальної Антарктиди через природний сухий клімат, але для регіону Антарктичного півострова, де кількість опадів часто перевищує 1000 мм (van Wessem et al., 2016), він все ще актуальний.

Для доповнення розуміння клімату регіону і його подальшої зміни, у дослідженні також було проаналізовано кліматичні характеристики режиму хмарності, екстремальності та фазового складу опадів. Зокрема було оцінено зміну інтегрального вмісту льоду (Ice Water Path, IWP) та сконденсованої води в атмосфері (Condensed Water Path, CWP). Екстремальність режиму опадів була оцінена через зміну кількості днів з рідкими опадами та з опадами більш інтенсивними за значення 95 перцентилу у базовий період.

IWP та CWP є важливими параметрами для розуміння кліматичних аспектів зміни оптичної товщини, альbedo, поглинальної та випромінювальної здатності хмар (Stephens, 1980; Platt & Harshvardhan, 1988; Platt, 1997; Heymsfield et al., 2003). У представленому дослідженні IWP та CWP визначаються у відповідності з «Конвенцією щодо кліматичних та прогностичних метаданих (Hassel et al., 2017, <http://cfconventions.org>): IWP – це інтеграл вмісту льоду від земної поверхні до верхнього рівня атмосфери на одиницю площі; CWP – це інтеграл сконденсованої води та льоду від земної поверхні до верхнього рівня атмосфери на одиницю площі. Сконденсованою водою вважаються хмарні краплі, діаметром менше 0,2 мм. Для IWP

та CWP було розраховано значення багаторічної середньої річної суми для кожного періоду та за даними кожної моделі та оцінено ансамблеве середнє зміни визначених параметрів.

#### 2.2.4 Методологія аналізу змін значень кліматичних індексів

Проекції річних значень індексів були використані для визначення динаміки змін характеристик клімату. Для кожного індексу на основі даних РКМ було розраховано наступні характеристики: багаторічне середнє та його зміна відносно базового періоду у вузлах сітки, усереднені характеристики для всього Антарктичного півострова та виокремлені характеристики для району станції «Академік Вернадський». Таким чином зміна індексу у вузлах сітки визначалась як різниця:

$$\Delta_i = X_i - \bar{Y}_{historical}, i - \text{рік},$$

де  $X_i$  – середнє за ансамблем РКМ річне значення індексу у періоди [2041–2060, 2081–2100],  $\bar{Y}_{historical}$  – це багаторічне середнє значення індексу за базовий період [1986–2005].

Розрахунок значень індексів для станції «Академік Вернадський» виконувався шляхом інтерполяції в середовищі Climate4R у точку 65,25°пд.ш., 64,26°зх.д.

Для оцінки зміну клімату в районі Антарктичного півострова було виділено район з координатами lon1 = -85, lon2 = -50, lat1 = -75, lat2 = -60.

Кількість рідких опадів та їх просторово-часову зміну було визначено у припущенні, що дощ формується за температур повітря вищих за 0°C. Для цього було визначено дні з додатною середньою добовою температурою повітря у кожний з періодів та створена відповідна маска, що застосовувалася до загальних щоденних опадів. Отримані значення опадів, які за припущенням були рідкими, підсумовувалися для кожного року та осереднювалися у обрані періоди. Такий самий алгоритм застосовувався до значень реаналізу ERA5. Ці результати використовувалися для верифікації вмісту частки дощу у сумарних опадах та

багаторічної сумарної кількості дощу, отриманого за осередненими даними ансамблю РКМ Polar CORDEX для історичного періоду 1986-2005.

На основі добової суми опадів було розраховано відсоток днів з опадами із загальною кількістю опадів вище 95 перцентиля базового періоду для майбутніх періодів та значення 95 перцентиля для всіх обраних періодів. Скрипти для розрахунків були написані з використанням пакету CDO, зокрема алгоритмів, представлених в CDO software description (CDO, <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/embedded/index.html>)

## Підсумки другого розділу

У другому розділі дисертаційного дослідження представлено опис даних та інструменти їхньої обробки, що використовувалися як для оцінки зміни клімату у регіоні, так і для вивчення процесів опадо- і хмароутворення у найбільш вразливих до зміни клімату районах Антарктичного півострова. Версії описаних даних та моделей були найновішими на момент проведення дослідження. Використання представлених методичних підходів забезпечило комплексне вивчення характеристик полярних хмар та опадів в регіоні Антарктичного півострова.

До сучасних інструментів, що використовуються для дослідження процесів хмаро- та опадоутворення і зміни клімату належать глобальні кліматичні моделі, реаналізи, наприклад ERA5, та мезомасштабні числові моделі, наприклад Polar WRF у кліматичній моді чи інші РКМ. Ці інструменти є динамічними та оновлюються з періодичністю приблизно кожні півроку – рік (Polar WRF та РКМ), декілька років (ERA5, глобальні кліматичні моделі) чи рідше (сценарії зміни клімату). Тим не менш отримані у дослідженні результати є актуальними, оскільки використовують версії як баз даних, так і моделей, що вже перевірені на наявність системних похибок.

Оцінка регіональних особливостей зміни кліматичних умов, які визначають режими формування хмар та опадів в районі Антарктичного півострова, що

представлена у дисертаційному дослідженні, спирається на найактуальніші дані РКМ проєкту CORDEX та результати моделювань ГKM проєкту CMIP5. Хоча, станом на середину 2023 року вже є у відкритому доступі результати наступного покоління ГKM проєкту CMIP6, для проєкту CORDEX лише були опубліковані рекомендації щодо регіонального моделювання за результатами ГKM CMIP6 (EURO-CORDEX CMIP6 GCM Selection & Ensemble Design: Best Practices and Recommendations <https://zenodo.org/record/7673400#.ZAWmhezMLP8> ).

Обрано та розраховано кліматичні індекси і параметри, що запропоновані ВМО, для уніфікації досліджень зміни клімату. Використання спеціальних кліматичних індексів забезпечує представлення зміни різних кліматичних характеристик від кількості днів з температурою нижчою за нуль, що асоціюється з наявністю чи відсутністю процесів танення криги; до безперервних періодів з/без суттєвих опадів і асоціюються з накопиченням/абляцією маси льодовиків. Просторовий аналіз обраних індексів забезпечує можливість визначення регіональних особливостей клімату Антарктичного півострова, оскільки представляють не тільки часовий хід базового кліматичного параметру, а й зміну режиму температури, опадів чи хмарності. Такий підхід дозволяє провести районування території на основі схожої прогнозованої динаміки зміни обраних параметрів, що в свою чергу, є основою для визначення найбільш вразливих до зміни клімату областей регіону Антарктичного півострова.

Проведений порівняльний аналіз конфігурацій моделі дає можливість зробити припущення, що обрана конфігурація Polar WRF з мікрофізичною параметризацією Томсона із значенням концентрації крапель 50 на  $\text{cm}^3$  найкраще передає характеристики хмар та опадів в районі північно-західного Антарктичного півострова. Але це припущення ґрунтується на порівняльному аналізі конфігурацій моделі для одного випадку інтенсивних опадів у регіоні. Воно є достатнім для проведення дисертаційної роботи, але вирішення цієї задачі потребує окремого дослідження з проведенням порівняльного аналізу результатів моделювання для статистично



значущої кількості випадків опадів з різним фазовим складом та різними термодинамічними умовами їхнього формування.

Хоча проведення числового моделювання обмежено наявністю розрахункових потужностей як в Українському гідрометеорологічному інституті, так і тими, що були надані автору в рамках стажування у NCAR, обрана конфігурація моделі та вхідних даних (реаналіз ERA5) забезпечують можливість досить детального аналізу процесів хмаро та опадоутворення завдяки високій просторовій та часовій роздільній здатності.

Виконано апробацію запропонованої конфігурації моделі Polar WRF з мікрофізичною параметризацією Томсона із значенням концентрації крапель  $50 \text{ cm}^{-3}$  на моделюванні випадку інтенсивного снігопаду у березні 2013 року для території Європи (домен з просторовою роздільною здатністю 6 км), всієї України (домен з просторовою роздільною здатністю 2 км) та центру і заходу України (домени з просторовою роздільною здатністю 0,6 км). Показано можливість застосування числової моделі WRF з обраною мікрофізичною конфігурацією для вивчення процесів інтенсивних снігопадів для території України.

Основні методичні підходи та початкові дані дослідження, що представлені у другому розділі, з детальним обґрунтуванням їхнього вибору опубліковано у працях за участі автора (Chyhareva et. al. 2019a, 2019b, 2021a, 2022, Osypov et.al. 2021, Krakovska et.al. 2021, 2022, 2023a, 2023b; Pysarenko et. al. 2023) та було представлено, тобто, вони пройшли апробацію на трьох міжнародних конференціях.

### РОЗДІЛ 3

## ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ ПОЛЯРНИХ ХМАР ТА ІНТЕНСИВНИХ ОПАДІВ В РАЙОНІ АНТАРКТИЧНОГО ПІВОСТРОВА

Полярні регіони є «драйверами» атмосферної циркуляції всієї планети і мезомасштабних процесів у помірних широтах зокрема. Тому важливим є розуміння атмосферних процесів у тропосфері регіонів Арктики та Антарктики. Хоча регіони Арктики та Антарктики мають схожі особливості формування циклонічних та антициклонічних систем, чинники, що визначають погодні умови для цих регіонів суттєво відрізняються.

Визначальним для циклогенезу Антарктики є значна протяжність зони розділу морська крига – відкритий океан та наявність орографічного бар'єру із стрімкими перепадами висот майже для всього Антарктичного узбережжя.

Для розуміння процесів, що впливають на погодний режим Антарктичного півострова і процеси хмароутворення, в цьому розділі розглянуто та проаналізовано випадки інтенсивних опадів у літній, зимовий та перехідний періоди. Відібрані випадки супроводжувалися різкими коливаннями температури близько 0°C та переважно зміною фази опадів, що досі є недостатньо вивченим процесом. Ключовим для визначення випадків була наявність додаткових даних спостережень та вимірів на станціях Антарктичного півострова, оскільки недостатня кількість метеорологічних спостережень і вимірів досі залишається проблемою в полярних регіонах, та персональна залученість автора до таких вимірів та спостережень на станції «Академік Вернадський».

Точність визначення у моделюванні інтенсивності, часу початку випадання опадів і відповідно мікрофізичних властивостей хмар у полярних регіонах залишається все ще недосконалою. Можна припустити, що це через брак відповідних необхідних вимірів для параметризації складних процесів у атмосфері та обмеженість

розрахункових ресурсів для моделювання з роздільною здатністю менше 1 км. Тим не менш з кожним роком зростає кількість та якість супутникових даних, автоматичних приладів для вимірів характеристик хмар та опадів і польових експедицій та міжнародних ініціатив з метою покращити можливості моделювання атмосферних процесів у полярних регіонах.

У цьому розділі представлено аналіз мезомасштабних та мікрофізичних характеристик хмар та опадів у районі станції «Академік Вернадський», гір Антарктичного півострова та льодовика Ларсен В за даними моделювання Polar WRF, а саме домену з просторовою роздільною здатністю 1 км та часовим кроком 10 хв. Розташування перерізу наведено на рис. 3.1 .

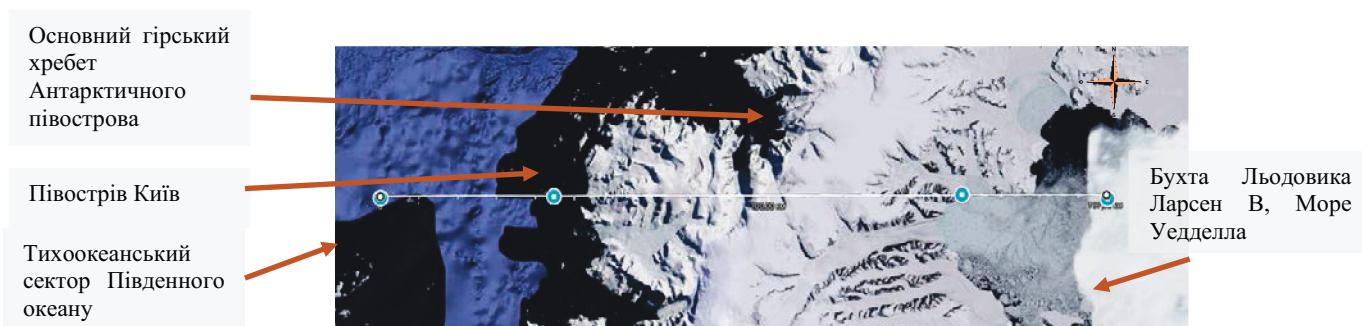


Рисунок 3.1. Розташування перерізу, для якого досліджувалися мікрофізичні характеристики хмар та опадів. Зліва направо точками позначено: початок перерізу, станція «Академік Вернадський», бухта льодовика Ларсен В, кінець перерізу

Оскільки отримані результати складно верифікувати через брак відповідних вимірів у регіоні, а просторовий масштаб отриманих даних значно більший, ніж масштаб мікрофізичних процесів, отримані результати інтерпретуються з метою зрозуміти загальні теоретичні особливості розподілу атмосферних параметрів такі як: вертикальна і горизонтальна протяжність полів хмарності та опадів, наявність і інтенсивність орографічного ефекту, наявність і взаємодія часточок льоду і води між собою на різних вертикальних рівнях та стадіях розвитку мезомасштабних баричних утворень. Мезомасштабні та мікрофізичні характеристики хмар та опадів отримано за

допомогою числової моделі Polar WRF, в якій використовувалася мікрофізична параметризація Томсона. Зокрема, проаналізовано масові концентрації крапель дощу, хмарних крапель, кристалів льоду ( $< 200 \mu\text{m}$ ), кристалів снігу ( $> 200 \mu\text{m}$ ), водяної пари. Для крапель дощу та льодяних кристалів також розраховувалися кількісні концентрації.

### **3.1. Літні хмари і опади**

Було виконано моделювання Polar WRF для періоду з 30 листопада (12 UTC) до 8 грудня (12 UTC) 2018 року для домену з просторовою роздільною здатністю 9 км. Представлений аналіз зосереджений на періоді 1-7 грудня 2018 року, коли було зафіксовано моменти зміни фази і випала значна кількість опадів на станціях «Академік Вернадський» та «Професор Хуліо Ескудеро». Додатково було розглянуто циркуляційні умови формування інтенсивних опадів, що супроводжувалися короточасним зростанням температури до  $+10^{\circ}\text{C}$  над узбережжям Антарктичного півострова.

#### **3.1.1. Синоптична характеристика**

Зазначений період 1-7 грудня був обраний через проходження інтенсивного циклону зі значним затоком тепла з помірних широт у регіон Антарктичного півострова та наявність у цей час додаткових радіозондувань, виконаних у рамках проєкту YOPP-SH (Gorodetskaya та ін., 2020b; Bromwich та ін., 2020). На рис. 3.2 показано просторовий розподіл середнього тиску на рівні моря та погодинної кількості опадів на основі реаналізу ERA5 під час випадків зміни фази опадів та/або дощу на одній або обох станціях. Три різні синоптичні системи низького тиску (позатропічні циклони) пройшли поблизу західної та північної частини Антарктичного півострова протягом першого тижня грудня (рис. 3.2), для кожної з яких було характерно значне зниження приземного атмосферного тиску та підвищення температури повітря на станціях «Академік Вернадський» та «Професор Хуліо Ескудеро» (табл. 3.1, рис. 3.2).

Перші два циклони чинили вплив на погодні умови обох станцій і пройшли поблизу Антарктичного півострова за 24 години впродовж 1–2 грудня 2018 року (рис. 3.2, рис. 3.3).

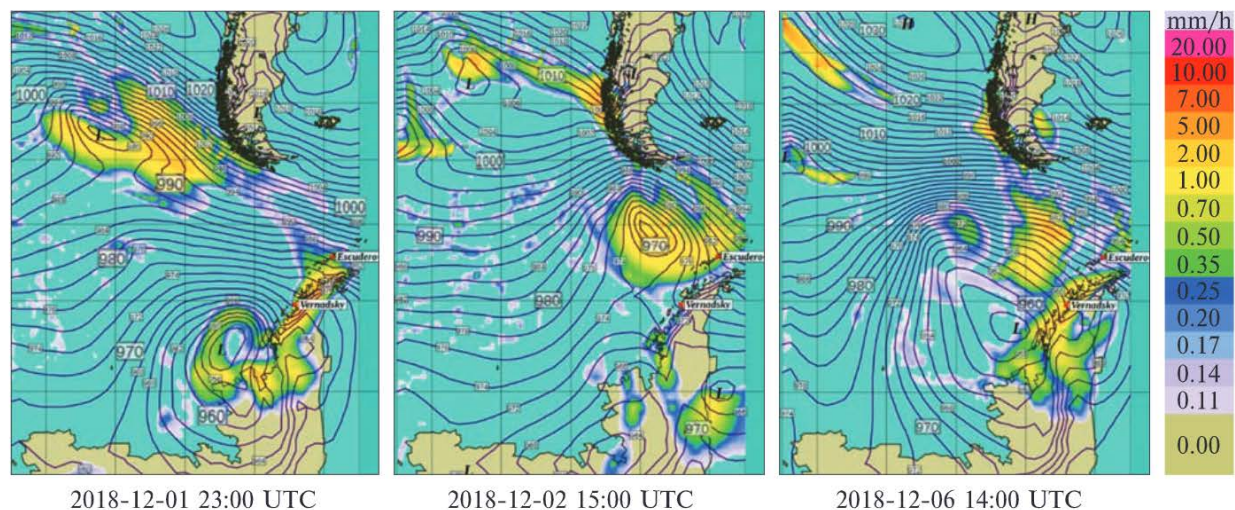


Рисунок 3.2 Інтенсивність опадів (мм/год, у кольорі) та атмосферного тиску повітря на рівні моря за даними реаналізу ERA5 (гПа, контури) у моменти, коли було зафіксований перехід фази опадів на станціях «Академік Вернадський» та «Професор Хуліо Ескудеро» (зображення зроблені у zyGrib <https://www.zygrib.org>)

Таблиця 3.1 показує мінімальний середній атмосферний тиск на рівні моря, пов'язаний із трьома циклонами (жирний шрифт) за даними звітів SYNOP. Для перших двох циклонів мінімуми тиску виникають на 3 години раніше в районі станції «Академік Вернадський», ніж в районі станції «Професор Хуліо Ескудеро». У проміжку між першими двома циклонами тиск трохи підвищився. За даними SYNOP для станції «Академік Вернадський» приземний тиск двічі знижувався приблизно до 970 гПа у зв'язку з проходженням цих циклонів — 1 і 2 грудня (обидва рази о 21 UTC), з тимчасовим підвищенням між ними до 978,6 гПа приблизно о 12 UTC 2 грудня. На станції «Професор Хуліо Ескудеро» приземний тиск знижувався до 981,5 гПа (00 UTC 2 грудня) і 963,6 гПа (00 UTC 3 грудня) під час проходження першого та другого

циклонів відповідно. Обидва мінімуми тиску були зафіксовані на 3 години пізніше, ніж на станції «Академік Вернадський». Короткочасне підвищення тиску (до 986,3 гПа) зафіксовано через 9 годин о 9 UTC 2 грудня. Третій мінімум тиску проходив через обидві станції 7 грудня 2018 року о 3 UTC, досягши 955,3 гПа на станції «Академік Вернадський» і 957,8 гПа на «Професор Хуліо Ескудеро».

Таблиця 3.1

Час настання та мінімуми атмосферного тиску на рівні моря на станціях «Академік Вернадський» та «Професор Хуліо Ескудеро» впродовж проходження циклонів

№ циклону	Дата	Станція «Академік Вернадський»		Станція «Професор Хуліо Ескудеро»	
		Час (UTC)	Тиск, гПа	Час (UTC)	Тиск, гПа
Циклон 1	01-12-2018	21	970.0	24	981.5
	02-12-2018	12	978.6	09	986.3
Циклон 2	02-12-2018	21	970.0	24	963.6
Циклон 3	07-12-2018	03	955.3	03	957.8

Усі три циклони супроводжувалися підвищенням приземної температури повітря на обох станціях, що передувало мінімумам тиску, пов'язаним з проходженням теплого фронту (рис. 3.3). В табл.3.1 також зазначено короткочасне зростання тиску між проходженнями циклонів 1 та 2.

Різниця у часі була найбільшою для третього циклону (6–7 грудня): потепління відбулося за 12 годин до настання мінімуму тиску в районі станції «Академік Вернадський» та за 9 годин в районі станції «Професор Хуліо Ескудеро». Приземна температура і атмосферний тиск з бази даних ERA5 добре узгоджуються з даними SYNOP (рис. 3.3). Незважаючи на те, що максимуми температури згладжуються для результатів ERA5, 3-годинні часові дані коректно відображають тенденцію зміни

температури повітря впродовж дня (рис. 3.3). У середньому за весь тиждень в районі станції «Професор Хуліо Ескудеро» середня за тиждень температура повітря на рівні 2х метрів становить  $0,06^{\circ}\text{C}$  за даними Polar WRF і  $0,41^{\circ}\text{C}$  за даними ERA5, а для Вернадського вона становить відповідно  $-1,47^{\circ}\text{C}$  за даними Polar WRF і  $-0,80^{\circ}\text{C}$  за даними ERA5. Таким чином, у Polar WRF отримано в середньому нижчу приземну температуру повітря для обох станцій протягом цього тижня для випадка Антарктичного літа.

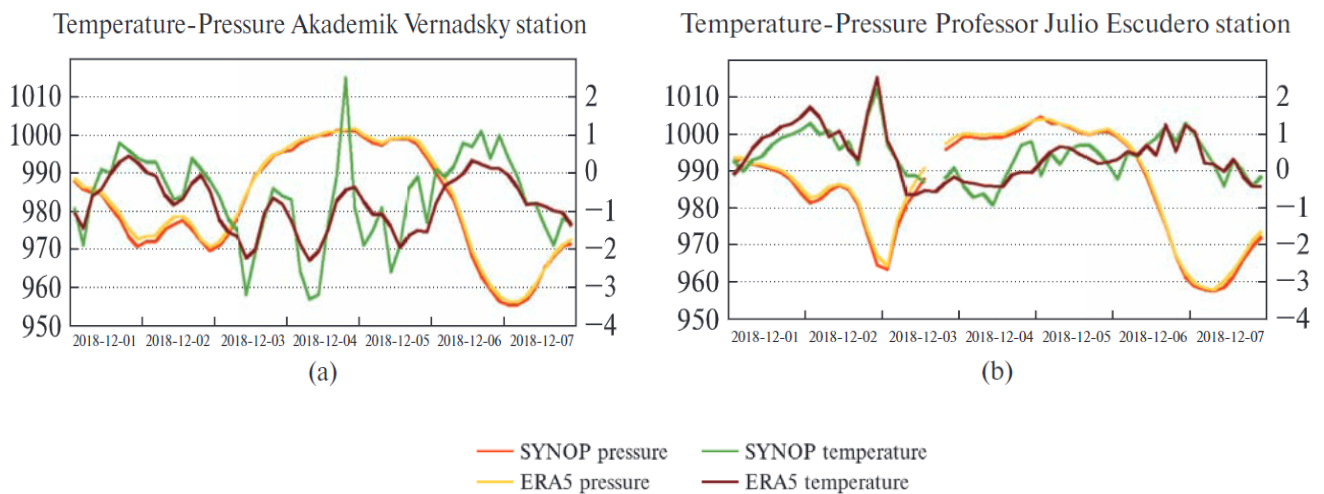


Рисунок 3.3. Приземна температура повітря та атмосферний тиск для станції «Академік Вернадський» (а) та «Професор Хуліо Ескудеро» (б) відповідно до вимірів (звіти SYNOP) та бази даних реаналізу ERA5 впродовж грудня 2018, часовий крок – 3 години

### 3.1.2. Мезомасштабні атмосферні процеси

За даними спостережень зі станцій «Академік Вернадський» та «Професор Хуліо Ескудеро» можна виокремити збільшення кількості опадів, пов'язане з теплими фронтами циклонів (табл. 3.2, рис. 3.4а, 3.5а). Згідно з результатами моделювання Polar WRF, найвища інтенсивність опадів на станції «Академік Вернадський» виявлена під час проходження систем низького тиску, а саме 1го та 5–6 грудня 2018 року. Для станції «Професор Хуліо Ескудеро» підвищена кількість опадів

асоціювалась з усіма трьома системами низького тиску— 1го, 2го та 5–6 грудня (рис. 3.4b і 3.5b). Важливо відзначити, що для станції «Професор Хуліо Ескудеро» спостереження, ймовірно, некоректно фіксують кількість опадів, оскільки сума опадів визначається на основі вимірювань висоти снігу, припускаючи, що він рівномірно щільний. Оскільки станція «Професор Хуліо Ескудеро» розташована на невеликому острові, можливою причиною більшої кількості опадів за даними Polar WRF є те, що модель може краще відобразити орографію поблизу станції «Професор Хуліо Ескудеро», ніж ERA5, що має меншу просторову роздільну здатність. Для станції «Академік Вернадський» у звітах SYNOP також набагато менша кількість опадів, але це скоріше пов'язано з добре відомим недоліком опадоміра Третьякова під час вимірювання снігопадів, дані якого включено до SYNOP (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Добова сумарна кількість опадів (мм/день) в районі станції «Академік Вернадський» та «Професор Хуліо Ескудеро» за даними спостережень, реаналізу ERA5 та моделювання Polar WRF за тиждень 1-7 грудня 2018 року

Дата	Станція «Академік Вернадський»			Станція «Професор Хуліо Ескудеро»		
	SYNOP	ERA5	Polar WRF	SYNOP	ERA5	Polar WRF
01-12-2018	1.0	2.2	20.3	2.1	24.0	26.4
02-12-2018	2.0	10.2	20.8	2.4	3.8	3.1
03-12-2018	0.0	2.1	2.2	0.5	4.2	2.8
04-12-2018	0.0	0.4	0.5	0.3	4.2	3.6
01-12-2018	0.0	0.5	4.7	0.6	6.2	9.8
01-12-2018	8.0	10.8	27.6	1.5	31.7	37.9
01-12-2018	2.0	3.5	1.3	5.7	7.8	4.8

На станції «Академік Вернадський» сніг спостерігався протягом усіх днів, крім 2 грудня, а дощ – лише 6 грудня (рис. 3.4a). Дані ERA5 і Polar WRF загалом



узгоджуються щодо часу настання снігопадів і невеликої кількості дощу впродовж 6 грудня (рис. 3.4).

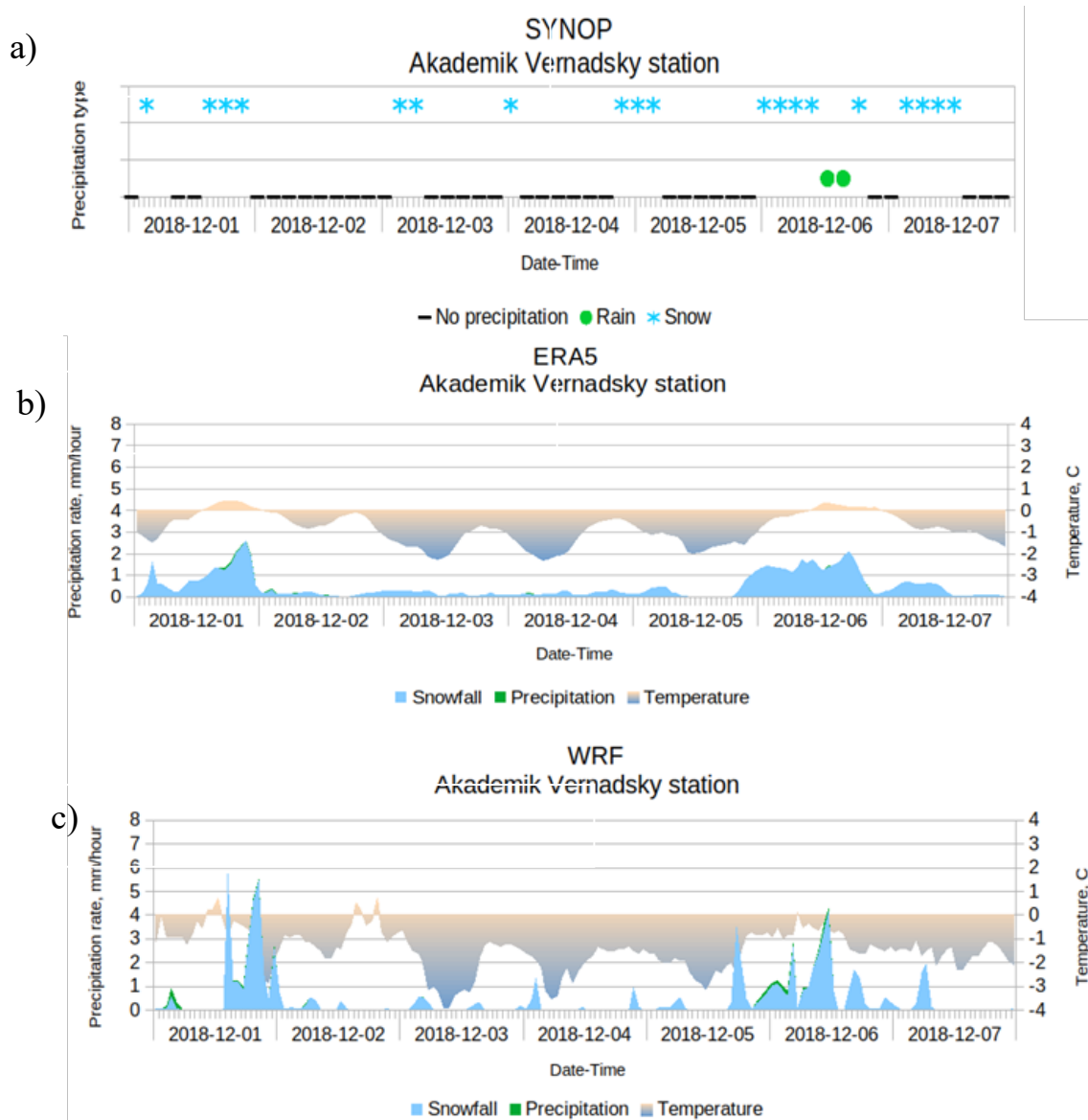


Рисунок 3.4. Тип та інтенсивність опадів на станції «Академік Вернадський»: (a) SYNOP 3-годинні значення типу опадів (сині зірочки — снігопад, зелені кружечки — дощ, чорні лінії — відсутність опадів у строк спостережень); (b) ERA5 і (c) Polar WRF погодинні суми опадів та їхня фаза (знизу, зелений — загальна кількість опадів, синій — снігопад) і температура повітря на рівні 2х метрів (верхній графік, масштабований колір)

На станції «Професор Хуліо Ескудеро» спостереження показують переважання дощу та змішаних опадів протягом проходжень усіх трьох циклонів 1–2 та 6–7 грудня (рис. 3.5а).

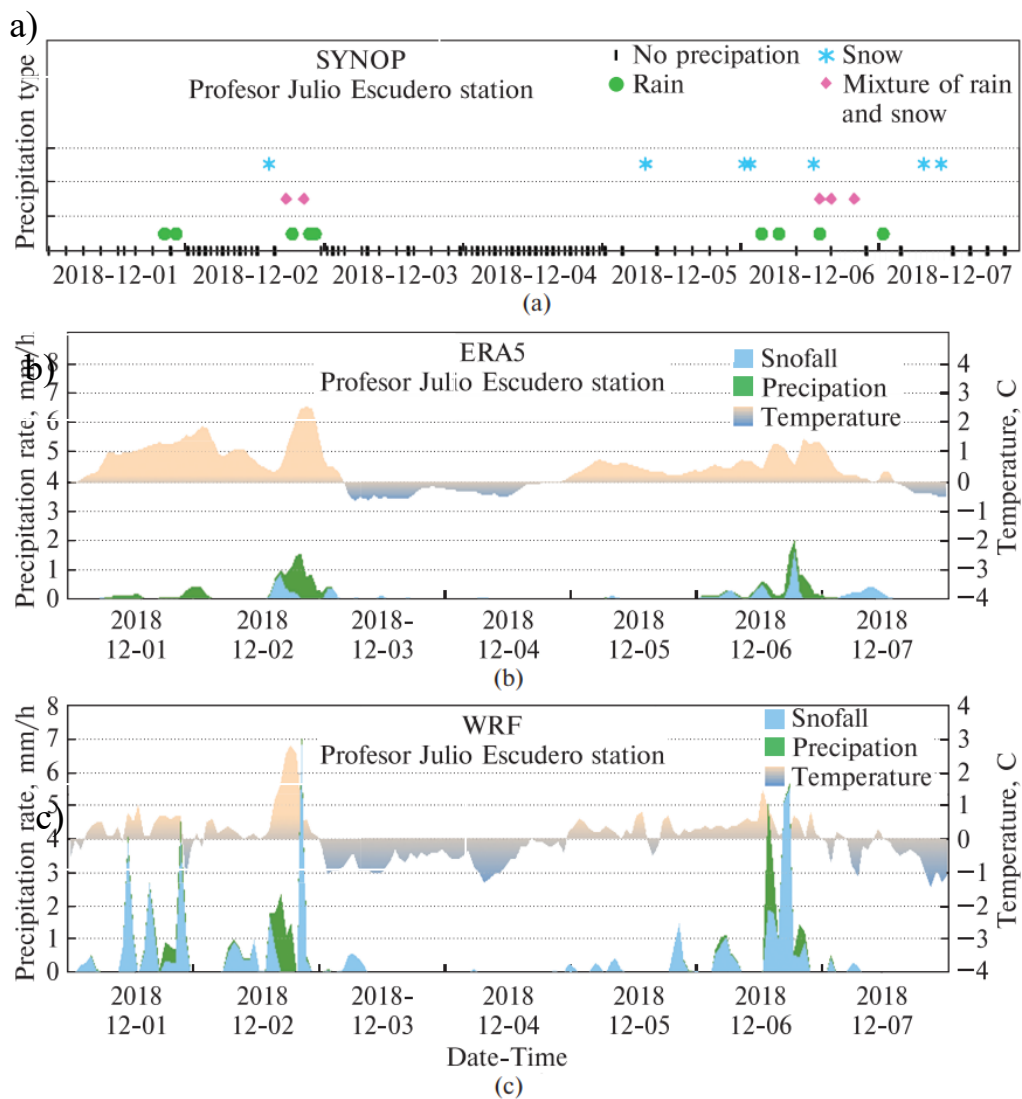


Рисунок 3.5. Тип та інтенсивність опадів на станції «Професор Хуліо Ескудеро»: (а) SYNOP 3-годинні значення типу опадів (сині зірочки — снігопад, зелені кружечки — дощ, чорні лінії — відсутність опадів у строки спостережень); (б) ERA5 і (с) Polar WRF погодинна сума опадів та їхня фаза (знизу, зелений — загальна кількість опадів, синій — снігопад) і температура повітря на рівні 2х метрів (верхній графік, масштабований колір)

Цей момент фазового переходу відрізняється за даними ERA5 та Polar WRF. Нижче наведений детальний аналіз інтенсивності опадів і зміна їх фази відповідно до зміни температури повітря під час проходження кожного з циклонів.

На станції «Професор Хуліо Ескудеро» фазовий перехід опадів від дощу до снігу та найнижче значення атмосферного тиску спостерігалися пізніше, ніж в районі станції «Академік Вернадський», а саме від 21 UTC 2 грудня до 00 UTC 3 грудня. Ця подія була пов'язана з проходженням іншого позатропічного циклону (рис. 3.2, центр). Варто зазначити, що найнижчий тиск, який спостерігався протягом 6 і 7 грудня, відповідає тому самому мінімуму тиску, з яким асоціювався фазовий перехід опадів між дощем і снігом та/або опадами змішаної фази для обох станцій (рис. 3.4а, 3.5а).

Дані моделювання Polar WRF показали вищі інтенсивності опадів порівняно з ERA5 як для станції «Академік Вернадський», так і для «Професор Хуліо Ескудеро», особливо під час проходження трьох описаних систем низького тиску (табл. 3.2, рис. 3.4 і 3.5). Для усього тижня, що досліджувався, дані ERA5 показують переважання снігу у сумарних опадах для станції «Академік Вернадський» (рис. 3.3b) навіть при температурі повітря  $0^{\circ}\text{C}$  1го і 6го грудня. Таке співвідношення може свідчити про наявність змішаних опадів або мокрого снігу. Для обох станцій впродовж тижня результати симуляції Polar WRF показують нижчу приземну температуру та більш переривчастий розподіл опадів з вищою інтенсивністю, порівняно з більш згладженим розподілом опадів за даними ERA5.

Для району станції «Академік Вернадський» дані моделювання Polar WRF показують переважно снігопади та температури близько  $0^{\circ}\text{C}$ . Проте є ознаки дощу протягом 1 та 6 грудня (зелені точки на рис. 3.4а), і судячи з температури, дощ, швидше за все, був переохолодженим. Відповідно до даних інтенсивності опадів ERA5 та Polar WRF впродовж усього тижня для станції «Професор Хуліо Ескудеро» виявлена більша кількість опадів порівняно зі станцією «Академік Вернадський». Це

супроводжувалось температурою більшою  $0^{\circ}\text{C}$  за даними вимірів на станції, що узгоджується з даними ERA5 та Polar WRF (рис 3.4b, c та 3.5b, c).

Результати моделювання Polar WRF вказують на випадіння крупи (до 0,9 мм/год) на обох станціях протягом 1, 2 та 6 грудня (рис. 3.6). Найвища інтенсивність випадання крупи відповідає зниженню атмосферного тиску, підвищеній кількості опадів і змішаних опадів у вигляді дощу та снігу.

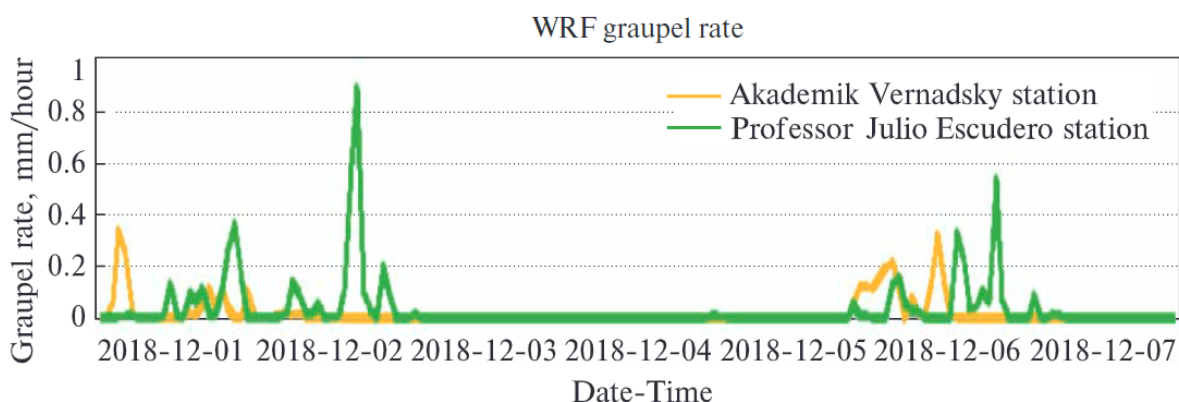


Рисунок 3.6. Оподи у вигляді сніжної крупи за даними моделювання Polar WRF (мм/год). Зелена лінія представляє «Професор Хуліо Ескудеро», жовта – «Академік Вернадський»

На рис. 3.7 представлено вертикальний профіль температури повітря для станції «Професор Хуліо Ескудеро» під час зафіксованих моментів переходу фазового стану опадів на основі даних радіозондування, виконаного впродовж Року полярного прогнозування південній півкулі – літній період (YOPP-SH). Ці вимірювання використовувались для оцінки даних ERA5 та Polar WRF для вузлів сітки, що відповідають місцезнаходженню станції «Професор Хуліо Ескудеро». Можна припустити, що вертикальний профіль температури повітря за даними ERA5 практично співпадає з даними радіозондування через те, що випуски зондів регулярно виконуються на цій станції та результати асимілюються в дані реаналізу (рис. 3.7).

Polar WRF показує нижчу температуру в нижній частині тропосфери під час проходження першого циклону 1 грудня порівняно з радіозондом і ERA5, тоді як інші профілі Polar WRF набагато ближчі до даних радіозондування. Для першого випадку проходження циклону нижчі температури в першому профілі можуть пояснити формування більшої кількості опадів у вигляді снігу за результатами моделювання Polar WRF порівняно з даними ERA5. Таким чином, ERA5 представляє профіль температури та характеристики опадів для циклону 1 грудня краще, ніж моделювання Polar WRF з вищою просторовою роздільною здатністю.

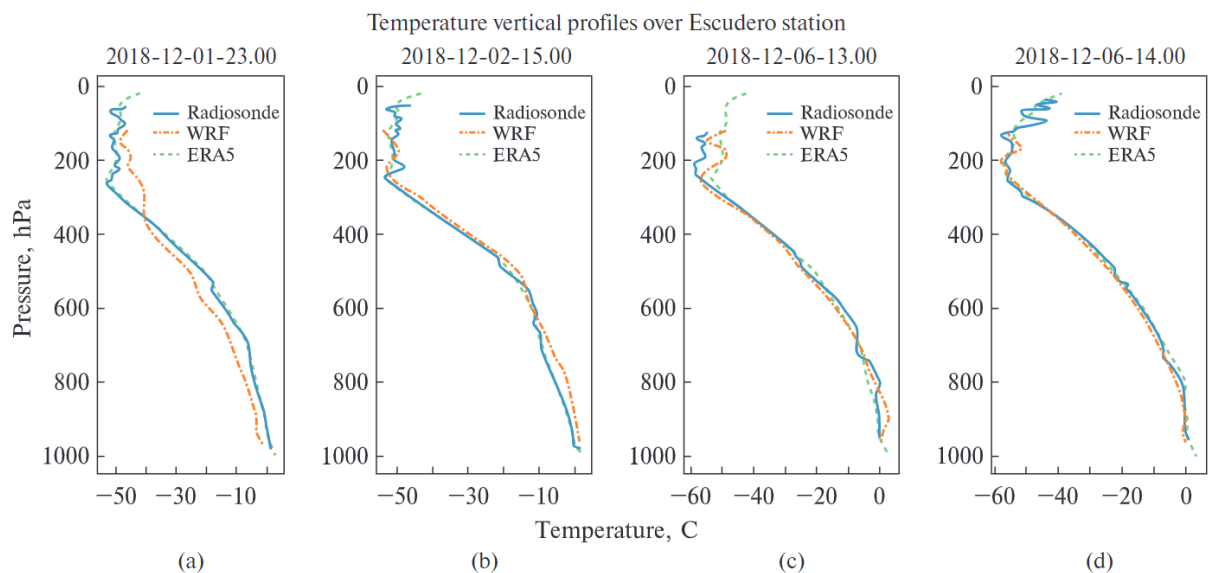


Рисунок.3.7 Вертикальний профіль температури повітря для станції «Професор Хуліо Ескудеро»: за даними радіозондування (суцільна синя лінія), визначена для найближчої відповідної точки для реаналізу ERA5 (пунктирна зелена лінія) та Polar WRF (пунктирна помаранчева лінія)

Для випадку 2 грудня виявлено у цілому узгодженість у вертикальному профілі температури повітря між вимірюваннями радіозонду та ERA5, тоді як Polar WRF демонструє значне додатне зміщення (рис. 3.7b). У той же час як ERA5, так і моделювання Polar WRF добре представляють появу змішаних фаз опадів (дощ і сніг)

та моменти переходу від дощу до снігу для станції «Професор Хуліо Ескудеро» під час проходження цього циклону (рис. 3.5). Проте Polar WRF моделює значно вищу інтенсивність снігопаду порівняно з ERA5.

За даними моделювання та спостережень характеристики опадів та температурного режиму були дещо іншими під час проходження циклону 6 грудня. За результатами досліджень Gorodetskaaya et al. (2020b) та Bromwich et al. (2020) було показано, що ця подія була пов'язана з атмосферною річкою, яка вплинула як на південь Південної Америки, так і на Антарктичний півострів. Радіозондування для станції «Професор Хуліо Ескудеро» 6 грудня 2018 року о 13 UTC показали наявність температурної інверсії на рівні близько 800 гПа, що перевищувала 0°C на висоті інверсії (рис.3.7). У цей момент часу температурна інверсія була відображена даними Polar WRF, але на менших висотах, тоді як реаналіз ERA5 не відобразив інверсію зовсім. Таким чином, на відміну від проходження циклонів, описаних вище, для цього випадку представлення температури Polar WRF є більш точним, ніж ERA5. Як і під час попередніх подій, дані моделювання Polar WRF показали вищу кількість опадів порівняно з ERA5 та спостереженнями як для станції «Професор Хуліо Ескудеро», так і для станції «Академік Вернадський» (рис. 3.4 і 3.5, табл. 3.2). У той же час Polar WRF демонструє хорошу узгодженість зі спостереженнями для часу настання дощу, тоді як ERA5 пропускає деякі короткочасні випадки дощу, визначаючи опади як снігопад.

Це більш реалістичне представлення фази опадів (наявність дощу), за даними моделювання Polar WRF протягом 6 грудня порівняно з ERA5, може бути пов'язане з покращеним відображенням температурного режиму в моделі.

### **3.1.3. Умови формування інтенсивних опадів із екстремальними температурами**

Для кращого розуміння синоптичних умов, в яких формуються інтенсивні літні опади у регіоні, було проведено аналіз особливостей атмосферної циркуляції для випадку інтенсивних опадів у лютому 2022го року, що супроводжувався рекордним короткочасним підвищенням температури на західному та північно-західному

узбережжі Антарктичного півострова. Синоптичні процеси оцінювалися за даними реаналізу ERA5 та додатково за супутниковими знімками. Представлено розподіл атмосферного тиску на рівні моря за даними реаналізу (рис 3.8), який порівнюється із супутниковим знімком поля хмарності (рис 3.9) та опадів (рис 3.10) у цьому ж регіоні.

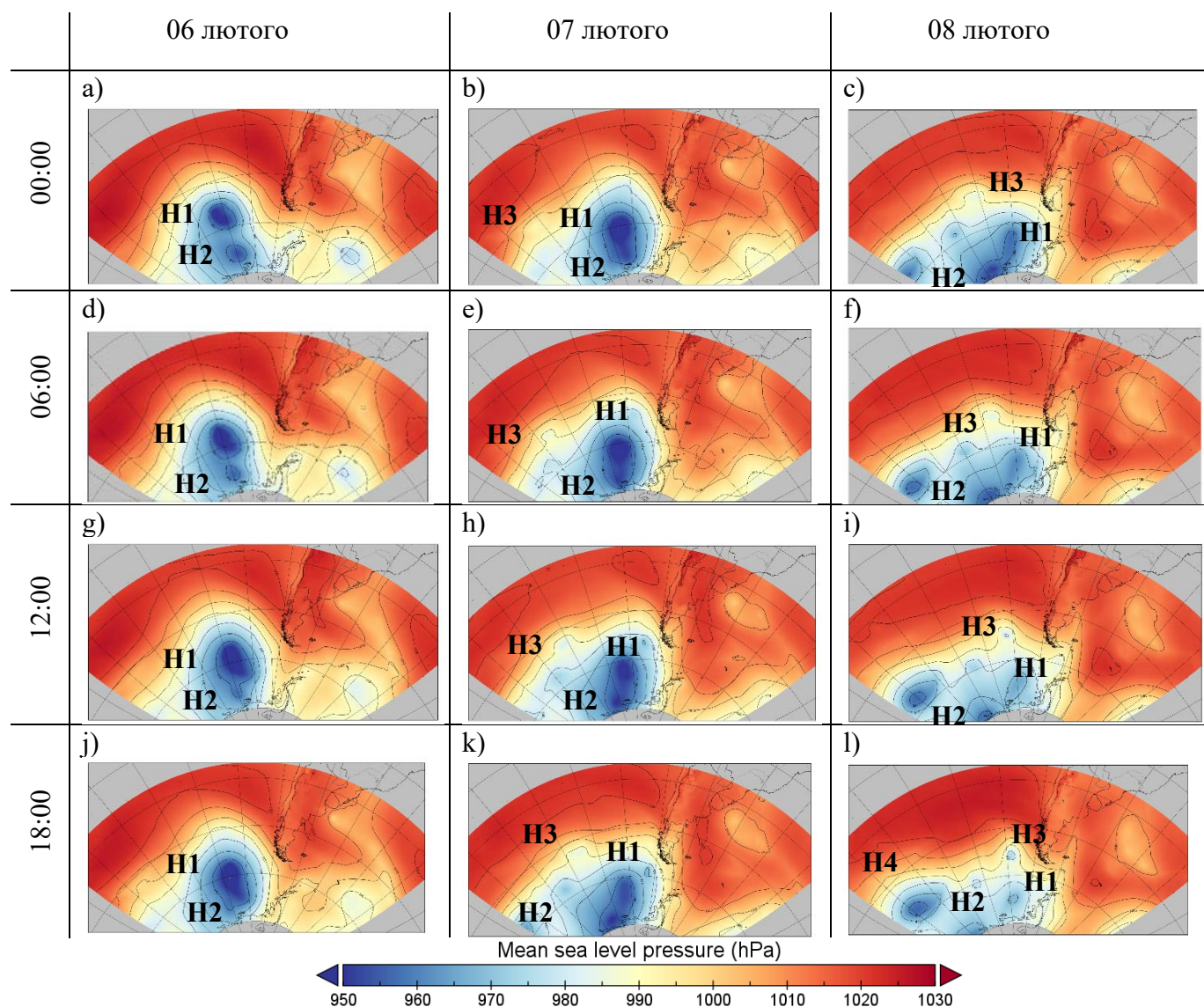


Рисунок 3.8. Приземний атмосферний тиск на рівні моря за даними бази реаналізу ERA5 за 6-8 лютого 2022 року

Додатково, атмосферні процеси оцінювалися за результатами вимірів метеорологічних величин на станції «Академік Вернадський» (рис. 3.11). Частково

результати, розглянуті у цьому пункті, увійшли до публікації Gorordetskaya et al 2023 (<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2544063/v1>).

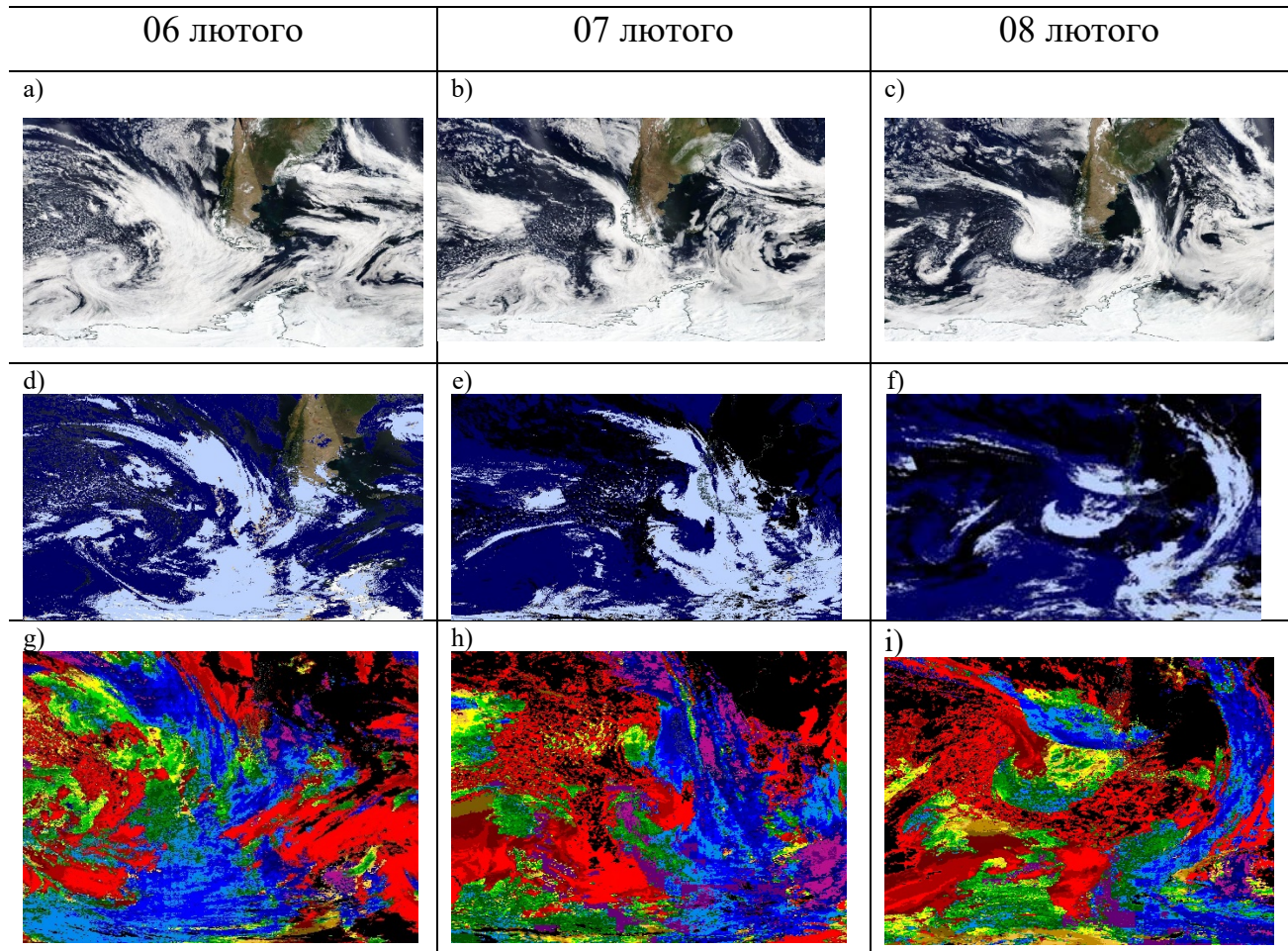


Рисунок 3.9. Супутникові знімки за даними Aqua / MODIS: a-b скориговане відображення, справжній колір; d-f оптичні властивості фази хмар (темно синій – водні хмари, світло синій – льодяні хмари, жовтий – невизначено); g-i висота верхньої межі хмарності (червоний – до 800 м, темно червоний 800-3150 м, жовтий до 5600 м, зелений - до 8000 м, синій – до 10400 м, фіолетовий близько 12000 м, темно фіолетовий вище 12 км)

NASA Worldview application (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), part of the NASA Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)



На супутникових знімках за 6-7 лютого (рис 3.9 а, б) добре виокремлюється смужка щільної хмарності, що простягається від 40х широт Тихого океану до Антарктичного півострова. Наведене поле тиску показує існування глибокого циклону, що на початок шостого лютого (рис 3.8 а) розташовувався в районі моря Амундсена і розділявся на два центри Н1 та Н2 з мінімумами до 950 гПа. У цей же час ізобара 970 гПа простягається від Антарктичного узбережжя до приблизно 55 пд. ш.

Описані баричні утворення супроводжуються формуванням потужного, переважно кристалічного шару хмарності (рис 3.9 d) над Тихоокеанським сектором Південного океану з верхньою межею 8-10 км (рис 3.9 g) за супутниковими даними Aqua / MODIS та опадами в середньому 0,5-1 мм/год з максимумами до 3 мм/год за супутниковими даними GCOM-W1/AMSR2 (рис. 3.10 d).

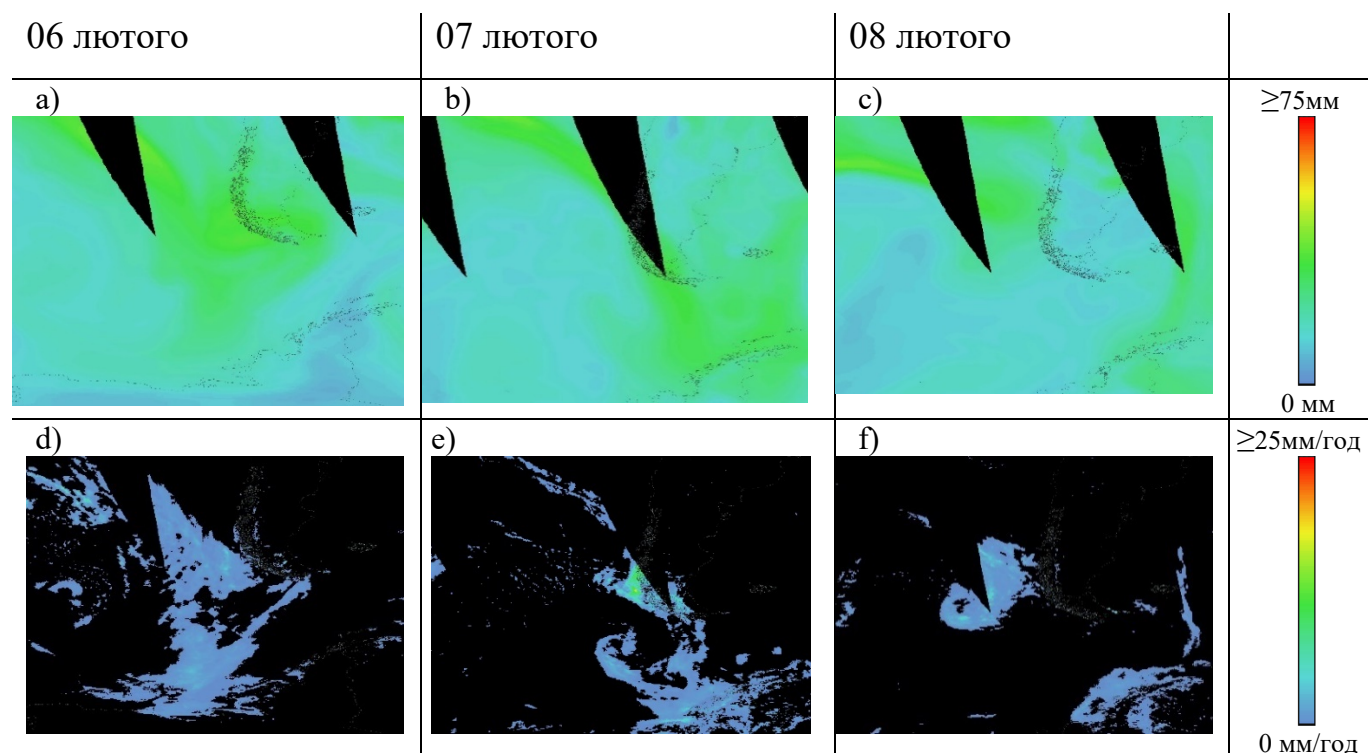


Рисунок 3.10. Супутникові знімки за даними GCOM-W1/AMSR2: а-в вміст водяної пари в стовпі атмосфери; d-f інтенсивність опадів мм/год

NASA Worldview application (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), part of the NASA Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)

Впродовж наступних 12ти годин циклон поглиблювався, досягнувши свого мінімуму 943 гПа близько 12й години 6го лютого (рис 3.8 d, g), і зберігався над регіоном до ранку 7го лютого (рис 3.8 j, b), дещо змістившись на схід у бік Антарктичного півострова. Встановлена двоцентровість циклону з мінімумами Н1 і Н2 зберіглась. Після 00:00 UTC 7го лютого відмічалось поступове зростання тиску в мінімумах циклонів Н1-Н2 та формування нової улоговини Н3 у північно-західному секторі основного циклону Н1-Н2 (рис 3.8 b, e, h).

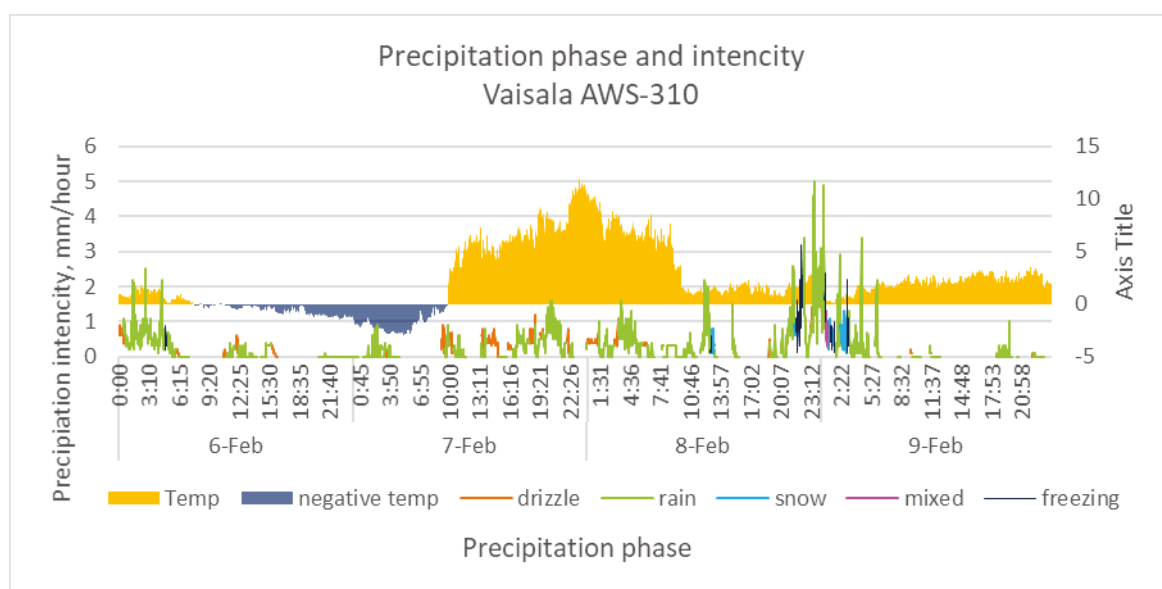


Рис. 3.11 Температура повітря (помаранчевий – вище 0°C, сірий – нижче 0°C) та інтенсивність опадів (червоний- мряка, зелений -дощ, синій – сніг, рожевий – змішані опади, темно синій – змішані опади) за даними вимірів автоматичної станції Vaisala AWS-310 на станції «Академік Вернадський»

Окрема замкнута ізобара 970 гПа з'являється біля південного узбережжя Чилі на картах за 12:00 7го лютого (рис 3.8 h) та продовжує зміщатися в бік Антарктичного півострова посилюючи заток теплого волого повітря з тропічних широт у північно-східній частині основного глибокого циклону Н1-Н2 (рис 3.10 a, b), що проявляється у наявності двох вихорів у розподілі поля хмарності (рис 3.9 b,e) з верхньою межею

до 10 км (рис 3.9 h) та розподілі поля опадів (рис 3.10 e). Таке баричне утворення, що супроводжується значним переносом вологи визначається як атмосферна ріка (Gorordetskaaya et al 2023). Теплий фронт проходить через узбережжя Антарктичного півострова приблизно за 20 годин, про що свідчать дані вимірів температури та інтенсивності опадів на станції «Академік Вернадський» (рис. 3.11).

Варто зазначити, що 7го лютого в північно-західній частині основного циклону H1-H2, в улоговині, також існували умови для формування двох низьких циклонів. Ця улоговина зміщувалася на схід впродовж сьомого та восьмого лютого повторюючи описану схему переносу вологи, утворюючи замкнуті ізобари 980 гПа (H4) о 18:00 8го лютого (рис 3.8 c, f, i, l). Комбінація цих циклонів супроводжувалася інтенсивним затоком тепла з помірних широт Тихого океану (рис 3.10 c), формуванням хмарності з висотою верхньої межі кристалічної фази до 8 км та більшою кількістю низьких (до 3 км) рідких хмар (рис. 3.9 c, f, i), що формувало інтенсивні опади у проміжку з 18:00 8го лютого до 12:00 9го лютого (рис 3.10 f, рис 3.11).

### **3.2. Хмари та опади в перехідний сезон**

Для аналізу процесів хмаро- та опадоутворення у перехідні сезони розглянуто та проаналізовано випадок інтенсивних опадів, які спостерігалися на станції «Академік Вернадський» у квітні 2021 року. Аналіз макромасштабних процесів в атмосфері проводився за даними реаналізу ERA5 та супутниковими знімками хмарного покриву. Мезомасштабні процеси вивчалися за результатами моделювання Polar WRF, що виконувалось для чотирьох днів з 31го березня до 3 квітня 2021 року на базі Українського гідрометеорологічного інституту та National Center for Atmospheric Research (США). Для верифікації результатів моделювання та для детальнішого аналізу процесів хмаро- та опадоутворення використовувалися також виміри на станції «Академік Вернадський», проведені автором персонально під час 26-ї Української антарктичної експедиції.

### 3.2.1 Синоптичні умови

За даними бази реаналізу ERA5 (рис. 3.12 а, d) 31 березня у морі Амундсена сформувався потужний глибокий цикллон з мінімумом, що досягав 949 гПа (Н1), а в районі півдня Чилі та Аргентини сформувався антициклон з максимумом, що досягав 1030 гПа, В1. Пізніше 31го березня тиск у центрі Н1 зростав (рис. 3.12 г, j), і його мінімум на початок 1го квітня становив 963 гПа (рис. 3.12 б).

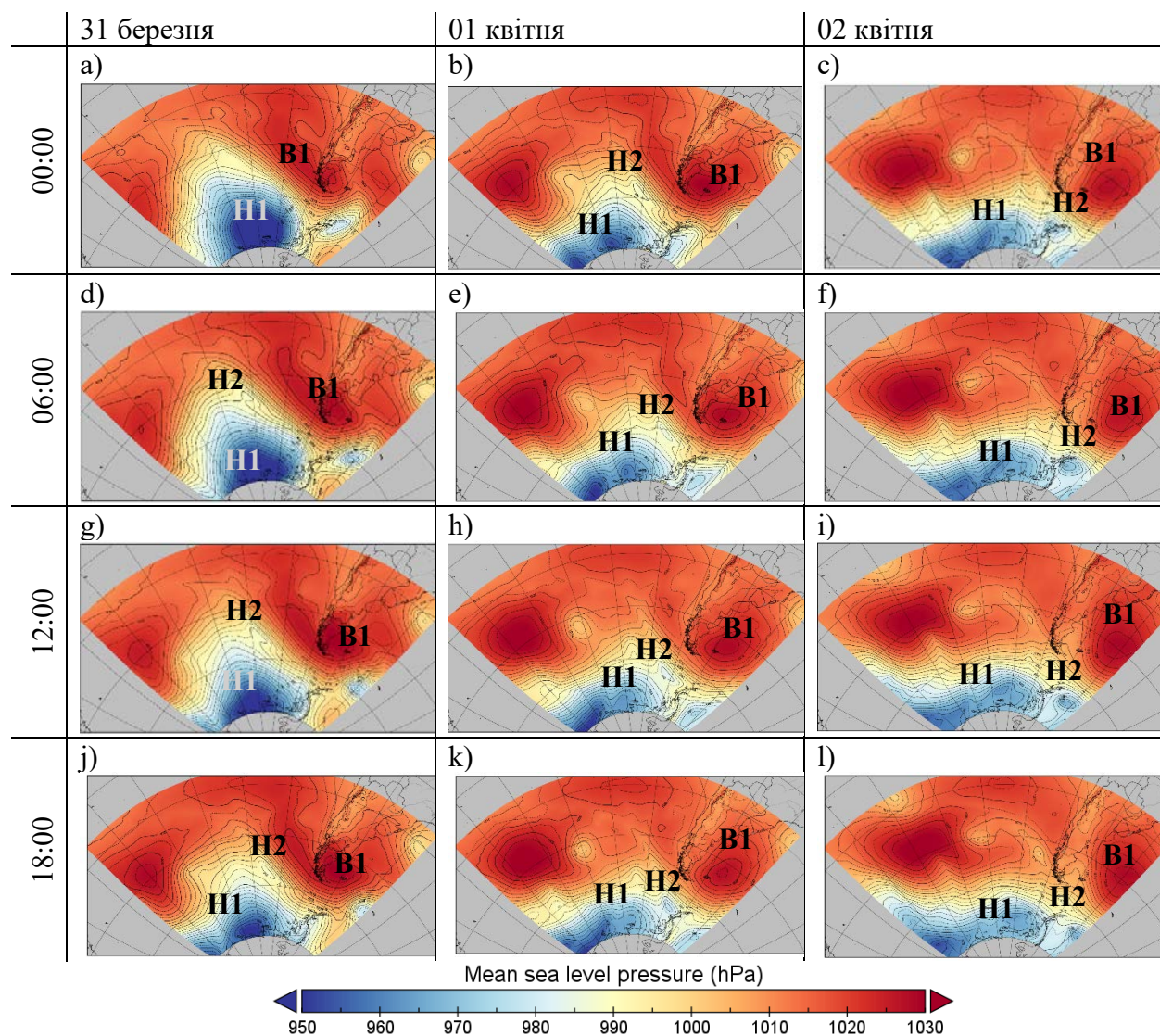


Рисунок 3.12. Середній атмосферний тиск на рівні моря (гПа) за базою даних реаналізу ERA5 з 31 березня до 2 квітня 2021 року

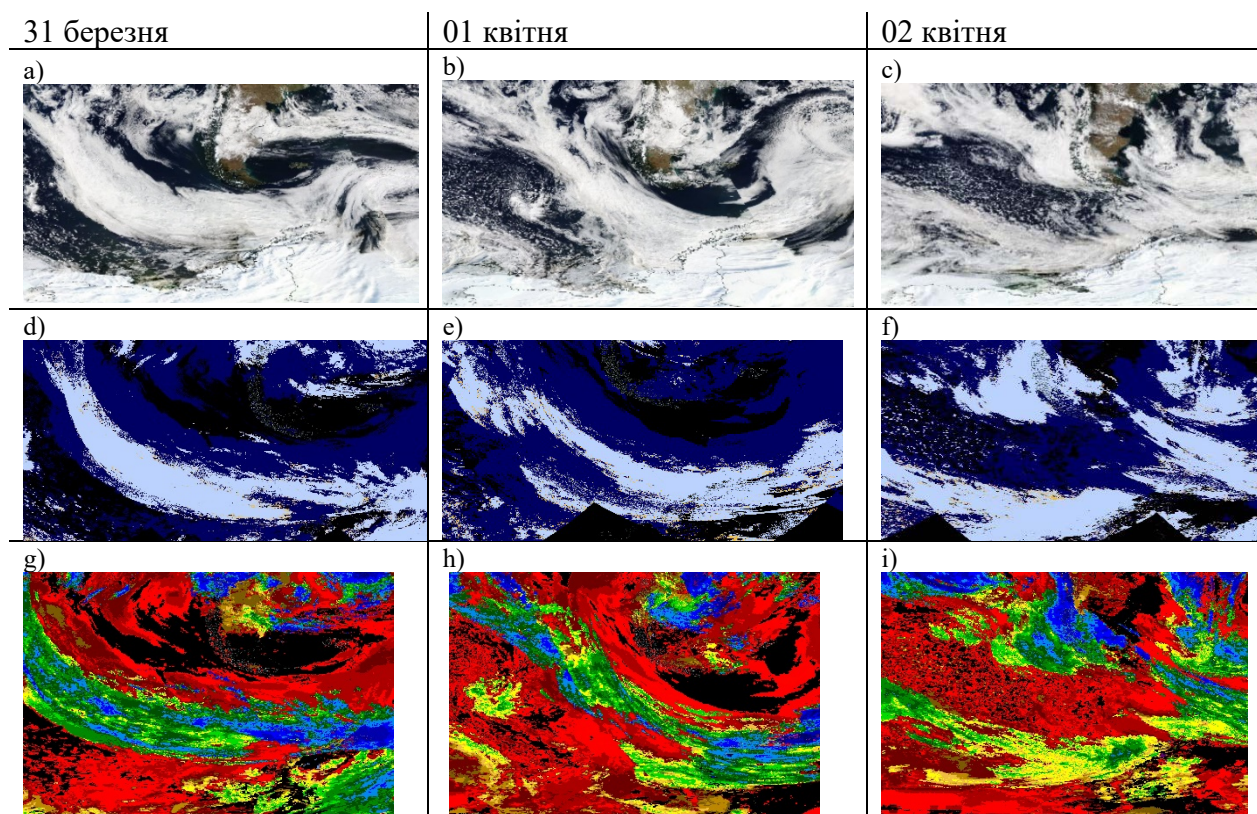


Рисунок 3.13. Супутникові знімки за даними Aqua / MODIS: a-b скориговане відображення, справжній колір; d-f оптичні властивості фази хмар (темно синій – водні хмари, світло синій – льодяні хмари, жовтий – невизначено); g- i висота верхньої межі хмарності (червоний – до 800 м, темно червоний 800-3150 м, жовтий до 5600 м, зелений - до 8000 м, синій – до 10400 м, фіолетовий близько 12000 м, темно фіолетовий вище 12 км)

NASA Worldview application (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), part of the NASA Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)

У цей же час у північній частині циклону Н1 утворилася улоговина, в якій на картах за 31 березня у 18:00 сформувався низький видовжений циклон Н2 з тиском у центрі приблизно 995 гПа (рис. 3.12 j). Циклон Н2 посилив ефект атмосферної річки – затоку вологи з 45ї південної широти Тихого океану в напрямку Антарктичного півострова, що супроводжувався формуванням порівняно вузької (приблизно 400 км) та видовженої (до 1000 км) смуги хмар (рис. 3.13 a), в якій смуга кристалічної

хмарності була завширшки до 500 км (рис. 3.13 d) з верхньою межею на висоті близько 8 км (рис. 3.13 g).

Під кристалічною хмарністю ближче до зони з низькими крапельними хмарами утворилася смуга опадів довжиною приблизно 2300 км та шириною до 300 км з інтенсивностями опадів 0,5-2 мм/год (рис 3.14 d). Також можна простежити формування опадів (рис. 3.14 d) та хмарності до 10 км (рис. 3.13 g) на півночі Антарктичного півострова, що відповідає південно-східному сектору описаного поля хмар і ймовірно пов'язано з орографічним впливом гір. Такі супутникові дані узгоджуються з вимірами на станції «Академік Вернадський», де було зафіксовано підвищення температури до  $+2^{\circ}\text{C}$  та опади з інтенсивністю до 2 мм/год (рис. 3.15), що пов'язано з проходженням теплового фронту циклону Н1 у другій половині 31 березня.

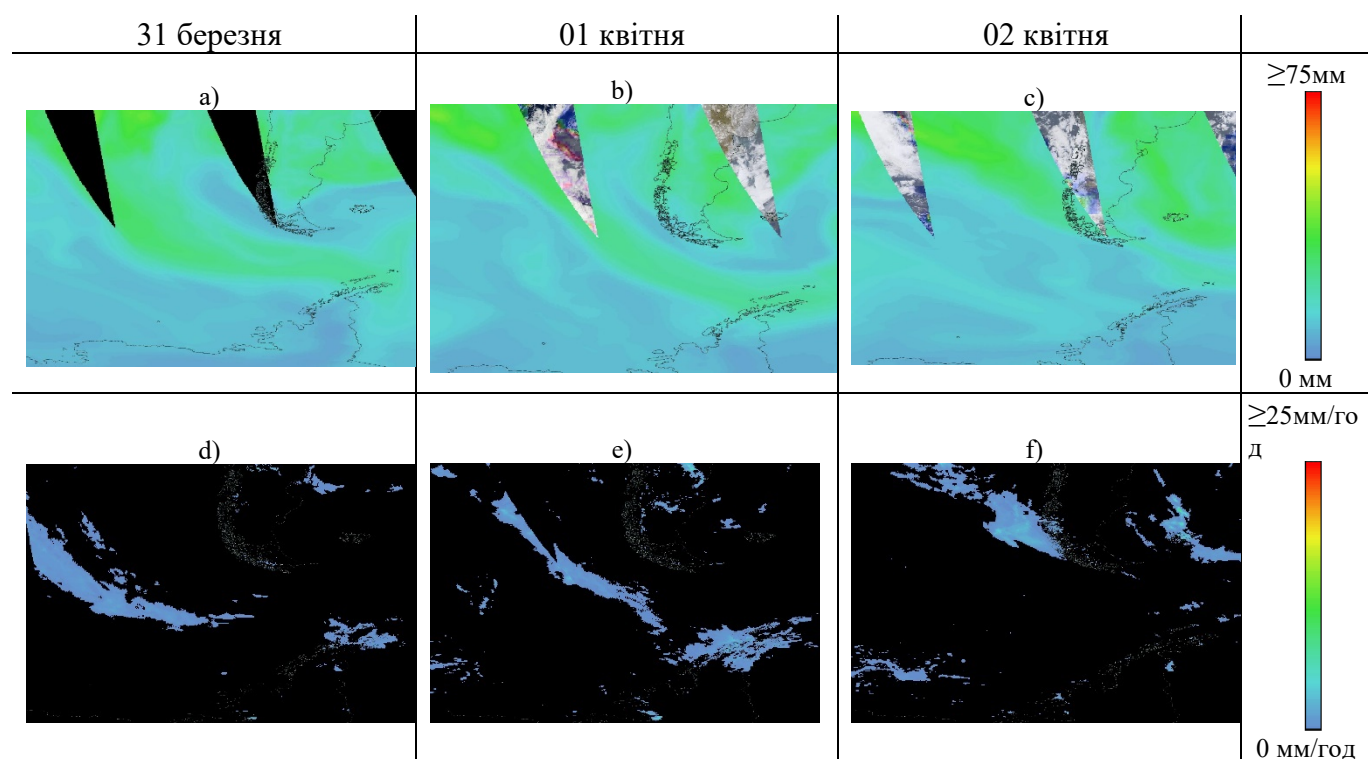


Рисунок 3.14. Супутникові знімки за даними GCOM-W1/AMSR2: a-b вміст водяної пари в стовпі атмосфери; d-f сумарні опади

NASA Worldview application (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), part of the NASA Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)

Проходження теплового фронту, який асоціювався з циклоном Н2 (рис.3.12 b, e, h, k) та атмосферною річкою, супроводжувалось зростанням температури повітря до  $+2,5^{\circ}\text{C}$  та опадами з максимальною інтенсивністю до 6 мм/год та змішаною фазою на станції «Академік Вернадський» (рис. 3.15). Мінімальні значення тиску у центрі циклону Н2 під час проходження через Антарктичний півострів становили 985 гПа (1 квітня 18:00 - 2ге квітня 00:00 (рис.3.12 k, c). В обох випадках додатна температура в районі станції «Академік Вернадський» зберігалась впродовж 12ти годин (рис 3.15).

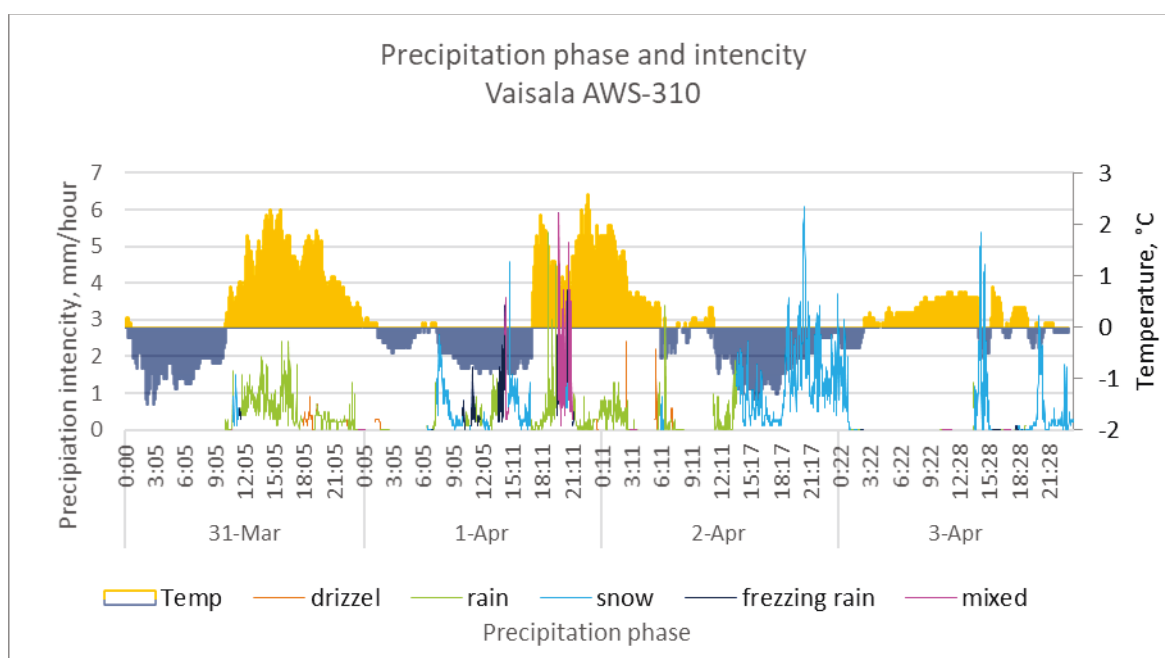


Рисунок 3.15 Приземна температура повітря (помаранчевий – вище  $0^{\circ}\text{C}$ , сірий – нижче  $0^{\circ}\text{C}$ ) та інтенсивність опадів (червоний- мряка, зелений -дощ, синій – сніг, рожевий – змішані опади, темно синій – змішані опади) за даними вимірів автоматичної станції Vaisala AWS-310 на станції «Академік Вернадський»

Впродовж 2го квітня циклон Н1 заповнювався, центр циклону Н2 проходив через Антарктичний півострів у море Уедделла, а біля південного узбережжя Чилі формувалася улоговина з тиском близько 990 гПа (рис 3.12 c, f, i, l). Хмарність, яка була пов'язана з циклоном Н1, розвивалася біля південно-західних берегів

Антарктичного півострова і була переважно кристалічною з верхньою межею до 5-8 км (рис. 3.13 с, f, i), асоціювалася з порівняно меншою кількістю водяної пари у стовпі атмосфери та з невеликими осередками опадів до 1 мм/год південно-західніше Антарктичного півострова (рис 3.14 е, f).

### 3.2.2 Мезомасштабні атмосферні процеси

Для визначення умов, в яких сформувалися опади, що досліджуються, для регіону Антарктичного півострова було проаналізовано особливості мезомасштабної циркуляції за даними моделювання Polar WRF. Зокрема було проаналізовано карти горизонтальної швидкості та напрямку вітру на висоті 500 гПа (рис. 3.16), та вертикальні профілі атмосфери для північної частини Антарктичного півострова перпендикулярно (рис.3.18) та паралельно (рис. 3.19) до основного атмосферного потоку для випадку перехідного сезону, що аналізується.

На рис. 3.16 простежується часовий розвиток струминного потоку на висоті 500 гПа зі швидкостями, що досягають 60 м/с. У цілому переважав західний напрям вітру, який під кінець 2го квітня змінився на північно-західний. Цей потік досягав північної частини Антарктичного півострова і проходив через нього майже під прямим кутом між 18:00 31го березня та 00:00 1го квітня 2021 року.

Впродовж першого квітня струминний потік слабшав, переважаючи швидкості в його центрі знижувалися до 50 м/с з невеликими осередками, що мали більшу швидкість і проходили через район островів Анверс і Аделаїда, південна межа швидкостей, що більше 40 м/с, знаходилася в районі 70° південної широти, північна – в районі 63° південної широти. Впродовж другого квітня струминний потік звужувався та зміщувався до північного краю Антарктичного півострова (рис. 3.16).

Для розуміння мезомасштабних процесів в районі станції «Академік Вернадський» під час цього випадку інтенсивних опадів було розглянуто два вертикальні перерізи, взаємне розташування яких показано на рис.3.17: перпендикулярно (рис 3.18) та паралельно (рис 3.19) до основного потоку, на яких



представлено горизонтальні та вертикальні складові швидкості вітру, температуру повітря та розрахункову відбивну здатність часточок в атмосфері, що непрямо характеризує наявні хмари. Довжина перерізу, перпендикулярного до атмосферного потоку становить 129 км, паралельного – 186 км.

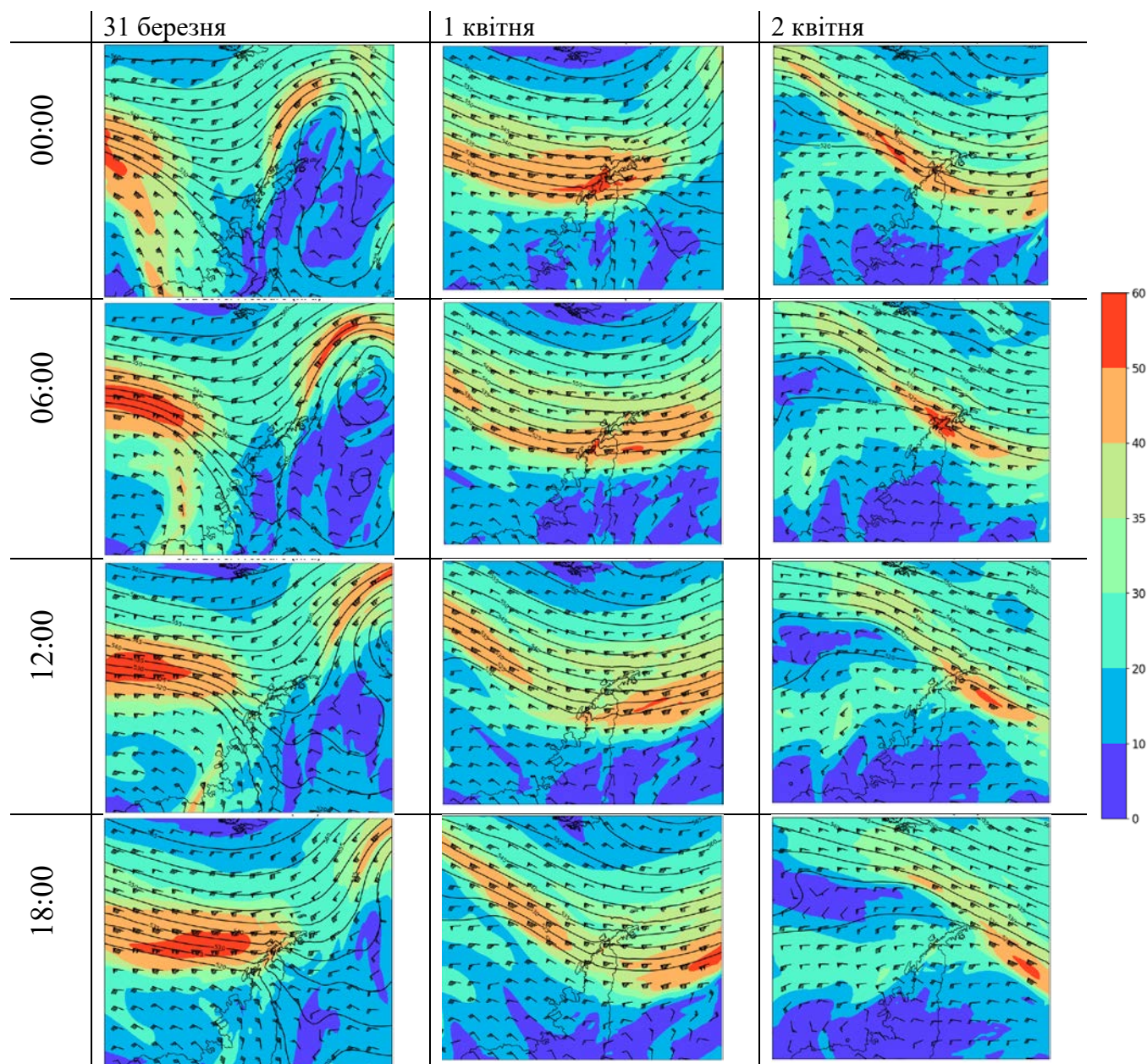


Рисунок 3.16. За даними Polar WRF висота геопотенціалу, напрям та швидкість вітру на ізобаричній поверхні 500 гПа

На рисунку 3.18а можна простежити зміщення максимальних швидкостей горизонтальної компоненти вітру на висоті 8-10 км з півночі на південь. Найбільші горизонтальні швидкості спостерігалися в середньому на висоті 8-10 км. У першій половині 31 березня вони поступово зростали і вже о 18й годині утворився прошарок між 6 км та 10 км (рис. 3.18) зі швидкостями більше за 60 м/с.

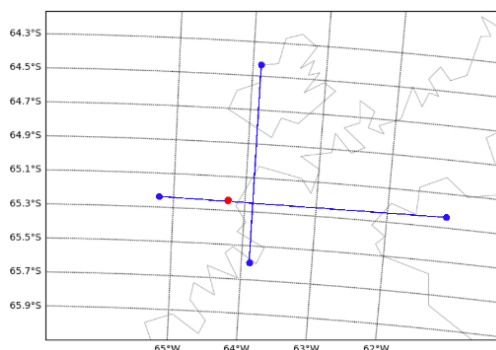


Рисунок 3.17 Схема розташування вертикальних перерізів відносно до Антарктичного півострова і станції «Академік Вернадський» (червона точка)

Оскільки на графіках, що перпендикулярні основному потоку, за 18:00 відображається незамкнене поле зі швидкостями більше 60 м/с (рис.3.18, 31 березня, 18:00 а), а на відповідних графіках перерізу через станцію «Академік Вернадський» – ні (рис.3.19, 31 березня, 18:00 а), можна стверджувати, що максимальні швидкості досліджуваного атмосферного потоку, впродовж 31го березня, проходили південніше від станції «Академік Вернадський» над узбережжям Антарктичного півострова. Центр атмосферного потоку проходив над станцією «Академік Вернадський» у першій половині 2го квітня. До кінця 2го квітня вертикальний розподіл горизонтальних швидкостей в регіоні мав більш рівномірний характер з переважаючими швидкостями до 20 м/с у шарі до 2 км та до 30 м/с вище. 31го березня можна простежити зростання приземної температури повітря з півночі (рис. 3.18, 31 березня, 6:00, d) на південь (рис. 3.18 і 3.19 березня, 12:00 -18:00, d) з навітряного боку Антарктичного півострова.

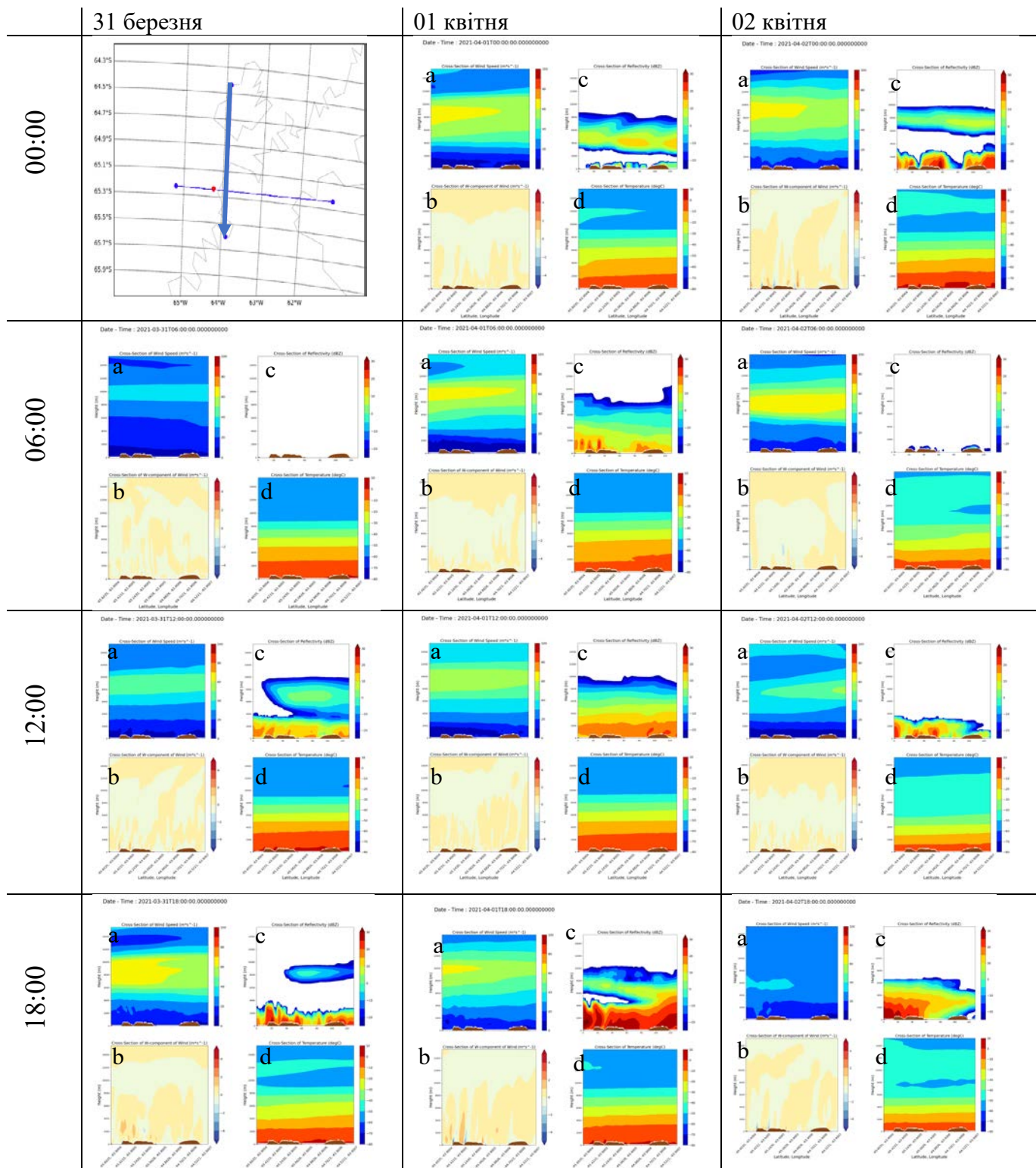


Рисунок 3.18. За даними Polar WRF перпендикулярні до основного потоку профілі метео параметрів: а – горизонтальна компонента вітру (м/с), б – вертикальна компонента вітру (м/с), с – розрахункова відбивна здатність (dBZ, еквівалент наявності хмар), d – температура повітря (°C)

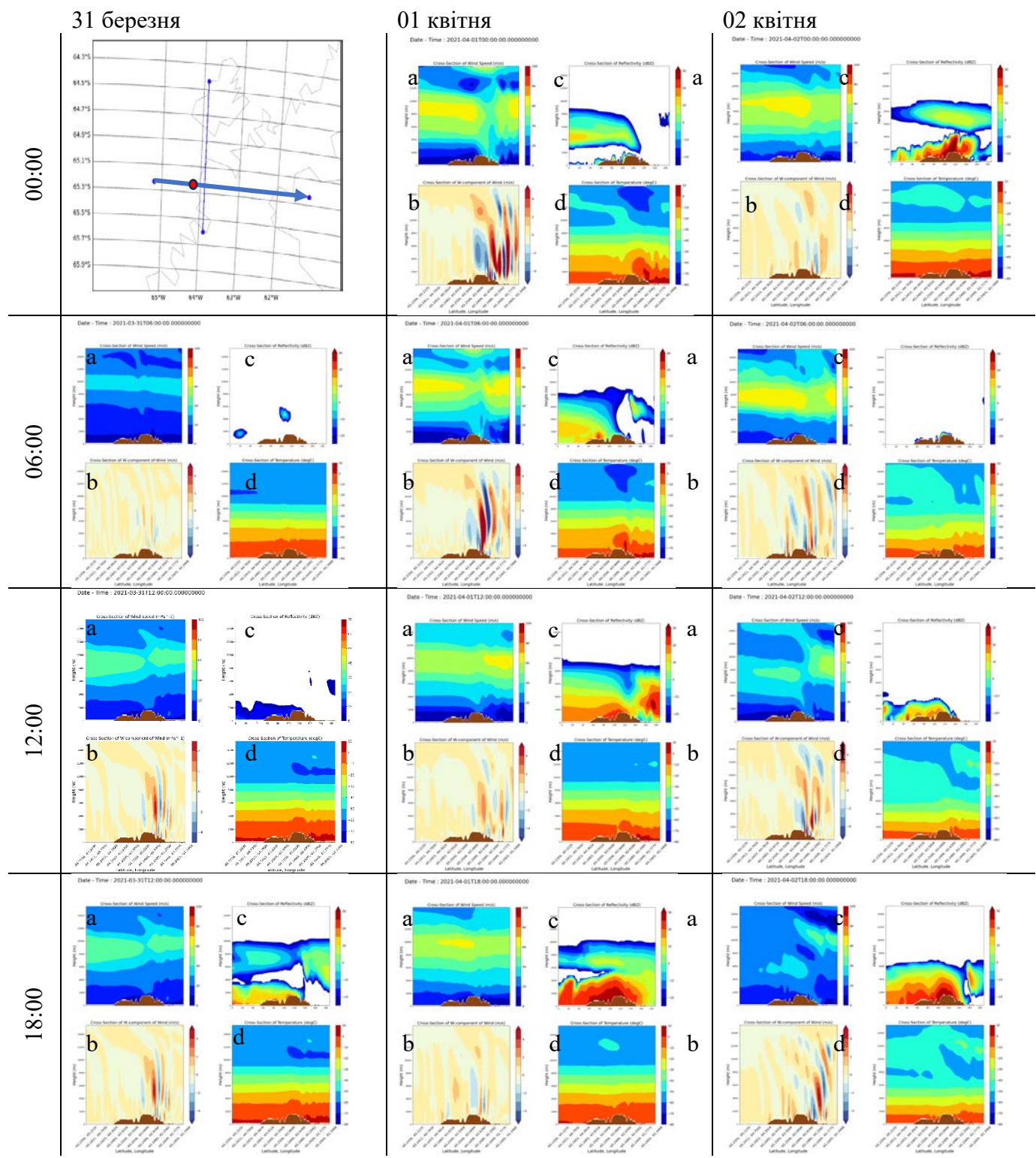


Рисунок 3.19. Вертикальний профіль за даними Polar WRF паралельний до струминного потоку, де а – горизонтальна компонента вітру (м/с), б – вертикальна компонента вітру (м/с), с – розрахункова відбивна здатність (dBZ, еквівалент наявності хмар), d – температура (°C)

Також варто відмітити, що починаючи з 12:00 31го березня починала зростати температура з підвітряної частини гір Антарктичного півострова (рис. 3.19 d, 31 березня 12:00) в районі бухти зруйнованого льодовика Ларсен В, можливо внаслідок утворення фенового ефекту. З навітряного боку гір формувалася щільна низька хмарність (рис. 3.18 і 3.19, с) з верхньою межею до 2 км, що через орографічний вплив прибережних островів (рис. 3.18) і самого півострова (рис. 3.19) могла досягати 4 км.

Описана хмарність простягалася вглиб півострова до приблизно  $62,63^{\circ}$ сх.д., де на підвітряному боці гір до середини 1го квітня розвивалися інтенсивні вертикальні рухи від 1 до 12 км з вертикальною компонентною швидкості вітру понад 5 м/с (рис.3.19 с). Максимальні значення та вертикальна протяжність до 14 км вертикальної компоненти швидкості вітру над східною частиною гір досягалися в першій половині 1го квітня. На західній частині півострова впродовж періоду дослідження значення максимуму вертикальної компоненти вітру перевищували 2 м/с у проміжку між 18:00 1го квітня і 00:00 2го квітня і 2 м/с (рис 3.18) в районі станції «Академік Вернадський» на висоті до 2-3 км. Завдяки порівняно слабким висхідним рухам з навітряного боку гір можна простежити формування потужного шару хмарності до 10 км до середини 1го квітня (рис 3.18 с).

Після 12:00 1го квітня, коли інтенсивність вертикальних рухів з підвітряної частини гір знижувалася, хмарність досягала 10 км в районі льодовика Ларсена В. Впродовж 1го та 2го квітня на рис. 3.18с та 3.19с можна простежити динаміку формування декількох шарів хмарності, що узгоджується з інтенсивністю висхідних рухів. Загалом, у період з 31 травня 00:00 до 2 квітня 24:00 переважна частина рідких опадів сформувалась з навітряної сторони півострова (рис. 3.20 b). На переважній частині домену сумарна кількість рідких опадів становила 20 мм з максимумами в окремих бухтах до 50 мм (рис. 3.20 а). Для частини домену, що відповідає океану, сумарна кількість твердих опадів у середньому також становить до 20 мм. Для західного узбережжя сума твердих опадів становить до 40 мм. Максимальні значення

накопичених твердих опадів характерні для гір півострова і в деяких районах досягають 90 мм.

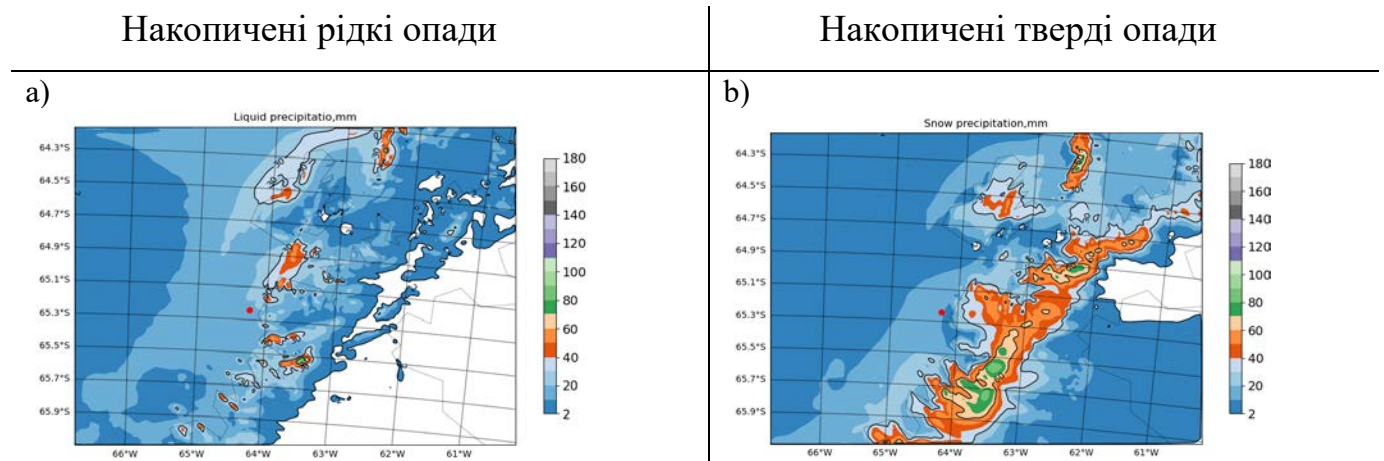


Рисунок 3.20. За даними моделювання Polar WRF накопичені опади (мм) за 72 години з 31 травня 00:00 до 2 квітня 24:00

### 3.2.3 Мікрофізичні характеристики хмар та опадів

За результатами аналізу приземного тиску та даних вимірів, наведених в пункті 3.2.1, можна припустити, що опади, пов'язані безпосередньо з проходженням атмосферної ріки, почалися о бй годині UTC 1го квітня. Змішана фаза опадів та зміна фази опадів від снігу до дощу та замерзаючого дощу спостерігалась першого квітня між 19 UTC та 21 UTC за даними автоматичної метеорологічної станції Vaisala AWS310 (рис. 3.21 а).

Максимальні інтенсивності опадів (до 6 мм/год) за весь період дослідження спостерігалися разом зі змішаною фазою опадів близько 20 UTC (рис 3.21 а). Впродовж проміжку часу між 19 UTC та 21 UTC зберігалися додатні значення приземної температури повітря до  $+1,2^{\circ}\text{C}$ . Падіння температури до  $0^{\circ}\text{C}$  близько 20:30 UTC відповідає фазовому переходу до снігу та замерзаючого дощу (рис 3.21 а). Було також проаналізовано розподіл масових концентрацій льоду, снігу, дощових крапель, хмарних крапель та кількісні концентрації льоду та дощу для всього періоду

дослідження за допомогою 3D візуалізації характеристик хмар та опадів (рис. 3.21 b, додаток Б1).

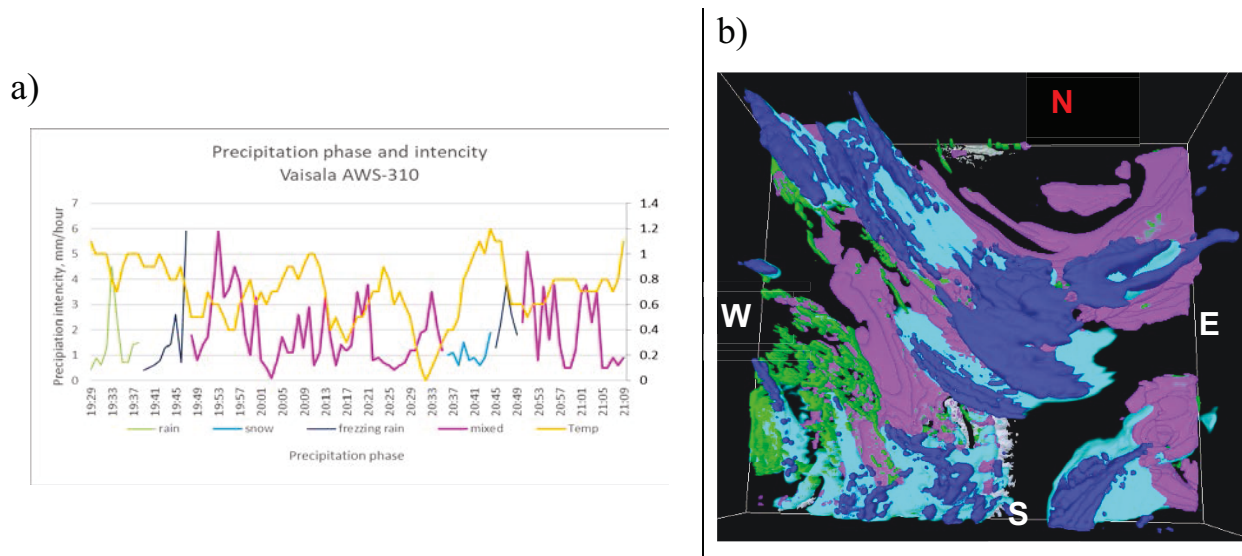


Рисунок 3.21 а) Температура, фаза та інтенсивність опадів за даними Vaisala AWS 310 1го квітня 2021; б) 3D візуалізація розподілу масових концентрацій крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий) та кристалів снігу (блакитний) 1 квітня 20 UTC за даними Polar WRF (домен з кроком 9 км)

Для всього періоду дослідження максимальні концентрації льоду спостерігалися на висоті 6-8 км в районі східних схилів гір Антарктичного півострова – бухти льодовика Ларсен В. Їх масова концентрація перевищує 0,1 г/кг (рис. 3.22 а) при кількісній концентрації, що перевищує 15000/г (рис. 3.22 б).

Впродовж 31го березня максимальні концентрації льоду досягалися впродовж 14ї UTC. Такі ж концентрації над бухтою льодовика Ларсен В спостерігалися 1го квітня з 1:30 UTC до 11:00 UTC (рис. 3.22 с, d). У цей час на захід від півострова спостерігалися низькі концентрації маси льоду до 0,01 г/кг при кількості 1000/г, вертикальною протяжністю в середньому 6 км на висоті від 4х до 10 км.

Максимальні масові концентрації снігу досягають 1,5 г/кг впродовж 18ї UTC 31го березня над основним високим хребтом Антарктичних гір та характеризуються

вертикальною протяжністю до 4 км при незначній горизонтальній протяжності (рис. 3.23). Такий розподіл може свідчити про утворення орографічних льодяних хмар при проходженні атмосферного потоку через основний високий (до 2х км) масив гір. Максимальні значення кількісних/масових концентрацій крапель дощу та хмарних крапель досягаються декілька разів впродовж періоду, що досліджується. Зокрема кількісні концентрації крапель дощу більше 1/г при масових концентраціях більше 0,1 г/кг за даними моделювання отримано 31го березня впродовж 12ї-17ї годин з навітряного схилу гір (рис. 3.24 а, б).

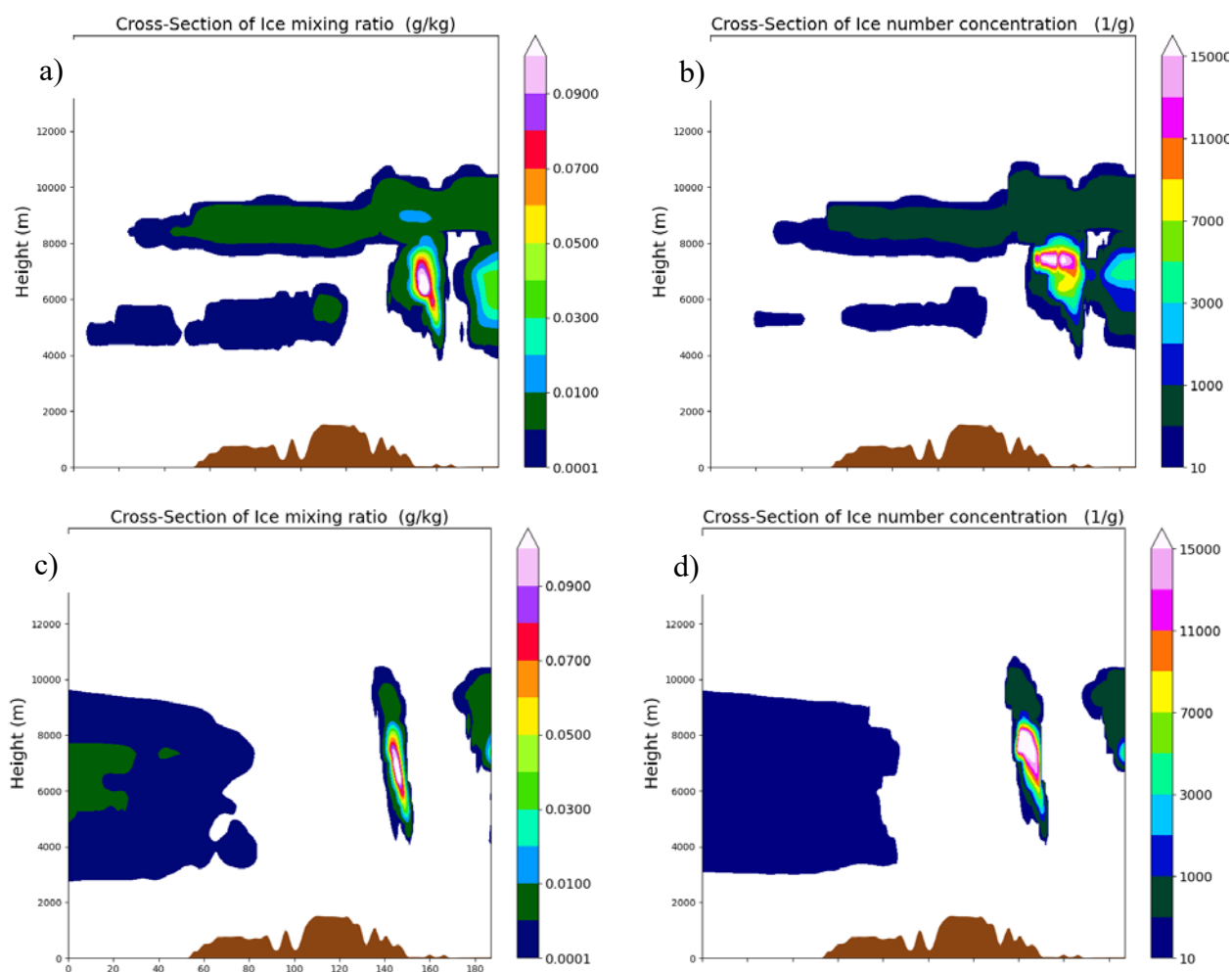


Рисунок 3.22. Максимальні значення масової (а, с) та кількісної (б, д) концентрації кристалів льоду за даними Polar WRF 31го березня о 14й UTC (а, б) та 1го квітня о 2й UTC (с, д) на вертикальному перерізі через Антарктичний півострів



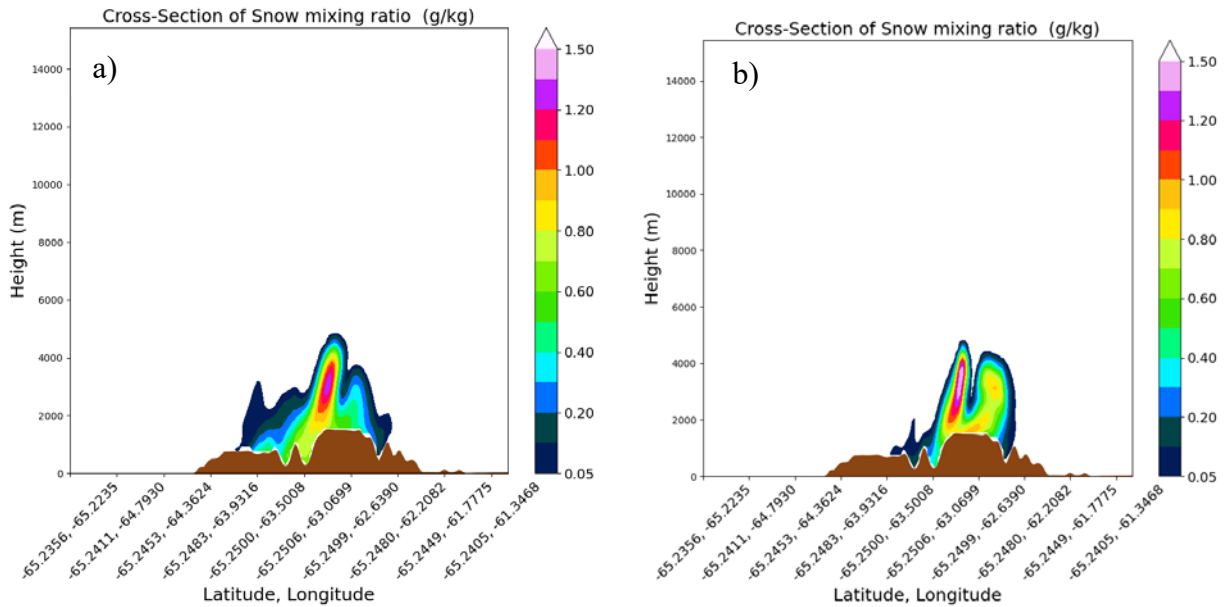


Рисунок 3.23. Максимальні масові концентрації снігу, пов'язані з орографічним впливом гір о 17:30 UTC (a) та 18:30 UTC (b) 31го березня на вертикальному перерізі через Антарктичний півострів

Також масові концентрації вище 0,1 г/кг при кількісних концентраціях близько 0,5/г на навітряних західних схилах гір з вертикальною протяжністю до 3х км отримано 31го березня о 18й годині (рис. 3.24 с, d) одночасно з максимальними значеннями масових концентрацій хмарних крапель більше 1 г/кг (рис. 3.24 е).

Наступний максимум кількісних концентрацій дощових крапель спостерігався о 18й годині 1го квітня в районі моря Беллінсгаузена у шарі до 1 км за дві години до максимальної інтенсивності опадів на станції «Академік Вернадський». При кількісних значеннях вище 1/г масові значення змінюються в межах від 0,03 до 0,1 г/кг (рис. 3.25 а, b).

За 6 годин після інтенсивних опадів зі змішаною фазою на станції «Академік Вернадський», з другої по четвертої години 2го квітня, відмічалися максимальні масові концентрації хмарних крапель над усім основним масивом Антарктичних гір на висоті 2-3 км (рис. 3.26).

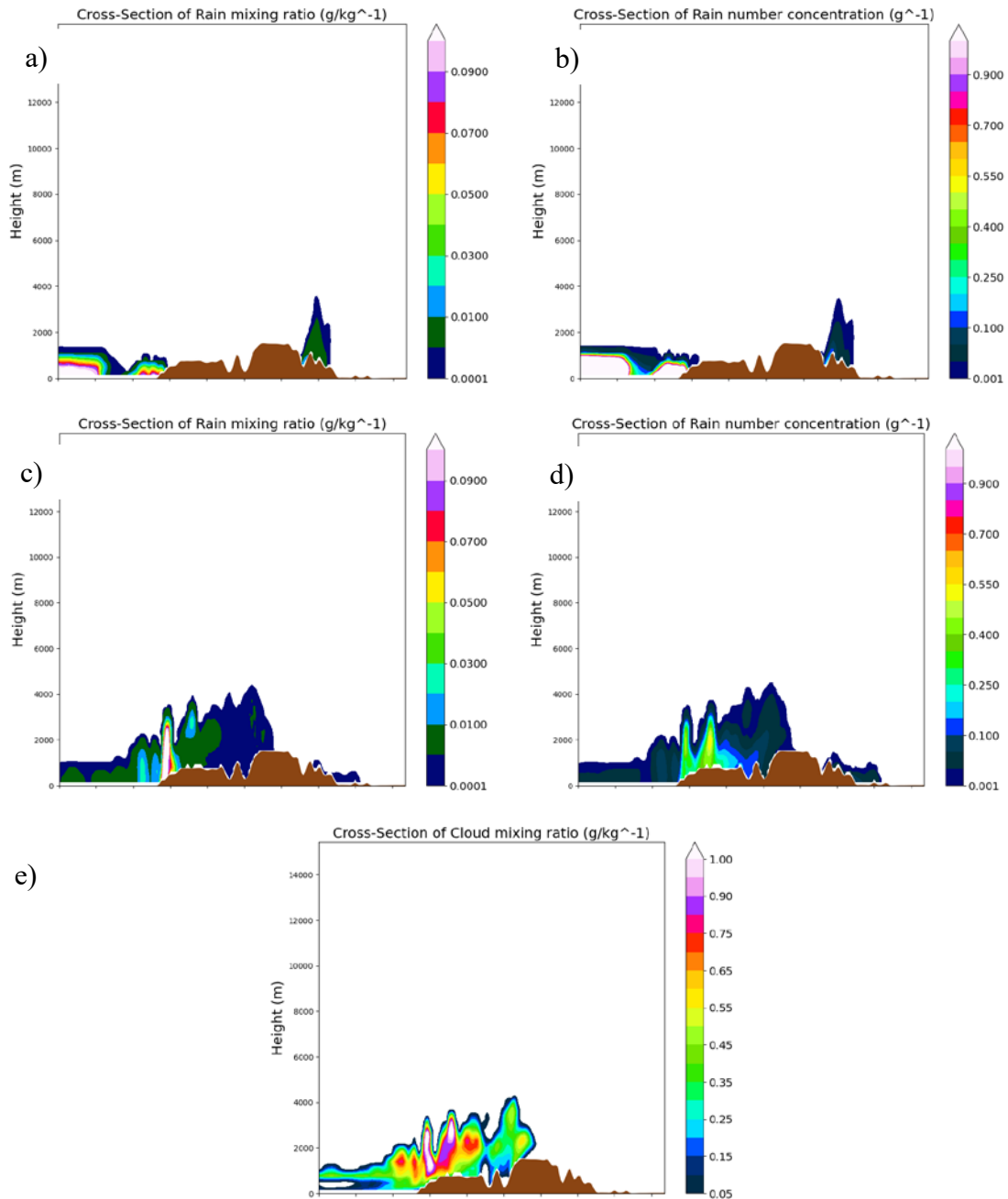


Рисунок 3.24. Максимальні масові (а, с, е) та кількісні (b, d) концентрації дощу (а, b, с, d) та хмарних крапель (е) 31 березня о 14:00 UTC (а, b) та 18:00 UTC (с, d, е) на вертикальному перерізі через Антарктичний півострів

Оскільки формування та особливості змішаної фази опадів потребують більш детального вивчення, у цьому дослідженні було розглянуто вертикальний профіль температури та вологості повітря під час інтенсивних опадів та за 6 годин до і після

інтенсивних опадів зі змішаною фазою на перерізі через Антарктичний півострів, станцію «Академік Вернадський» та бухту льодовика Ларсен В (рис. 3.27).

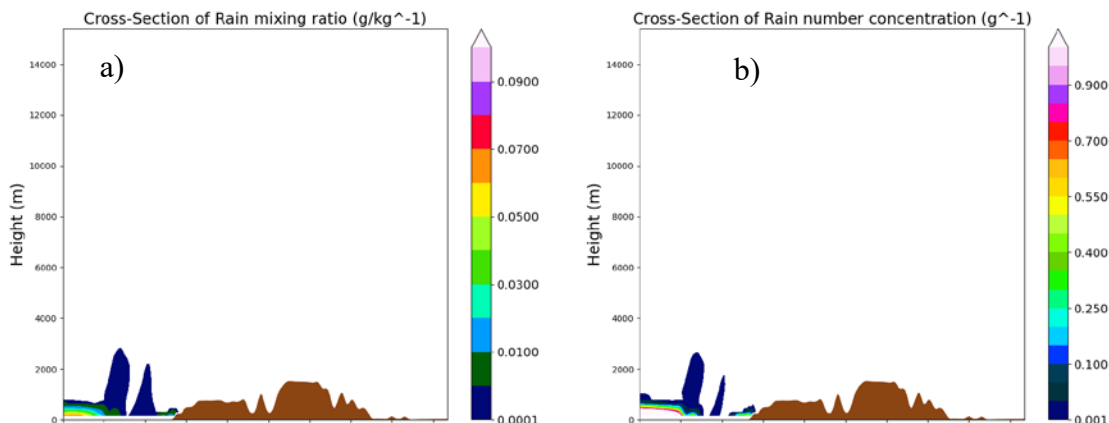


Рис 3.25. Максимальні масові (а) та кількісні (б) концентрації дощу 1 квітня о 18:00 UTC на вертикальному перерізі через Антарктичний півострів

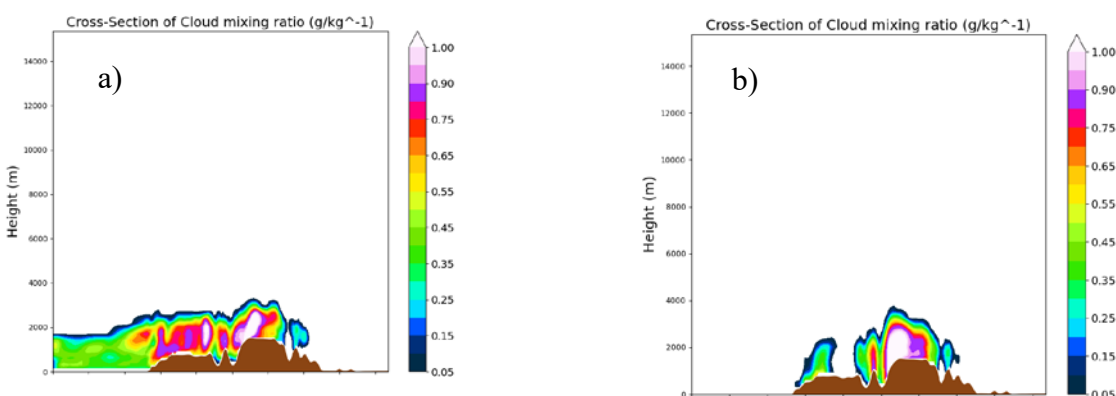


Рисунок 3.26. Максимальні масові концентрації хмарних крапель о 2:00 UTC (а) та 3:50 UTC (б) 2 квітня за результатами моделювання Polar WRF

Характеристики мікрофізичних властивостей хмар та опадів було проаналізовано разом із вертикальним розподілом температури у шарі до двох кілометрів та значеннями масової концентрації водяної пари до 14 км (рис. 3.27). Додатково перерізи температури повітря через кожні 6 годин за результатами моделювання для домену з розділенням 1 км наведені у додатку Б2.

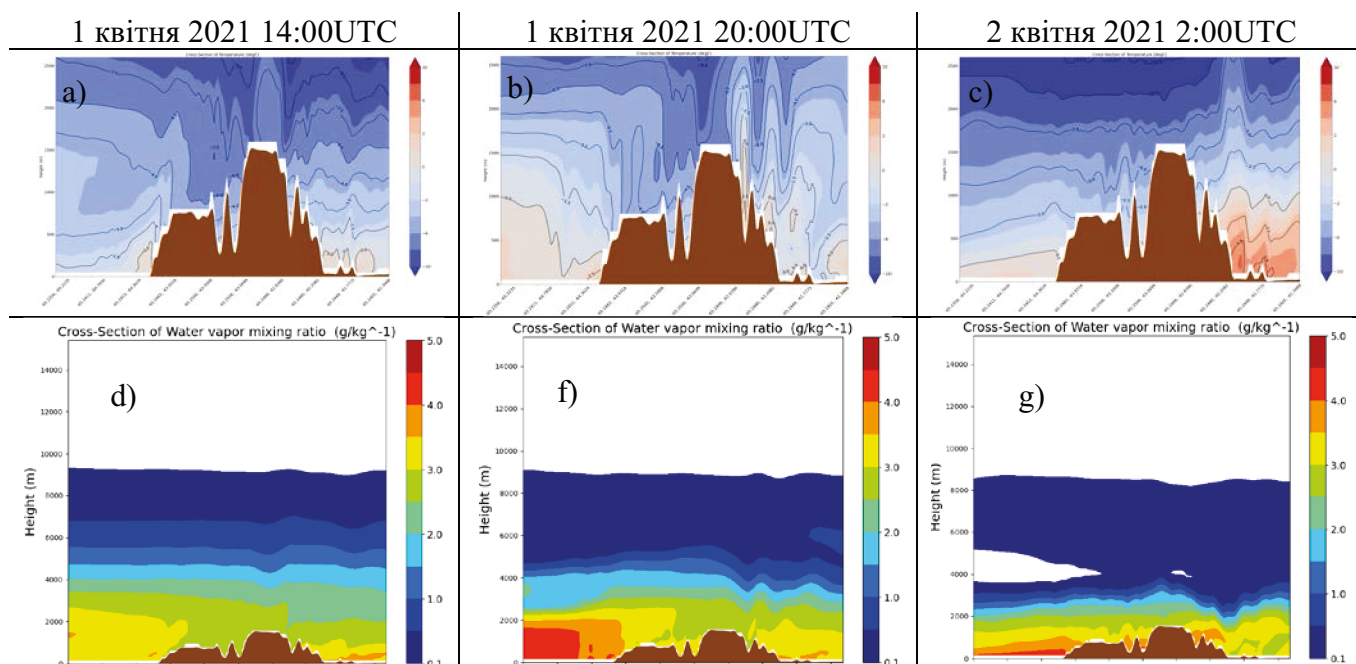


Рисунок 3.27. Вертикальний переріз полів температури до 2 км (а-с) та масової концентрації водяної пари (d-g) за шість годин до (а, d), після (с, g) та під час (b, f) максимальної інтенсивності опадів зі зміною фази

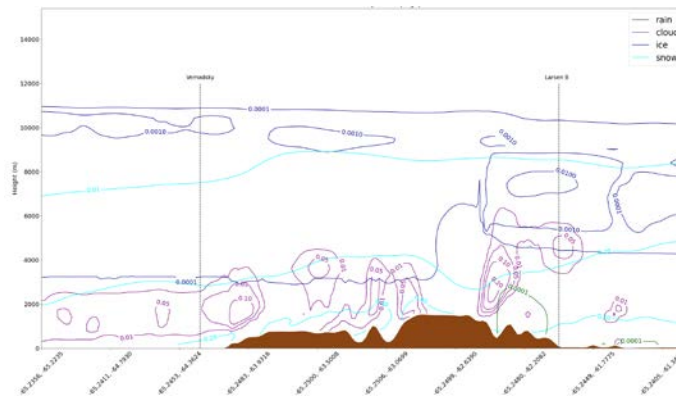
За результатами моделювання Polar WRF у шарі атмосфери до 2,5 км періодично спостерігалось значне потепління впродовж усього періоду, що досліджується (Додаток Б2). Зокрема впродовж 31го березня спостерігалось найбільше за досліджуваний період потепління з підвітряного схилу гір: нульова ізотерма досягала висоти 2,5 км, а максимальні значення у підніжжя гір становили більше  $10^{\circ}\text{C}$ . На висоті між 1 км та 2 км з навітряного боку гір формувалася стійка область з температурами вище  $3^{\circ}\text{C}$ , що зберігалася до 7ї UTC 1 квітня. Температури вище  $0^{\circ}\text{C}$  на висоті до 500 м зберігалися в районі льодовика Ларсен В до 15ї UTC 1го квітня. З навітряного західного боку гір нульова ізотерма короткочасно піднімалася до 900 м впродовж 16ї UTC, але повністю зникла до 22їUTC 31 березня. В районі Тихоокеанського сектору, що розглядається, максимальні температури впродовж 31го березня, не підіймалися вище двох градусів за Цельсієм.

Близько 12ї UTC 31го березня для усього перерізу, що розглядається, можна відмітити потужний шар з льодяними кристалами та снігом на висоті 6-10 км в Тихоокеанському секторі та над півостровом Київ (близько 10/г), 8-10 км над основним високим масивом гір (близько 10/г) та 5-11 км над східним узбережжям Антарктичного півострова та бухтою льодовика Ларсен В (1000/г в середньому з максимумами до 15000/г). Змішані хмари з концентраціями хмарних крапель 0,01-0,5 г/кг, снігу близько 0,01 г/кг та окремими осередками дощу (до 0,02 г/кг при 3,5/г) спостерігаються на висоті 300 м – 3 км для всього перерізу, що розглядається. Над західними схилами гір виявлено малі осередки змішаних хмар на висоті 4-5 км та осередки дощу на висоті до 4 км (Додаток Б3, Б4). До 21ї UTC 31 березня верхній шар хмар поступово зменшується та зникає, нижній шар хмар, переважно рідких, залишається на висоті до 1 км над океаном на захід від Антарктичного півострова та до 3 км над горами Антарктичного півострова. До кінця 31го березня та впродовж першої половини 1го квітня поступово розвивається потужний шар кристалічних хмар з кристалами льоду та снігу, що має нижню межу близько 2,5 км, але на висоті до 1 км зберігається переважання рідких хмар. Починаючи з 4ї UTC сніжні кристали концентрацією від 0,01 г/кг опускаються від 8 км до земної поверхні. Над східними схилами вертикально розвивається змішана хмарність, що має осередки дощових крапель від земної поверхні до 4 км, осередки рідких хмарних крапель від 2 км до 6 км, осередки сніжних кристалів від 2 км до 7 км та кристалів льоду від 6 км до 10 км.

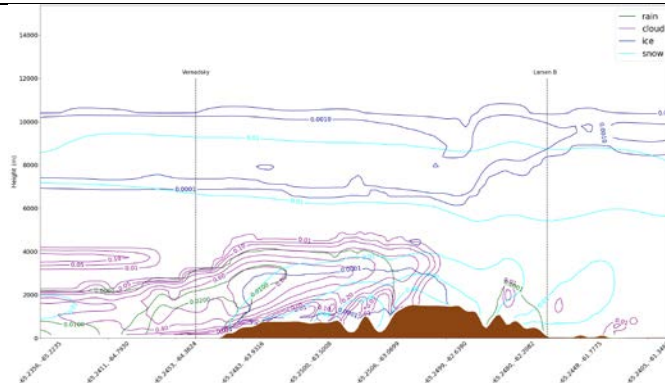
Нульова ізотерма з'являється на перерізах після 13 UTC у західного підніжжя схилів гір півострова, зокрема о 14ї UTC, за 6 годин до максимальної інтенсивності опадів зі змішаною фазою (рис.3.27 а). У цей час з навітряного схилу гір відмічається поступове зростання масового вмісту водяної пари, який на 14ту UTC складав у середньому 3,5 г/кг у шарі до 3 км (рис. 3.27 d). Для цього проміжку часу характерний масовий вміст до 0,2 г/кг сніжних кристалів на висоті від земної поверхні до 7 км, масовий вміст хмарних крапель до 0,05 г/кг до 3 км та масовий вміст 0,001 г/кг

льодяних кристалів від 3х до 10 км при кількісних концентраціях 100/г; формування дощових осередків до 500 м над бухтою льодовика Ларсен В (рис. 3.28 а та 3.29 а).

a)



b)



c)

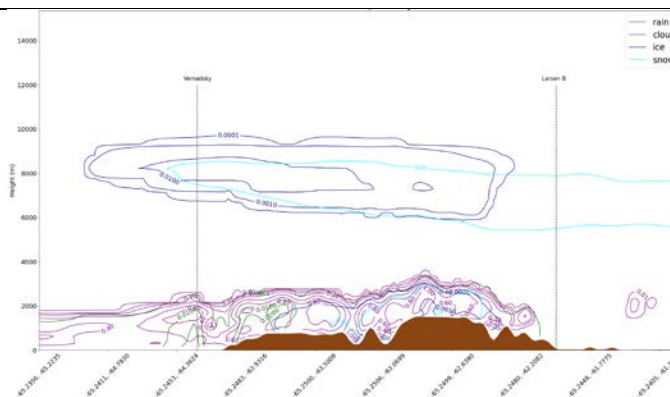


Рисунок 3.28. Масові концентрації льоду, снігу, крапель дощу, хмарних крапель за шість годин до (а), після (б) під час (с) максимальної інтенсивності опадів зі зміною фази

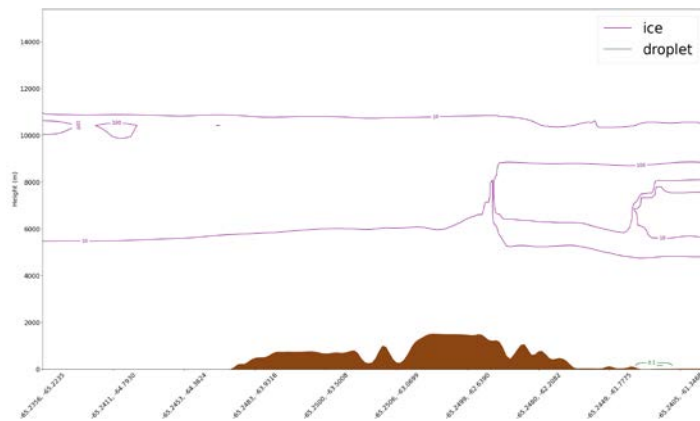
В районі станції «Академік Вернадський» о 14й UTC формуються змішані хмари з вмістом рідких хмарних крапель близько 0,05 г/кг на висоті до 2 км (рис 3.30 g) та масовою концентрацією сніжних кристалів 0,25 г/кг (рис 3.30 a). Вміст сніжних кристалів зменшується до висоти 8 км. Схожий вертикальний розподіл відмічається і для бухти льодовика Ларсен В (рис 3.30 a). Кристали льоду відмічаються на всіх висотах від 3 км до 11 км з масовою концентрацією до 0,001 г/кг над станцією «Академік Вернадський» та до 0,015 г/кг для льодовика Ларсен В при максимальній кількісній концентрації 100/г та 500/г відповідно (рис 3.31 a). Близько 16ї UTC з'являються осередки дощових крапель на захід від півострова на висоті до 300 м. До 20ї UTC, коли спостерігаються максимальні значення інтенсивності опадів, у Тихоокеанському секторі нульова ізотерма піднімається до 1 км (рис. 3.27 b), а масові концентрації водяної пари зростають до 4,5 г/кг в шарі до 2 км (рис. 3.27 f). У цей час на підвітряних схилах гір та в районі моря Уедделла розвиваються осередки з температурами вище 0°C при значеннях масової концентрації водяної пари до 3,5 г/кг.

До 20ї UTC формується два шари хмарності для усього перерізу, що розглядається. Верхній кристалічний шар формується на висоті 7-11 км та складається з кристалів льоду (більше 0,001 г/кг при 100/г) та снігу (рис. 3.27 b та 3.29 b). Нижній шар хмар має масову концентрацію хмарних крапель до 0,8 г/кг та крапель дощу до 0,02 г/кг при кількісних концентраціях до 2/г в районі моря Беллінсгаузена.

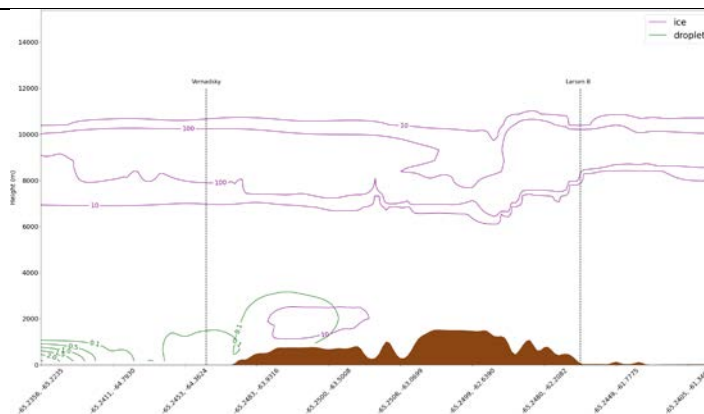
На перерізі з району станції «Академік Вернадський» до бухти льодовика Ларсен В можна виділити декілька шарів хмарності. Верхній шар хмарності над станцією «Академік Вернадський» знаходиться на висоті 6-10 км та складається зі сніжних кристалів (до 0,05 г/кг, рис. 3.30 b) та льодових кристалів (до 0,0025 г/кг, рис. 3.30 h). Над бухтою льодовика Ларсен В масова концентрація сніжних кристалів співставна з концентрацією над станцією «Академік Вернадський» при значеннях масових концентрації льоду 0,006 г/кг рис. 3.30 h. Кількісні концентрації льоду над

станцією «Академік Вернадський» та бухтою Ларсен В становлять 400/г та 500/г відповідно (рис.3.31).

a)



b)



c)

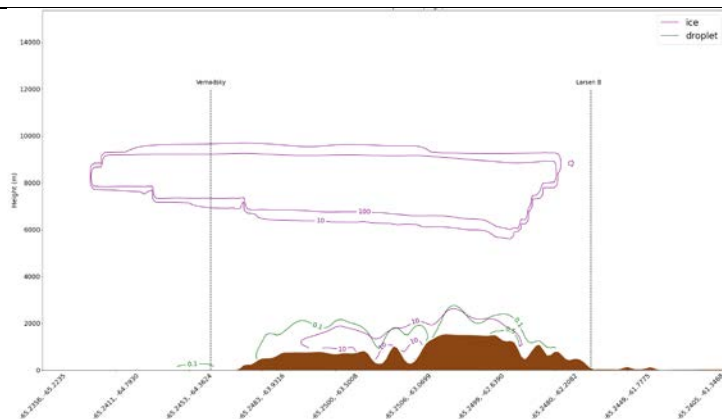


Рисунок 3.29. Кількісні концентрації льоду, снігу, крапель дощу, хмарних крапель за шість годин до (а), після (б) та під час (с) максимальної інтенсивності опадів зі зміною фази на перерізі через Антарктичний півострів



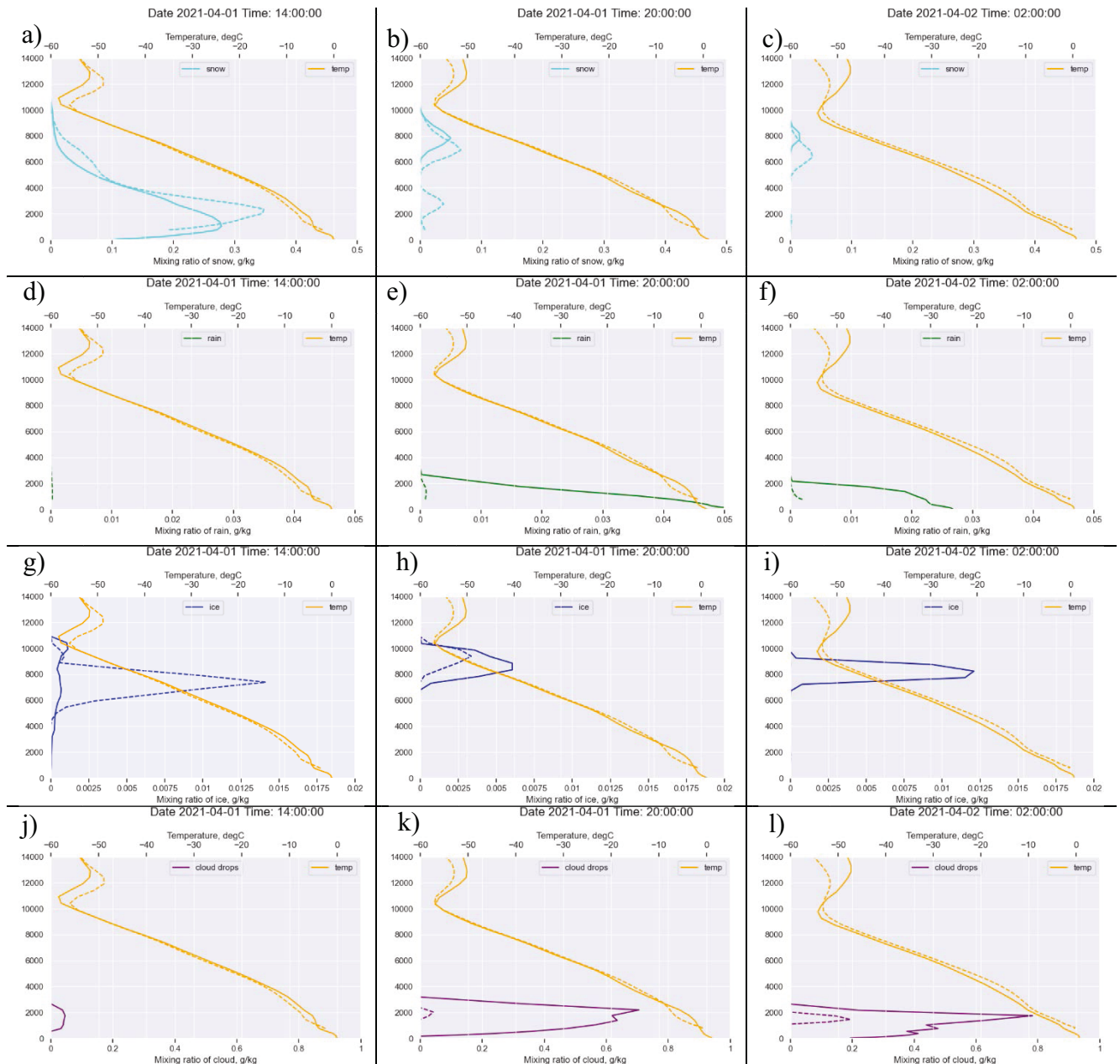


Рисунок 3.30. Масові концентрації снігу (а, б, с), дощу (d, e, f), льоду (g, h, i), хмарних крапель (j, k, l) під час максимальної інтенсивності опадів 20 UTC 1 квітня (b, e, h, k), за 6 годин до (14 UTC 1 квітня: a, d, g, j), та через 6 годин після (2:00 UTC 2 квітня: c, f, i, l). Суцільні лінії – станція «Академік Вернадський», пунктирні лінії – бухта льодовика Ларсен В; температура °С – помаранчеві лінії

Нижній шар хмарності над станцією «Академік Вернадський» близько 20ї UTC має масову концентрацію хмарних крапель до 0,7 г/кг (рис 3.30 k) та масову концентрацію крапель дощу 0,05 г/кг (рис. 3.30 e). У районі бухти льодовика Ларсен В формується змішана хмарність на висоті 2-4 км з максимальними масовими

концентраціями до 0,05 г/кг льодяних кристалів на висоті 3 км (рис. 3.30 b) та хмарних на висоті 2 км (рис. 3.30 k).

Через 6 годин після максимальної інтенсивності опадів нульова ізотерма (рис. 3.27 с) та масові концентрації водяної пари більше 3,5 г/кг (рис. 3.27 g) з боку станції «Академік Вернадський» знижуються до приблизно 300 м. У той час як в районі бухти льодовика Ларсен В при значеннях масової концентрації водяної пари до 3,5 г/кг розвиваються температури вище за  $+5^{\circ}\text{C}$ .

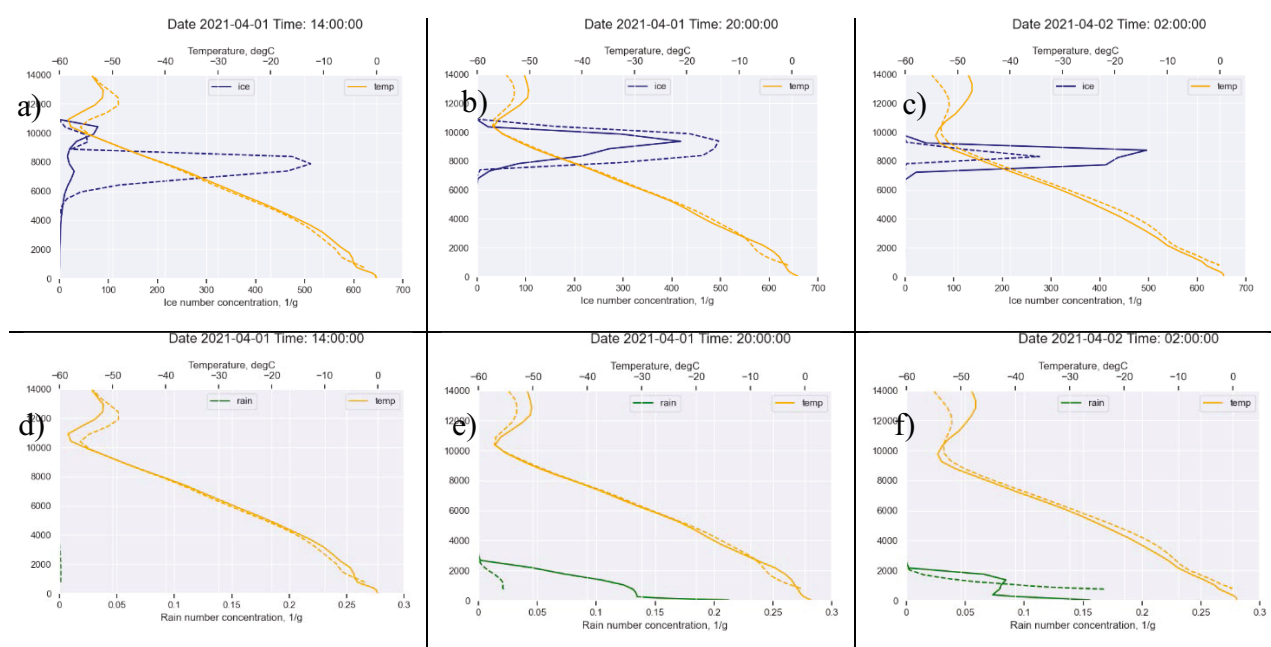


Рисунок 3.31. Кількісні концентрації льоду (а, б, с) та дощу (d, е, f) за 6 годин до (14 UTC 1 квітня: а, d), під час (20 UTC 1 квітня: б, е) та через 6 годин після (2 UTC 2 квітня: с, f) максимальної інтенсивності опадів зі змішаною фазою. Суцільні лінії – станція «Академік Вернадський», пунктирні лінії – бухта льодовика Ларсен В; температура  $^{\circ}\text{C}$  – помаранчеві лінії

Нульова ізотерма повністю зникає після 3ї UTC 2го квітня в районі станції «Академік Вернадський» та після 6ї UTC в районі бухти льодовика Ларсен В (Додаток Б2). Близько 2ї UTC 2го квітня над регіоном Антарктичного півострова зберігається

кристалічна хмарність на висоті 6-10 км з масовими концентраціями від 0,001 г/кг для кристалів льоду і 0,01 (рис 3.28 с) при кількісних концентраціях до 100/г (рис 3.29 с).

Для станції «Академік Вернадський» та бухти льодовика Ларсен В масові концентрації снігу зменшуються, хоча максимуми залишаються на висотах 8 км та 7 км відповідно (рис. 3.30 с), над західними схилами гір зростає концентрація льодяних кристалів – до 0,0125 г/кг (рис 3.30 і). Кількісні концентрації кристалів в районі станції зростають до 500/г, а в районі льодовика Ларсен В знижуються до 300/г (рис. 3.31 с).

У районі станції «Академік Вернадський» через 6 годин після максимальної інтенсивності змішаних опадів на висоті до 3х км спостерігаються лише рідкі хмари. У районі бухти льодовика Ларсен В зростає частка хмарних крапель до 0,2 г/кг при кількісних концентраціях крапель дощу до 0,15/г.

За результатами аналізу мезомасштабних процесів, масових та кількісних мікрофізичних характеристик у районі станції «Академік Вернадський», гір Антарктичного півострова та льодовика Ларсен В, можна стверджувати, що у перехідний сезон випадки інтенсивних опадів зі зміною фази асоціюються з формуванням циклонів з переважаючим західним напрямком вітру, що при перетинанні гірського хребта Антарктичного півострова сприяє розвитку декількох рівнів хмарності із значною горизонтальною та вертикальною протяжністю, для якої характерна переважно рідка чи змішана фаза у шарі до 2-3 км.

### **3.3. Зимові хмари та опади**

Для представлення особливостей зимових інтенсивних опадів, що асоціюються із затоком тепла з нижчих широт, було обрано випадок, який є частиною спеціального періоду спостереження, що проводився в межах ініціативи рік полярного прогнозування в південній півкулі (Year of Polar Prediction in Southern Hemisphere Winter 2022).

Зимовий сезон 2022 року був аномально теплим для всієї західної Антарктики та Антарктичного півострова, коли середня температура регіону у липні становила близько  $-2^{\circ}\text{C}$ , а півстоліття тому середні температури були близько  $-10^{\circ}\text{C}$ . Впродовж зимового сезону 2022 року на станції «Академік Вернадський» рівень снігу досягнув рекордні за останні десять років 350 см. Таке накопичення було наслідком проходження низки циклонів з інтенсивним опадоутворенням впродовж зимового сезону зокрема.

Для аналізу циркуляційних процесів під час цього випадку використовувалися дані приземного тиску з бази реаналізу ERA5 (рис. 3.32), супутникові знімки поля хмарності (рис. 3.33) та опадів (рис. 3.34). Регіональні особливості в районі станції «Академік Вернадський» – півострова Київ – бухти льодовика Ларсен В вивчались за результатами моделювання Polar WRF (рис. 3.35), вимірів автоматичних метеорологічних станцій (рис. 3.36), за даними моделювання для домену з просторовою роздільною здатністю 1 км (рис. 3.37 і 3.38) та радіозондувань на станції «Академік Вернадський» (рис. 3.39, 3.40), які започатковано і налаштовано за участі автора під час 27ї Української антарктичної експедиції.

### **3.3.1 Синоптичні умови**

Інтенсивні тривалі опади спостерігалися в районі Антарктичного півострова впродовж 21-30 серпня 2022 року. За цей час найбільш інтенсивні опади в районі станції «Академік Вернадський», до 8,5 мм/год, спостерігалися 22 та 23 серпня. Впродовж всього періоду, що досліджується, фіксувалися тверді опади у вигляді снігу з короткочасною зміною фази на замерзаючий дощ 21 серпня.

На початок 21 серпня глибокий циклон Н1 з двома центрами 950 гПа та з мінімумом 944 гПа був розташований у морі Амундсена на захід від Антарктичного півострова (рис. 3.32 а). Ізобара 1015 гПа формувала улоговину Н2 між  $45^{\circ}$  і  $40^{\circ}$  пд.ш. і  $90^{\circ}$  і  $100^{\circ}$  зх. д., яка асоціювалася із затоком теплого і насиченого вологою повітря з помірних широт у напрямку до циклону Н1 (рис. 3.33 а, 3.34 а).

Зона високого тиску В1 знаходилася в районі півдня Південної Америки. Тиск в районі Антарктичного півострова варіювався від 1005 гПа на півночі до 990 гПа на півдні півострова (рис 3.32 d). До кінця 21го серпня два центри циклону Н1 об'єдналися та поглибилися до 940 гПа (рис 3.32 g, j). На початок 22го серпня ізобари 970 гПа і 980 гПа знаходилися над узбережжям та горами Антарктичного півострова відповідно (рис. 3.32 b).

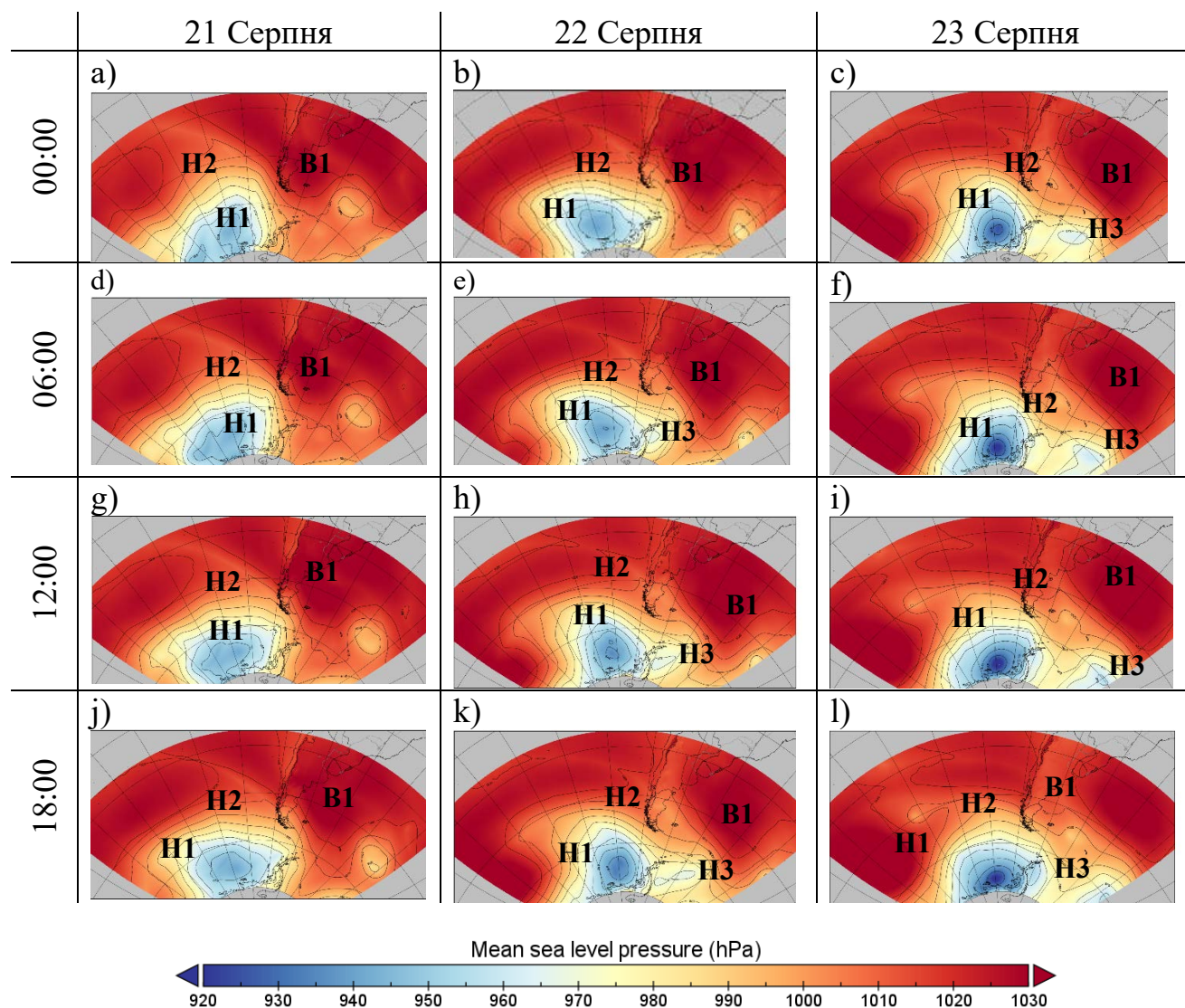


Рисунок 3.32. Значення приземного атмосферного тиску на рівні моря за базу даних реаналізу ERA5 за 21 -23 серпня 2022 року

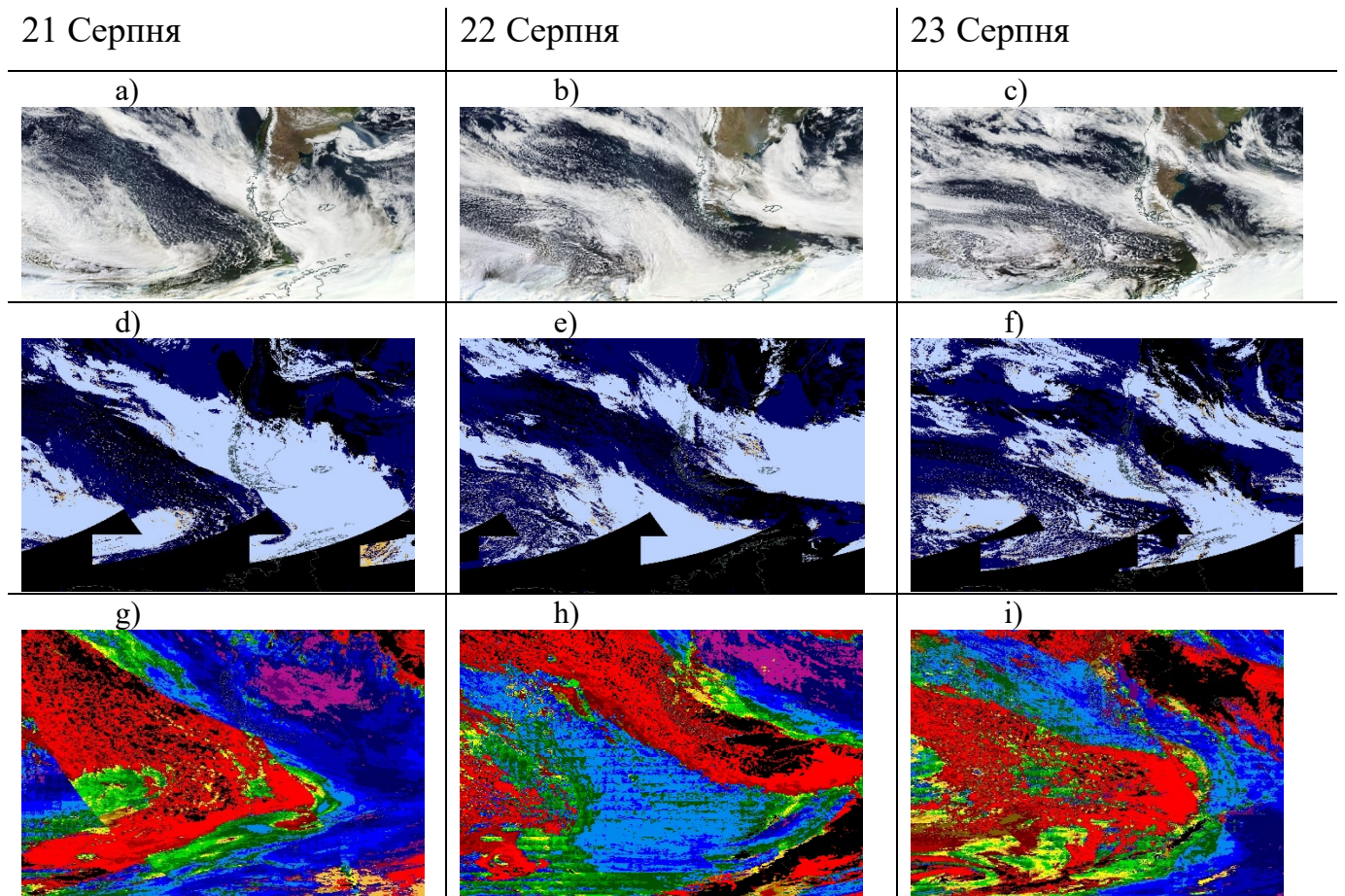


Рисунок 3.33. Супутникові знімки за даними Aqua / MODIS: a-b скориговане відображення, справжній колір; d-f оптичні властивості фази хмар (темно синій – водні хмари, світло синій – льодяні хмари, жовтий – невизначено); g- i висота верхньої межі хмарності (червоний – до 800 м, темно червоний 800-3150 м, жовтий до 5600 м, зелений - до 8000 м, синій – до 10400 м, фіолетовий близько 12000 м, темно фіолетовий вище 12км)

NASA Worldview application (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), part of the NASA Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)

Улоговина НЗ впродовж 21го та 22го серпня зміщувалася на південний схід та стала менш вираженою при проходженні через південь Південної Америки. Такий розподіл баричного поля супроводжувався розвитком смуги потужної хмарності, протяжністю близько 5000 км та завширшки від 700 до 1200 км (рис. 3.33 a, d), що мав верхню кристалічну границю на висоті до 10 км (рис. 3.33 d, g). У цей час

відмічаюлися інтенсивні опади біля південного узбережжя Чилі та порівняно невеликі осередки на південному заході від Антарктичного півострова (рис. 3.34 d). Біля західного узбережжя Антарктичного півострова хмарність сягала 8 км, над горами – до 10 км (рис. 3.33 g).

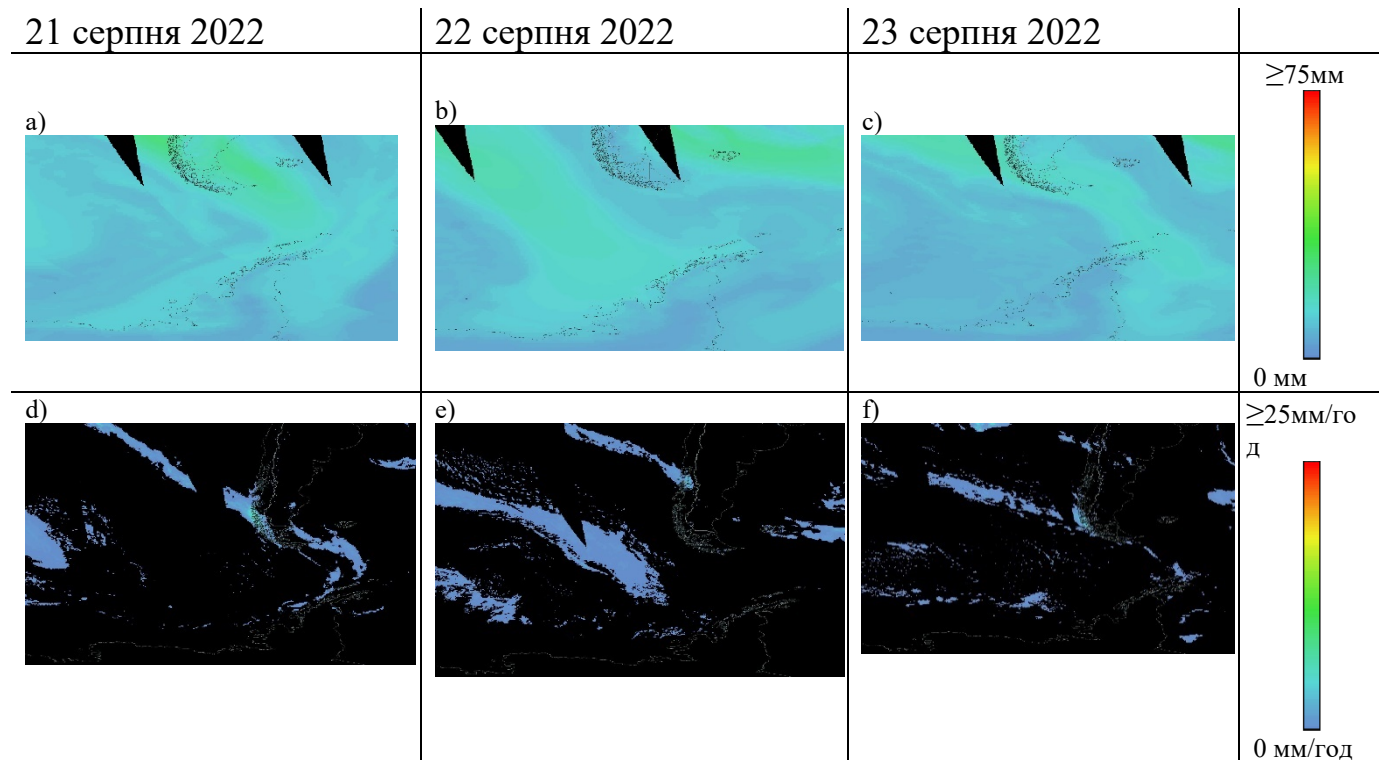


Рисунок 3.34. Супутникові знімки за даними GCOM-W1/AMSR2: a-b вміст водяної пари в стопі атомсфери; d-f інтенсивність опадів

NASA Worldview application (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), part of the NASA Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)

До 06 UTC 22го серпня ізобара 970 гПа, що асоціюється з циклоном Н1, проходила північніше острову Аделаїда через гори Антарктичного півострова та утворювала улоговину у районі льодовика Ларсен С (рис. 3.32 e). Це супроводжувалося затоком вологи з помірних широт Тихого океану до Антарктичного півострова майже перпендикулярно (рис. 3.34 b) та широкою смугою, до 1000 км біля узбережжя Антарктичного півострова, хмарністю з верхньою межею

до 10 км (рис. 3.33 е, h). Вже о 12 UTC над льодовиком Ларсен С сформувався новий центр НЗ з тиском 970 гПа, що могло бути наслідком впливу орографії Антарктичного півострова на переміщення циклону Н1 (рис 3.32 h). Впродовж 22го серпня центр Н1 поглибився, досягаючи тиску 925 гПа, центр НЗ змістився на південь моря Уедделла та сформував окремий циклон (рис. 3.32 f, i, l).

За супутниковими даними 22го квітня не були зафіксовані опади в районі Антарктичного півострова (рис. 3.34 е), які відображені за даними вимірів на станції «Академік Вернадський».

Впродовж 23го серпня Антарктичний півострів знаходився у східному секторі циклону Н1 (рис. 3.32 с, f, i), що утворив заток насиченого водяною парою повітря до півночі півострова (рис. 3.33 с). Біля західного узбережжя Антарктичного півострова утворювалися переважно низькі хмари з верхньою межею крапельних хмар до 800 м, над горами спостерігалися хмари з кристалічним фазовим складом верхньої межі до 8 км (рис. 3.33 с, f, i). Такий розподіл сприяв утворенню опадів на навітряному західному узбережжі Антарктичного півострова (рис. 3.34 с, f), що узгоджується з даними вимірів (рис. 3.36).

Після 18 UTC 23го серпня циклон Н1 досягнув свого мінімуму у 918 гПа за період, що вивчається. Переважна частина Антарктичного півострова продовжувала знаходитися в східній частині циклону Н1 (рис 3.32 l). Значення тиску в цьому районі змінювалося від 970 гПа на півночі півострова біля острова Кінг Джордж до 940 гПа в районі острова Олександра I, через станцію «Академік Вернадський» проходила ізобара 960 гПа. Зона високого тиску змістилася з півдня Південної Америки убік 40°-30° пд.ш. Атлантичного океану (рис. 3.32 k, с).

### **3.3.2. Мезомасштабні характеристики**

На рис. 3.35 представлені значення напрямку та швидкості поля вітру та значення висоти геопотенціалу на висоті 500 гПа за даними моделювання Polar WRF. На картах з 18 UTC 21 серпня до кінця 22го серпня чітко виділяються два атмосферних



потоки: той, що відповідає затоку вологи і асоціюється з атмосферною рікою (Н2), та той, що асоціюється з проходженням теплого фронту циклону Н1 (рис. 3.32).

Атмосферна ріка, пов'язана з улоговиною Н2 з максимальними швидкостями на ізобаричній поверхні 500 гПа до 60 м/с (рис.3.35), проходить північніше Антарктичного півострова та не впливає на формування опадів в регіоні безпосередньо (рис 3.34 а, d), що збігається з супутниковими даними, наведеними у пункті 3.3.1. Хоча час її максимального наближення до Антарктичного півострова впродовж 21го серпня асоціюється зі зростанням температури на станції «Академік Вернадський» до  $+2,8^{\circ}\text{C}$  (рис 3.36).

Починаючи з середини 21го серпня вплив теплого фронту ставав панівним для Антарктичного півострова, горизонтальні швидкості вітру зросли до 30 м/с. На південному заході досліджуваного домену починає простежуватися різка зміна напрямку вітру, пов'язана з наближенням циклону Н1 до Антарктичного півострова (рис.3.35). З навітряного боку гір розвивається потужний шар хмарності до 8 км (рис.3.37), який ділиться на декілька частин під впливом висхідних потоків над східною частиною гір Антарктичного півострова.

На картах за 06:00 UTC 22го серпня простежується початок формування центру Н3 в районі льодовика Ларсен С та широтне переміщення зони поля вітру, що пов'язана з проходженням теплого фронту (рис. 3.35). Це супроводжується діагональним розподілом швидкостей горизонтальної компоненти вітру над горами Антарктичного півострова (рис. 3.38 а), хмарністю до 2 км (рис. 3.38 с), значеннями вертикальної компоненти вітру до 2 м/с (рис. 3.38 b) та додатними температурами безпосередньо над бухтою льодовика Ларсен В.

Переважаючи швидкості вітру на захід від Антарктичного півострова впродовж 22го серпня становили до 30 м/с, а на схід до 10-20м/с. До середини 22го серпня зазначене поле вітру досягає півночі Антарктичного півострова (рис. 3.35), що

збігається з часом початку твердих опадів в районі станції «Академік Вернадський» за даними вимірів (рис. 3.36).

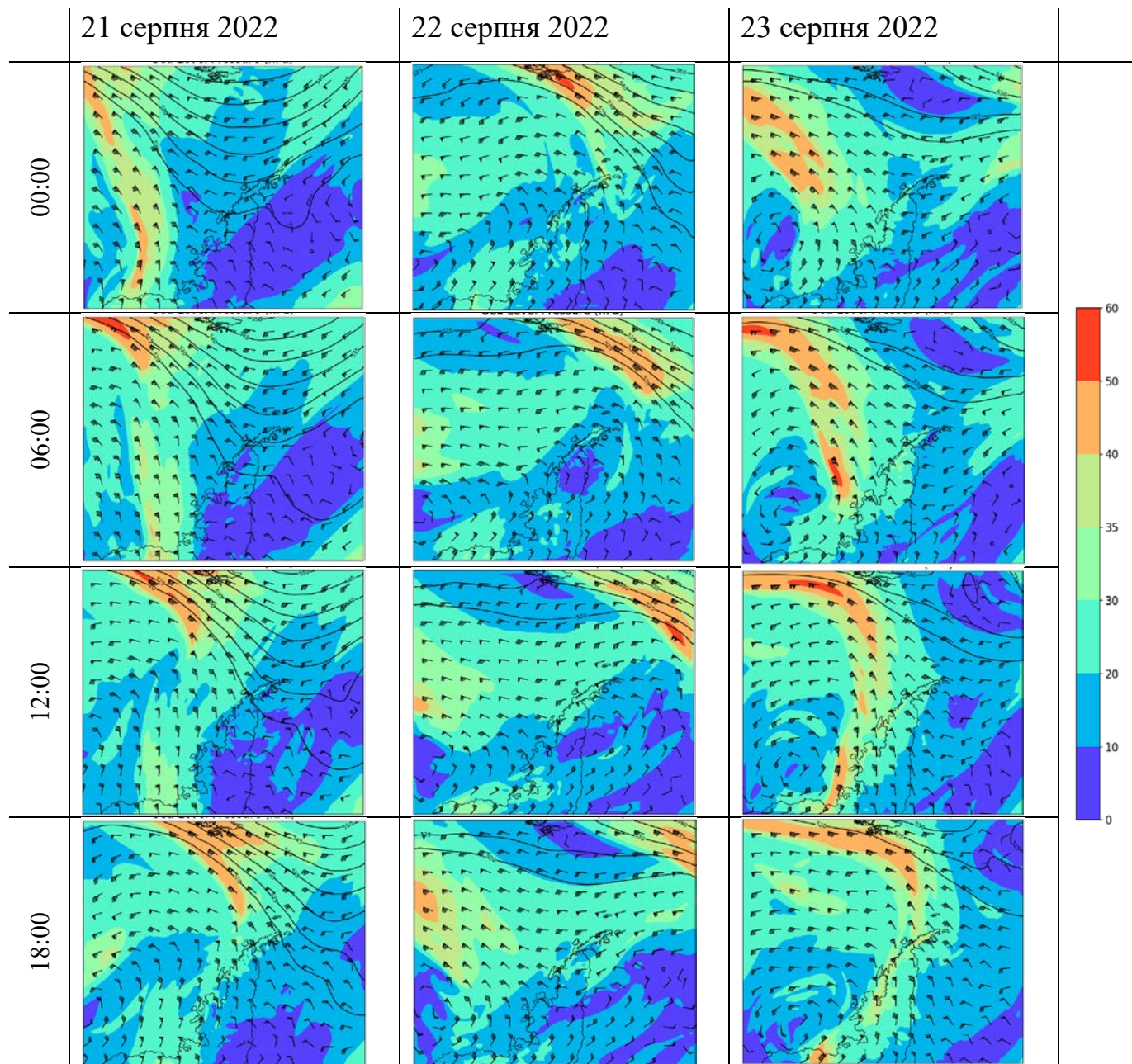


Рисунок 3.35 За даними Polar WRF висота геопотенціалу, напрям та швидкість вітру на ізобаричній поверхні 500 гПа

На початок 23 серпня в результатах моделювання на рис. 3.35 чітко можна виокремити центр циклону Н1 та ядро максимальних швидкостей, що асоціюються з

адвекцією тепла. Максимальні значення швидкості вітру складають до 60 м/с на північ від острова Олександра I о 6 UTC.

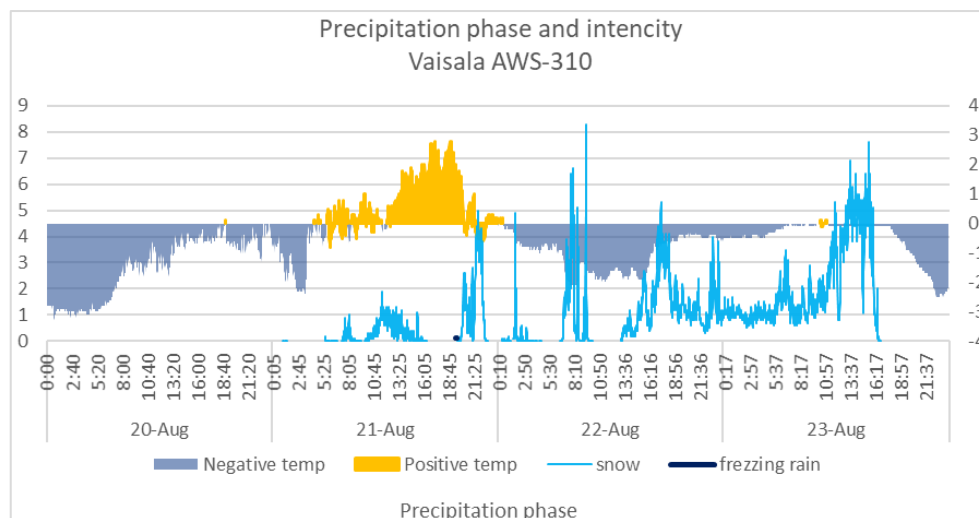


Рисунок 3.36 Температура повітря (помаранчевий – вище 0°C, сірий – нижче 0°C) та інтенсивність опадів (червоний- мряка, зелений -дощ, синій – сніг, рожевий – змішані опади, темно синій – змішані опади) за даними вимірів автоматичної станції Vaisala AWS-310 на станції «Академік Вернадський»

Для Антарктичного півострова максимальні середні швидкості вітру, пов'язані з проходженням центру Н1, становили близько 40 м/с. Впродовж 23го серпня з навітряного боку гір в районі станції «Академік Вернадський» розвивалася хмарність до 6 км та зростали значення горизонтальної компоненти швидкості вітру на висоті 7-10 км до 50 м/с (рис.3.37), що узгоджується з даними вимірів радіозондування на висоті близько 500 гПа (рис 3.40). В районі льодовика Ларсен В з підвітряної сторони температура досягала додатних значень в прошарку вище 1 км (рис 3.38 12 UTC d).

Максимальні швидкості за даними радіозондування в районі станції «Академік Вернадський» спостерігалися 23 серпня о 18 UTC в шарі 300 гПа-270 гПа і досягали 58 м/с, на висоті 500 гПа вони становили 32 м/с (рис. 3.40).

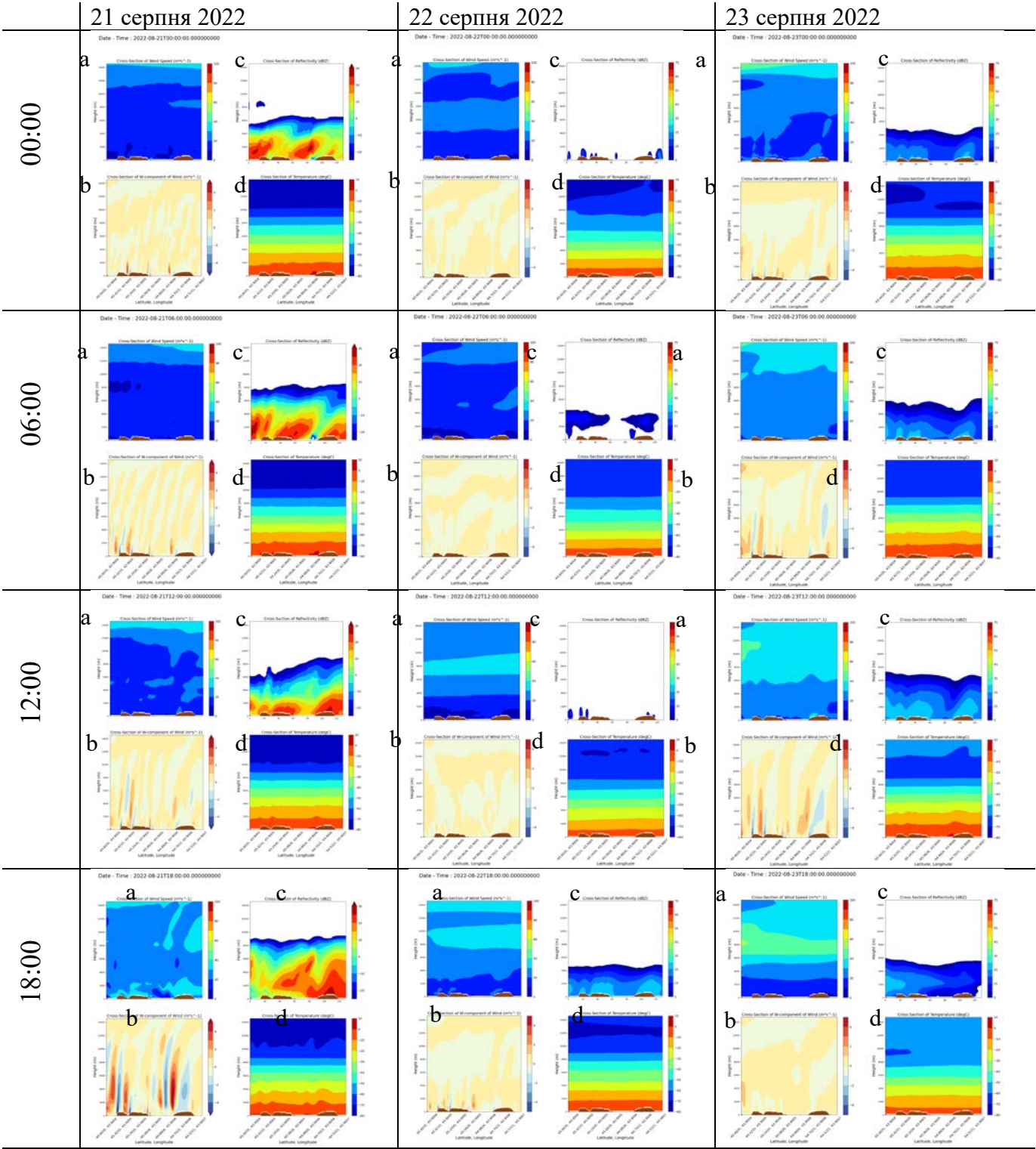


Рисунок 3.37. Вертикальні профілі за даними Polar WRF перпендикулярні до основного потоку: а – горизонтальна компонента вітру (м/с), б – вертикальна компонента вітру (м/с), с – розрахункова відбивна здатність (dBZ, еквівалент наявності хмар), d – температура повітря (°C)

Впродовж досліджуваного періоду зростання температури становило від  $-2,1^{\circ}\text{C}$  о 7-8 UTC 22го серпня до  $+0,1^{\circ}\text{C}$  о 10 UTC 23го серпня за даними вимірів станції «Академік Вернадський». До кінця 23го серпня приземна температура повітря знову знижувалася до  $-2,6^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.36). Варто відмітити, що зростання температури пов'язане з проходженням атмосферної ріки і меридіональним затоком тепла з півночі значніше, ніж зростання температури, що пов'язано з теплим фронтом циклону Н1 з південного заходу, який супроводжувався зональною адвекцією тепла.

Результати моделювання не відображають додатні температури 21го серпня для станції «Академік Вернадський», що видно з перерізу, який проходить через гори Антарктичного півострова і станцію (рис. 3.38) та порівняльних графіків вертикального розподілу температури за даними моделі та радіозондування (рис. 3.39). Хоча для навітряної частини узбережжя Антарктичного півострова отримано додатні температури біля острова Анверс на картах за 21ше серпня (рис. 3.37). На рис. 3.37 та рис. 3.38 можна простежити потепління верхньої тропосфери вище 7 км від  $-70\dots-80^{\circ}\text{C}$  21го серпня до  $-50\dots-60^{\circ}\text{C}$  23 серпня. Але з рис. 3.39 видно, що Polar WRF суттєво завищує значення температури на цих висотах, у той час як за даними радіозондування температура знижується до  $-80^{\circ}\text{C}$  до висоти 200 гПа.

Оброблені результати радіозондування, що виконувались на станції «Академік Вернадський», у вигляді аерологічних діаграм у косокутній системі координат представлені на рис. 3.40. За отриманими профілями було проаналізовано характер вертикального розподілу температури та визначено атмосферний тиск, температуру повітря та висоту рівня конденсації, який відповідає нижній межі хмар (табл. 3.3).

Радіозондування 1-4 (табл.3.3) виконувались 20-22 серпня за відсутності опадів чи з опадами інтенсивністю до 1 мм/год. За цих умов рівень конденсації знаходився між 500 м та 600 м, за винятком першого зондування 20 серпня о 12 UTC, коли він знаходився на висоті 1,1 км. 23го серпня о 00 UTC під час опадів з інтенсивністю до 4 мм/год рівень конденсації становив близько 360 м.

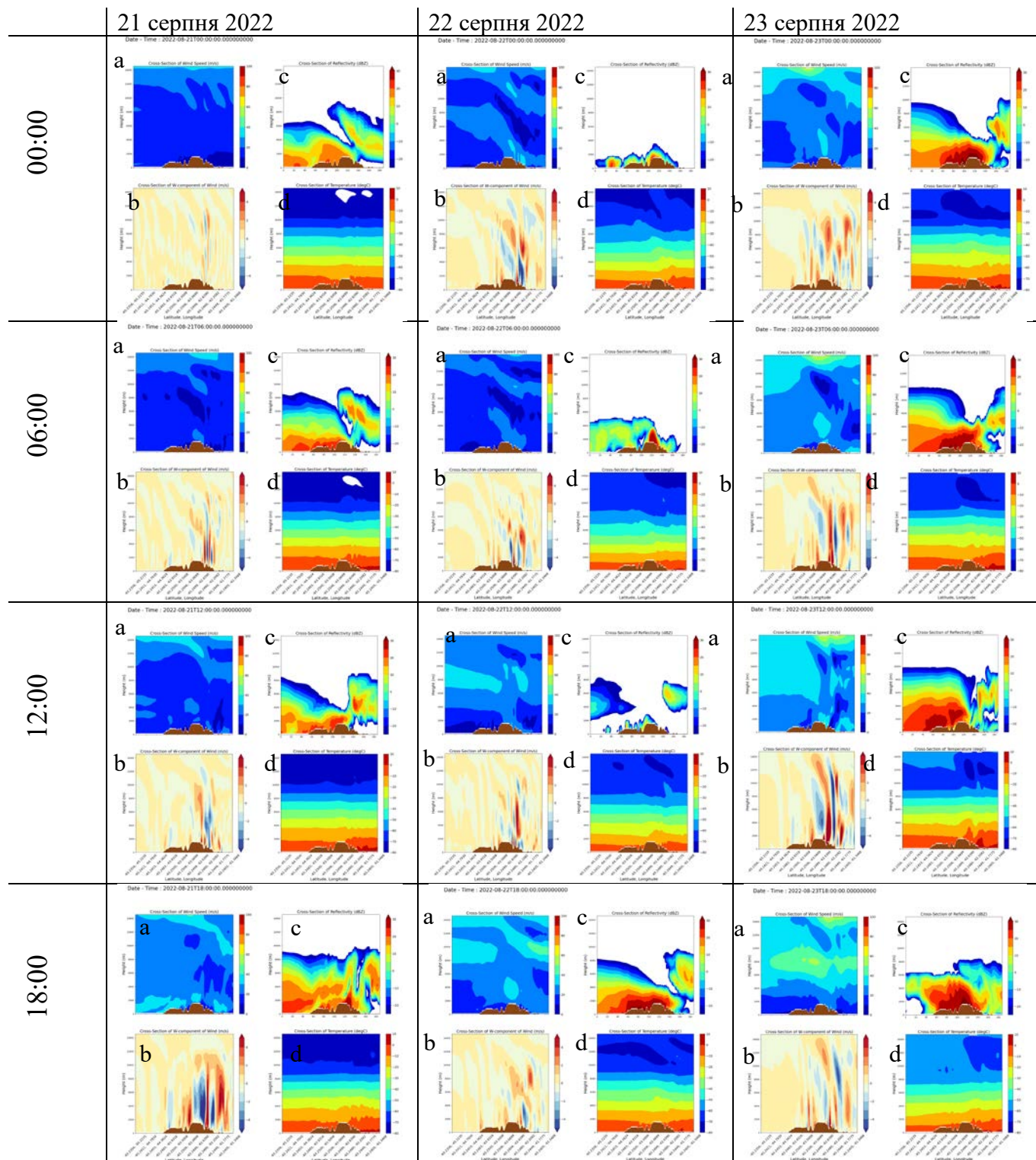


Рисунок 3.38. Вертикальний профіль за даними Polar WRF паралельний до основного потоку: а – горизонтальна компонента вітру (м/с), б – вертикальна компонента вітру (м/с), с – розрахункова відбивна здатність (dBZ, еквівалент наявності хмар), d – температура (°C)

Таблиця 3.3

Характеристики рівня конденсації за даними радіозондування на станції «Академік Вернадський» за період 20 – 24 серпня 2022 року

№	Дата, час	Тиск на рівні конденсації, гПа	Температура на рівні конденсації, °С	Висота, км	CAPE Дж/кг
1	20.08 12 UTC	887,1	-8,8	1,1	-
2	21.08 00 UTC	935,4	-6,06	0,6	-
3	21.08 12 UTC	954,4	-2,1	0,5	-
4	22.08 12 UTC	949,5	-4,11	0,54	-
5	23.08 00 UTC	969,7	-0,52	0,36	-
6	23.08 18 UTC	938,8	-2,3	0,63	181,79
7	24.08 00 UTC	932,4	-4,09	0,69	65,87

Оскільки впродовж 23го серпня погодні умови були небезпечними для проведення радіозондування, що підтверджується даними вимірів (рис. 3.36), радіозондування продовжилось о 18 UTC та 24го серпня о 00 UTC, коли опади закінчилися, але з'явилися умови для розвитку конвективних рухів.

Енергія нестійкості (CAPE, Конвективна доступна потенційна енергія) під кінець 23 серпня становила о 18 UTC 181,79 Дж/кг. За формулою (Stull, R., 2017), максимальна можлива (формула 3.1) та найімовірніша максимальна швидкість (формула 3.2) висхідного потоку повітря становила 19 м/с та 9,5 м/с. 24го серпня о 00 UTC значення CAPE знизилосся до 65,8 Дж/кг і відповідні максимальні швидкості висхідного потоку повітря становили 11,4 м/с та 5,7 м/с:

$$w_{\max} = \sqrt{2 \cdot CAPE} , \quad (3.1)$$

$$w_{\max \text{ likely}} \approx w_{\max} / 2 \quad (3.2),$$

де  $w_{\max}$  максимально можлива швидкість висхідного потоку,  $CAPE$  енергія нестійкості,  $w_{\max \text{ likely}}$  найбільш вірогідні максимальна швидкість висхідного потоку.

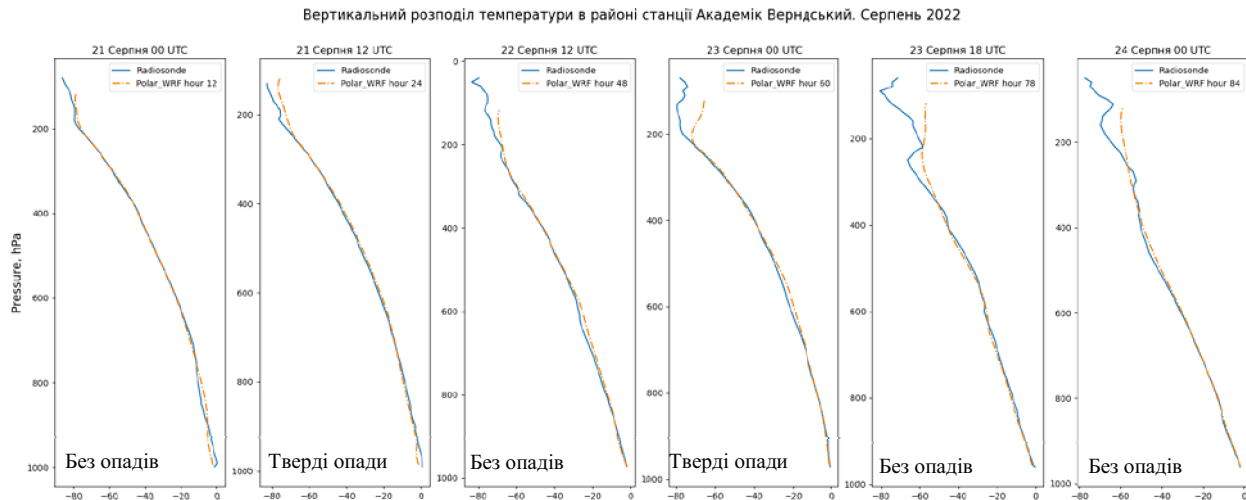


Рисунок 3.39. Вертикальний розподіл температури ( $^{\circ}\text{C}$ ) за даними моделювання Polar WRF та радіозондування на станції «Академік Вернадський»

З аерологічних діаграм, наведених на рис. 3.40, можна простежити динаміку стану атмосфери до 15 км. 20го серпня повітря над станцією «Академік Вернадський» було переважно ненасичене вологою за винятком шару від 950 гПа до 850 hPa. З 21го 00 UTC по 23те 18 UTC атмосферне повітря в районі станції є насиченим. За даними радіозондування можна виділити ненасичений шар повітря 22го серпня о 12 UTC на висоті приблизно 850 гПа-600 гПа, що відповідає висоті близько 3-4 км. Варто відміти, що це узгоджується з даними моделювання про наявність хмар за відповідний період (рис 3.38 с).

Переважаючий напрям вітру в районі станції «Академік Вернадський» західний, північно-західний та південно-західний. 20-21 серпня можна виділити північно-східний напрям вітру у шарі до 750 гПа. Загалом Polar WRF досить добре передає розподіл температури до висоти близько 300 гПа для всього періоду, що досліджується (рис 3.39). Можна відзначити заниження температури повітря у результатах моделювання порівняно з радіозондуванням на 1-2 градуси у приземному шарі до 900 гПа на 12й і 24й годині розрахунку. Також завищення температури на ті самі 1-2 градуси у середній тропосфері на різних висотах. Суттєво різняться значення



результатів моделювання та вимірів вище 300 гПа в тропопаузі, де відбувається значна інверсія температури (рис.3.39).

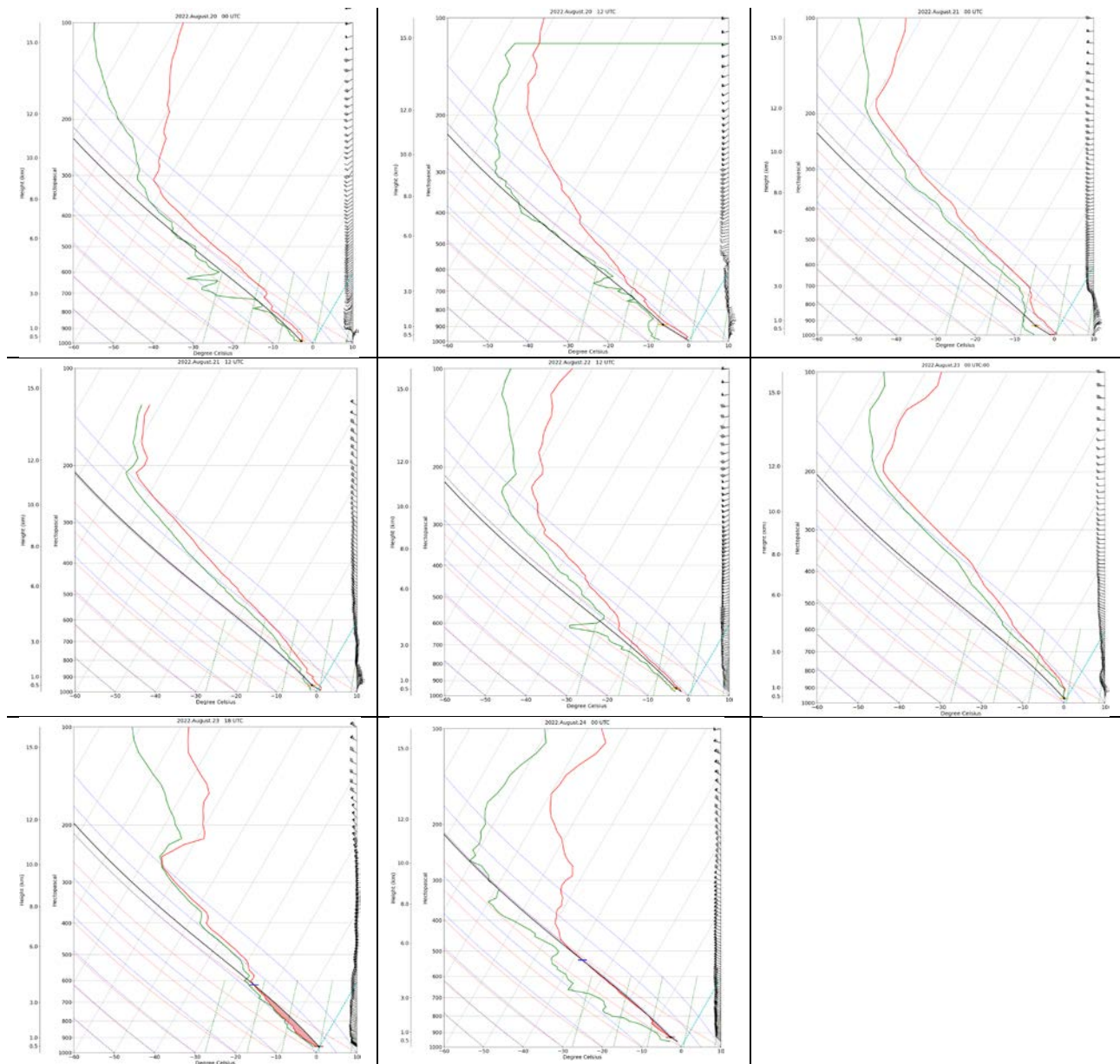


Рисунок 3.40. Аерологічні діаграми у косокутній системі координат за 20-24 серпня 2022. Червона лінія – температура, зелена лінія – температура точки роси, чорна лінія – крива стану, синя позначка – рівень рівноваги, червона позначка – рівень вільної конвекції, чорна точка – рівень конденсації, заштриховане червоним -позитивна енергія нестійкості

### 3.3.3. Мікрофізичні характеристики

Термодинамічні та мікрофізичні характеристики атмосфери було досліджено за результатами моделювання Polar WRF для періоду 21-23 серпня та окремо для моменту інтенсивних опадів 22 серпня з 7:00 до 9:30 UTC (рис 3.41, 3.42). Концентрації кристалів та крапель показано на рис. 3.43 – 3.45, де можна виокремити максимальні в районі станції «Академік Вернадський» на перерізі через Антарктичні гори та бухту льодовика Ларсен В. Розглянуто розподіл масових та кількісних концентрацій кристалів та рідких крапель за 6 годин до, під час та через 6 годин після максимальної інтенсивності опадів (рис. 3.46, 3.47). Додатково було проаналізовано вертикальні розподіли вказаних характеристик над станцією «Академік Вернадський» та бухтою льодовика Ларсен В (рис.3.48, 3.49). Також для регіону Антарктичного півострова було виконано 3D візуалізація результатів моделювання розподілу кристалів та крапель для моменту настання максимальної інтенсивності опадів (рис.3.50).

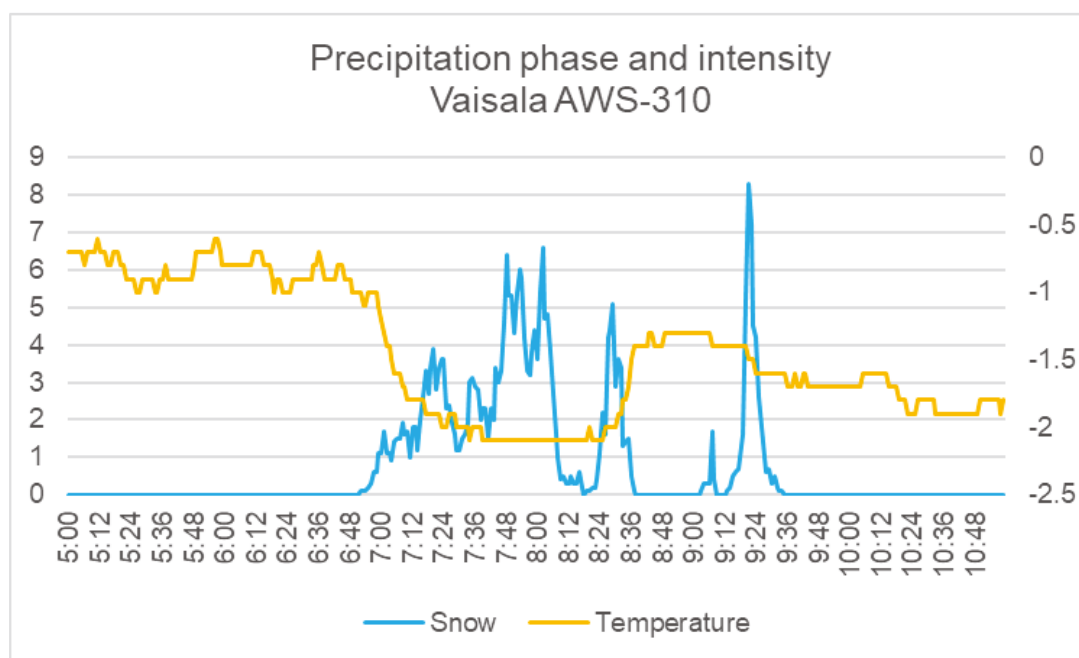


Рисунок 3.41 Приземна температура повітря, фаза та інтенсивність опадів за даними Vaisala AWS 310 22го серпня 2022 року

Впродовж досліджуваного періоду 21-23 серпня розподіл температури в приземному шарі до 2,5 км був неоднаковим для західних і східних схилів Антарктичних гір (Додаток В1). В районі західного узбережжя на висоті до 500 м зберігалася від'ємна температура до  $-3^{\circ}\text{C}$ , за винятком декількох годин 21го серпня в період 16-18 UTC, коли температура піднялась вище  $+2^{\circ}\text{C}$ , що підтверджують виміри на станції «Академік Вернадський» (рис.3.36). В результатах моделювання Polar WRF відображається таке короткочасне потепління, але з дещо нижчими значеннями до  $0^{\circ}\text{C}$ . Для підвітряних схилів східного узбережжя характерна переважно додатна температура до  $+3^{\circ}\text{C}$  на висоті до 1 км та приземні інверсії зі зростанням температур від  $-7^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$  на початку 21го серпня (Додаток В1).

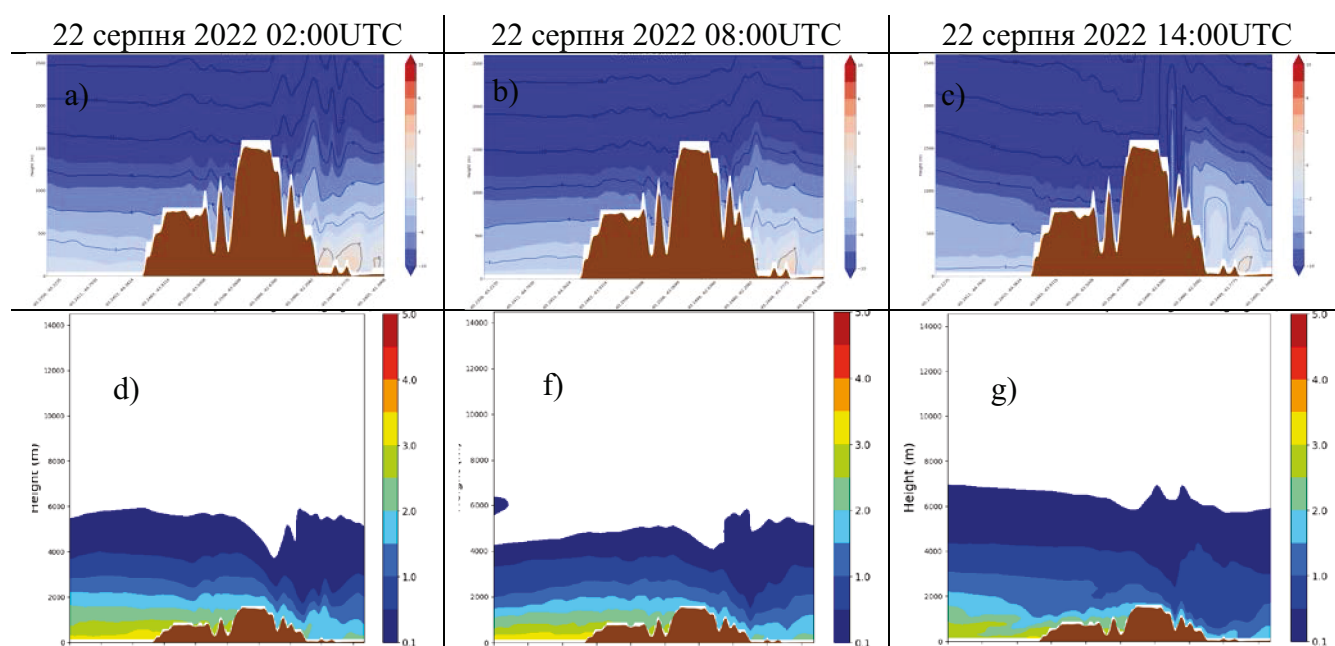


Рисунок 3.42. Результати моделювання Polar WRF: вертикальний розподіл температури повітря до 2 км (a-c) та масова концентрація водяної пари (d-g) за шість годин до (a,d), після (c,g) та під час (b,f) максимальної інтенсивності опадів зі зміною фази на станції «Академік Вернадський» за даними спостереження

Під час, до та після опадів з 7 UTC 22 серпня в районі станції «Академік Вернадський» (рис.3.41) характерні від'ємні температури  $-3^{\circ}\text{C}$  в шарі до 500м; в

районі льодовика Ларсен В – осередки з додатною температурою в шарі до 300 м (рис. 3.42 a, b, c). Немає різких перепадів вмісту вологості, аналогічних до показаних на рис 3.27, впродовж 21го серпня та на початку 22го серпня (рис.3.42 d), зокрема під час опадів (рис.3.42 f) масові концентрації змінюються від 2,5 до 3,5 г/кг з навітряного схилу гір та 1-2 г/кг з підвітряного схилу гір. За шість годин після максимальної інтенсивності опадів (14 UTC) вологість з обох сторін півострова дещо нижча (рис.3.42 g).

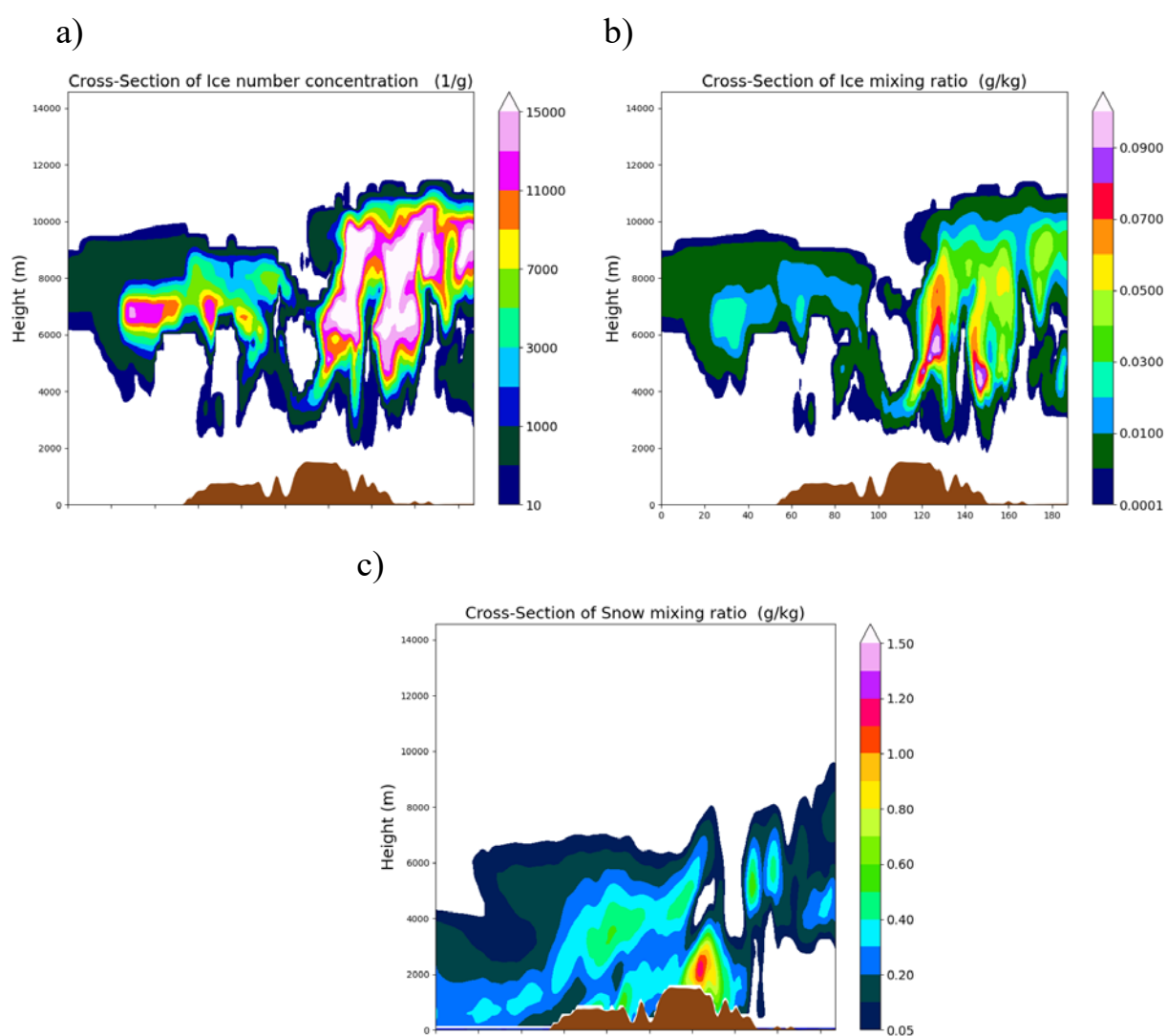
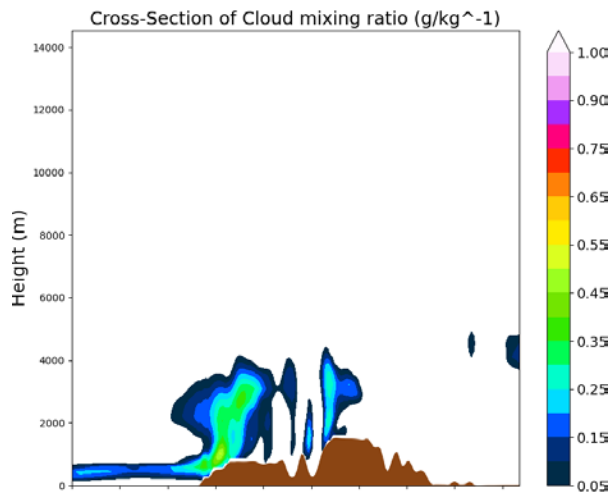
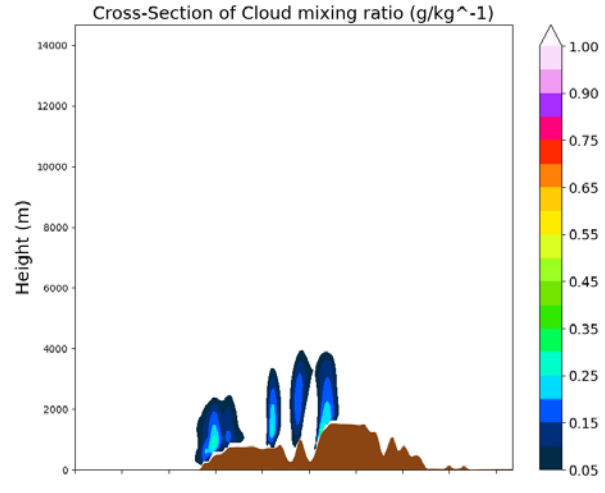


Рисунок 3.43 Кількісні концентрації льоду (a) та масові концентрації льоду (b) та снігу (c) 19:00 UTC 21 серпня 2022 року за даними Polar WRF

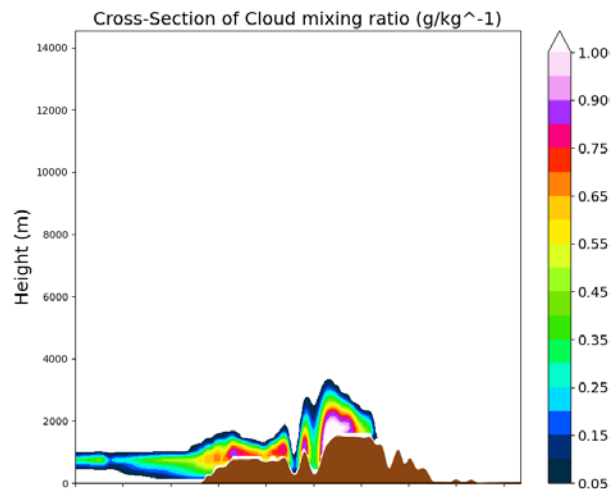
a) 21:40 UTC 21 серпня



b) 22:30 UTC 22 серпня



c) 23:20 UTC 21 серпня



c) 10:00 UTC 22 серпня

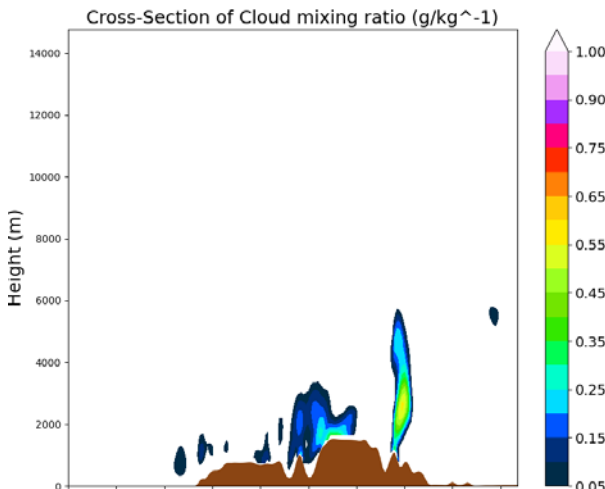


Рисунок 3.44 Масові концентрації хмарних крапель впродовж 21-23 серпня 2022 року за результатами Polar WRF

За даними моделювання Polar WRF за досліджуваний період для перерізу через антарктичні гори, що розглядається, максимальні значення масових та кількісних концентрацій льоду досягаються 21 квітня о 19:00 UTC і складають відповідно більше 0,05-1 г/кг і 15000/г у шарі від 3 км до 10 км над основним масивом антарктичних гір та східним узбережжям (рис. 3.43 а, б). У цей час для західного узбережжя Антарктичного півострова максимальні концентрації кристалів льоду становлять 0,03 г/кг при 11000/г на висоті близько 7 км та 0,01 г/кг при 1000/г у шарі 4 км – 9 км.

Значення масових концентрацій кристалів снігу в цей час становлять до 0,4 г/кг у шарі до 2 км над океаном в районі станції Академік Вернадський, до 0,6 г/кг у шарі до 5 км над горами Антарктичного півострова та до 1,2 г/кг на висоті 2 км над східним схилом гір Антарктичного півострова, а у приземному шарі над бухтою льодовика Ларсен В сніг відсутній чи його масові концентрації незначні (рис. 3.43с).

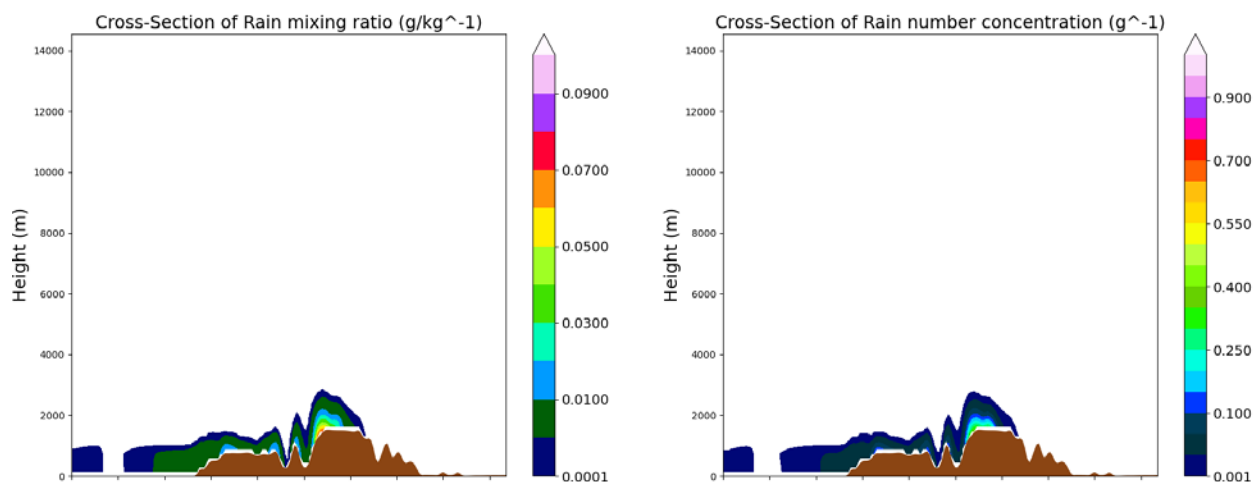


Рисунок 3.45 Масові (а) та кількісні (б) концентрації крапель дощу 21 серпня 2022 року 23:00 UTC

Впродовж періоду, що досліджується, майже відсутні краплі дощу, що очікувано для зимового сезону. Максимальні значення масових концентрацій хмарних крапель та крапель дощу досягаються 21го серпня о 21-23 UTC (рис. 3.43 а, б та рис. 3.44). Відповідно максимальні значення концентрації хмарних крапель становлять більше 1 г/кг над схилами Антарктичних гір у шарі до 2 км (рис. 3.44 с) о 23 UTC 21 серпня, що супроводжується максимальними концентраціями дощових крапель до 0,1 г/кг при 0,1 над океаном та до 0,6 г/кг при 0,3/г над горами (рис. 3.45 а, б).

Також порівняно високі значення масових концентрацій хмарних крапель досягаються раніше на навітряному схилі гір півострова Київ, до 0,4 г/кг у шарі до 4 км (рис. 3.44 а), та до 0,25 г/кг в окремих хмарних осередках у шарі до 4 км над горами

Антарктичного півострова (рис. 3.44 b). Максимальні значення масових концентрацій хмарних крапель на східному узбережжі Антарктичного півострова досягаються о 10:00 UTC і становлять до 0,6 г/кг у осередку з невеликою горизонтальною протяжністю та вертикальною протяжністю до 5 км у шарі від 1 км до 6 км (рис. 3.44 c).

Було проаналізовано динаміку зміни вертикального розподілу концентрацій кристалів та крапель у перерізі через станцію «Академік Вернадський», гори півострова та бухту льодовика Ларсен В. Розглянутий розподіл був умовно перпендикулярний до атмосферного потоку 21го серпня та 23го після обіду та паралельний до потоку впродовж 22го серпня (за даними моделювання, рис. 3.35). Результати моделювання з інтервалом у 6 годин наведенні у додатках В2 (масові концентрації кристалів та крапель) та В3 (кількісні концентрації кристалів та крапель).

Впродовж 21го серпня шар кристалічної хмарності в розглянутому перерізі розвивається до 12 км. Максимальні концентрації льоду в осередках над східною частиною Антарктичних гір та підвітряного узбережжя знаходяться на висоті 6 км – 8 км з концентраціями до 0,04 г/кг і 10000/г.

Хмарність, що містить кристали снігу, розвивалася до 5 км – 6 км і містила концентрації льоду до 0,1 г/кг над Тихоокеанським сектором Південного Океану та морем Уедделла, а над горами близько 0,3 г/кг. Можна виділити два шари хмарності над Тихоокеанським сектором і переважною частиною гір та над морем Уедделла та східним узбережжям Антарктичного півострова. Окремо можна виділити осередки рідких хмарних крапель з концентраціями до 0,2 г/кг на висоті до 2 км над морем на захід від станції «Академік Вернадський», над навітряними схилами півострова Київ та між півостровом Київ та основним масивом Антарктичних гір. Після 7 UTC над східним схилом Антарктичного півострова зростають концентрації льоду до 1 г/кг на висоті 6 км, з'являються осередки рідких хмарних крапель на висоті 2 км – 4 км з концентраціями 0,1 г/кг.

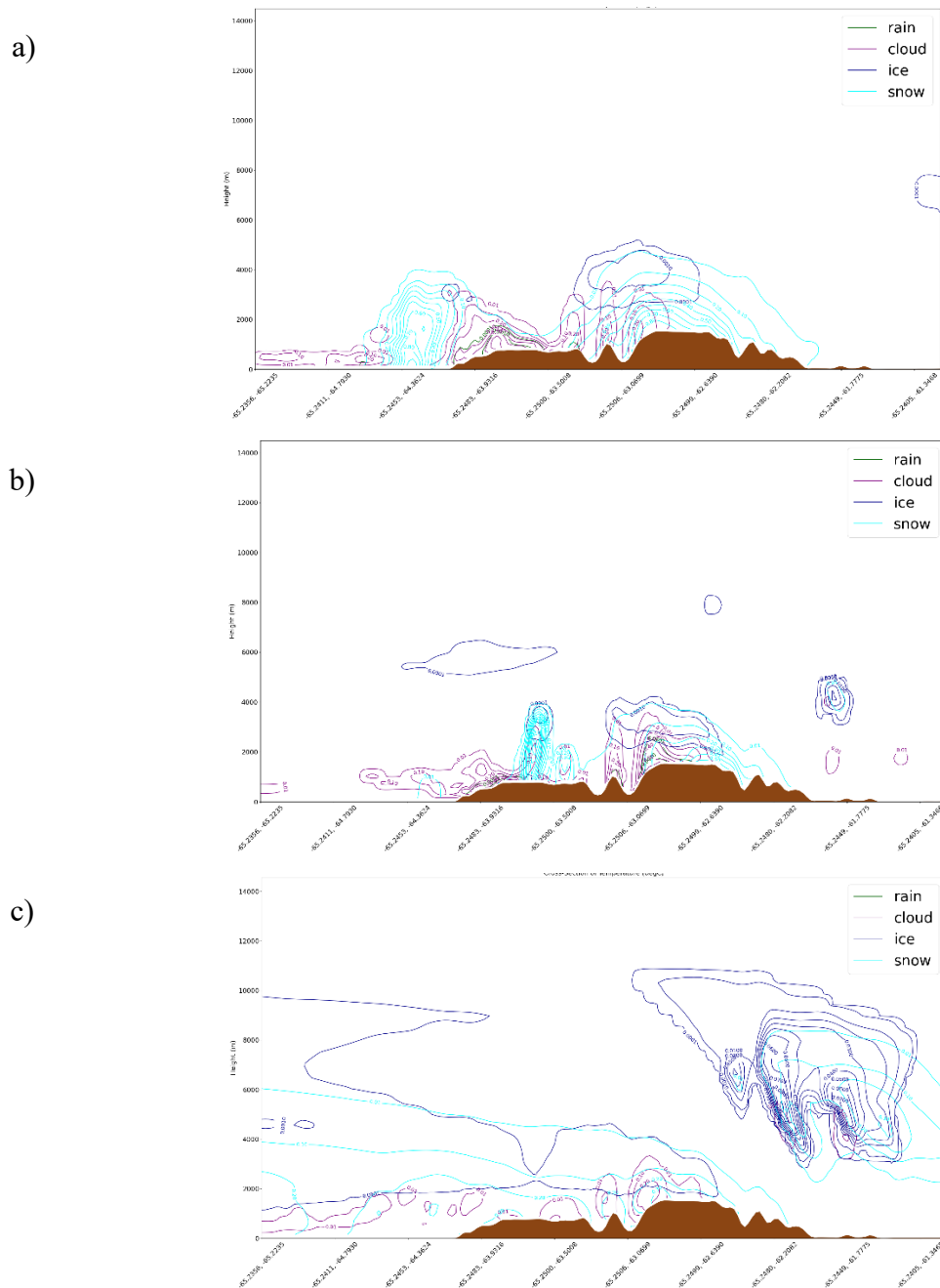


Рисунок 3.46. Масові концентрації льоду, снігу, крапель дощу, хмарних крапель за шість годин до (а), під час (б) і після (с) максимальної інтенсивності опадів зі зміною фази на станції «Академік Вернадський»

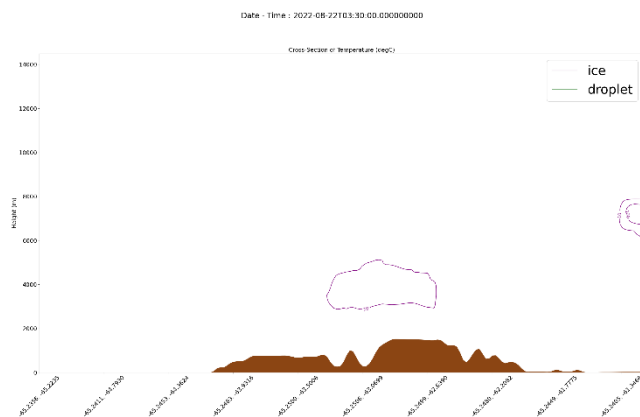
До середини 21го серпня зростають концентрації кристалів снігу у шарі до 5 км над Тихоокеанським сектором південного океану та горами Антарктичного півострова до 0,4 г/кг, у той час як над морем Уедделла кристали льоду розвиваються



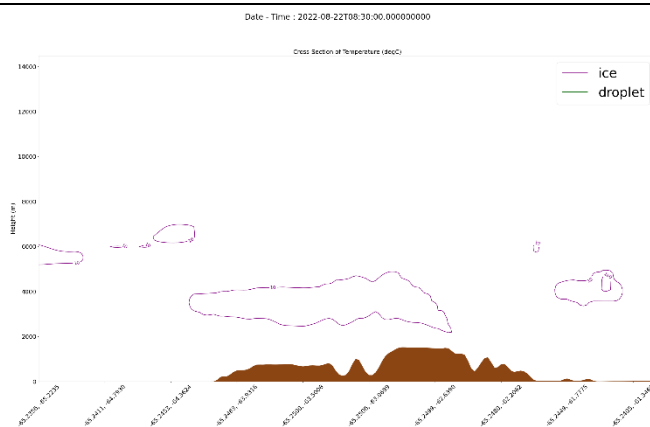
у шарі до 8 км з максимальними концентраціями до 0,4 г/кг на висоті близько 4 км. До 18 UTC 21го серпня шар з кристалами снігу розвивається до 8 км. Між 12 UTC та 16 UTC 21го серпня чітко простежуються декілька шарів хмарності з кристалами льоду на висоті до 10 км. На захід від Антарктичного півострова можна виділити шар хмарності до 4 км, що складається з кристалів льоду (0,001 г/кг), снігу (0,2 г/кг) та рідких хмарних крапель (0,01 г/кг до 1 км) та шар хмар на висоті 6,5 км – 10,5 км з концентраціями до 0,001 г/кг. Над морем Уедделла осередки кристалів льоду розвиваються від 4 км до 12 км з максимальними концентраціями над східними схилами Антарктичного узбережжя. Після 20 UTC верхня межа хмарності над Тихоокеанським сектором Південного океану за даними моделювання знижується до 6 км, концентрації снігу зростають до 0,9 г/кг. З'являється суцільний шар до 3 км з рідкими хмарними краплями з концентрацією до 0,3 г/кг та осередки дощових крапель на горах півострова з концентраціями 0,001 г/кг. До 23 UTC зникає кристалічна хмарність на перерізі, що розглядається, та залишаються хмари, що містять рідкі дрібні краплі до 0,7 г/кг у шарі до 1 км над Тихоокеанським сектором і до 4 км над основним гірським масивом (Додатки В2 і В3).

На початок 22го серпня розвиваються хмари до 2 км над океаном та до 6 км над горами переважно змішаного фазового стану, зокрема за шість годин до останнього максимуму інтенсивних опадів на станції «Академік Вернадський», о 3:30 UTC, на перерізі, що розглядається, концентрації кристалів снігу досягають 0,8 г/кг, а концентрації хмарних крапель до 4 г/кг (рис. 3.46 а) при незначних концентраціях кристалів льоду над горами (до 10/г рис. 3.47 а). У цей час у стовпі атмосфери над станцією «Академік Вернадський» та бухтою льодовика Ларсен В відмічаються тільки кристали снігу: максимальні концентрації над станцією «Академік Вернадський» близько 0,8 г/кг на висоті до 300 м та на висоті 2 км (рис. 3.48 а); над бухтою льодовика Ларсен В концентрації сніжних кристалів менше 0,2 г/кг у шарі до 2 км.

a)



b)



c)

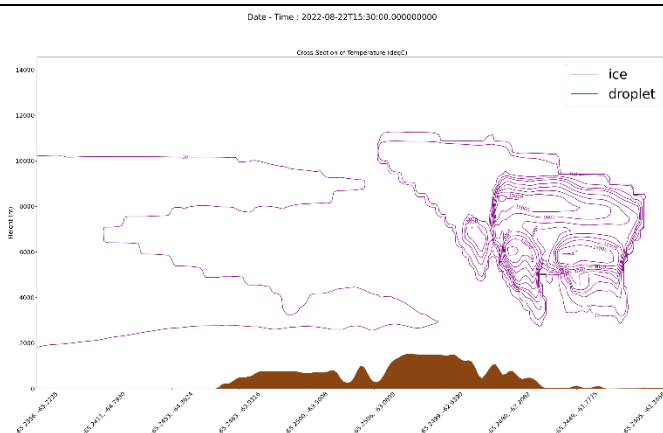


Рисунок 3.47. Кількісні концентрації льоду, снігу, крапель дощу, хмарних крапель для 3:30 UTC за шість годин до (а), під час (b) і після о 15:30 UTC (c) максимальної інтенсивності опадів на станції «Академік Вернадський»

За даними моделювання близько 9 UTC в районі навітряних схилів гір спостерігаються переважно хмарні краплі на висоті до 2 км, найбільші осередки кристалів снігу розвиваються над горами, до 1,5 г/кг (рис. 3.46 b), при концентраціях

льоду до 10/г на висоті 2 – 4 км (рис. 3.47 б). Зокрема над станцією «Академік Вернадський» відмічаються хмарні краплі у шарі до 1,8 км з максимумом до 0,2 г/кг на висоті близько 1 км (рис. 3.48 d) та кристали снігу з концентраціями менше 0,1 г/кг до 1 км (рис. 3.48 b); над досліджуваною ділянкою бухти льодовика Ларсен В майже не відмічається наявність хмар у цей момент.

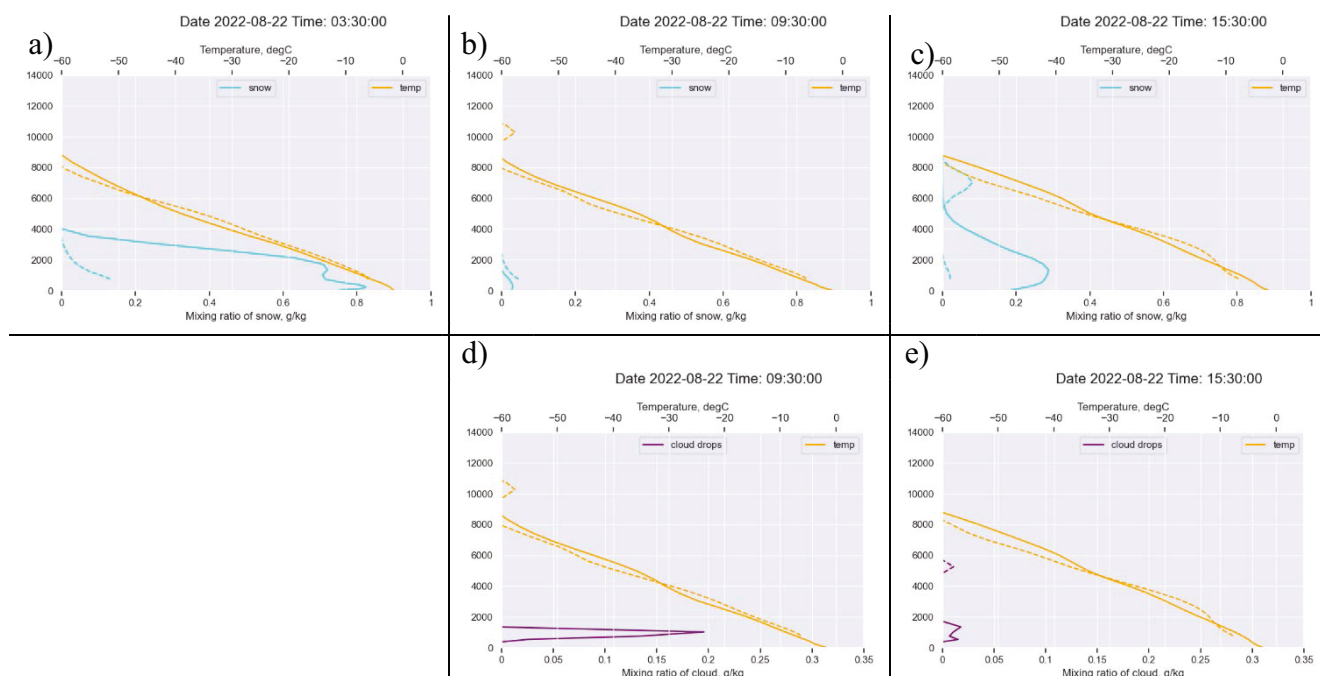


Рисунок 3.48. Масові концентрації снігу (а, б, с) та хмарних крапель (d, e), під час максимальної інтенсивності опадів 09:30 UTC 22 серпня (b, e), за 6 годин до (03:30 UTC а, j), та через 6 годин після (15:30 UTC 22 серпня: с, e) максимальної інтенсивності опадів. Суцільні лінії – станція «Академік Вернадський», пунктирні лінії – бухта льодовика Ларсен В; температура (°C) – помаранчеві лінії

До середини 22 серпня знову розвивається шар кристалічної хмарності до 10 км, що ймовірно асоціюється з надходженням потоку вологи з північного заходу (рис. 3.34 б), де над Тихоокеанським сектором Південного океану концентрації льоду у шарі 1-10 км становлять до 0,001 г/кг при 100/г, снігу – 0,3 г/кг; над морем Уедделла – 0,8

г/кг при 13000/г (рис. 3.46 с та рис 4.47 с). Відповідно значення в районі станції «Академік Вернадський» становлять до 0,001 г/кг на висотах 5 км та 9 км (рис. 3.49 а, с). Над бухтою льодовика Ларсен В відмічаються змішані хмари на висоті 5 км з концентрацією хмарних крапель до 0,2 г/кг та концентрацією льодяних кристалів до 0,06 г/кг при 13000/г на висоті 8 км та 0,08 г/кг при більше ніж 15000/г на висоті 6 км (рис. 3.49 b, d). Такий розподіл зберігається до кінця 22го та впродовж 23 серпня.

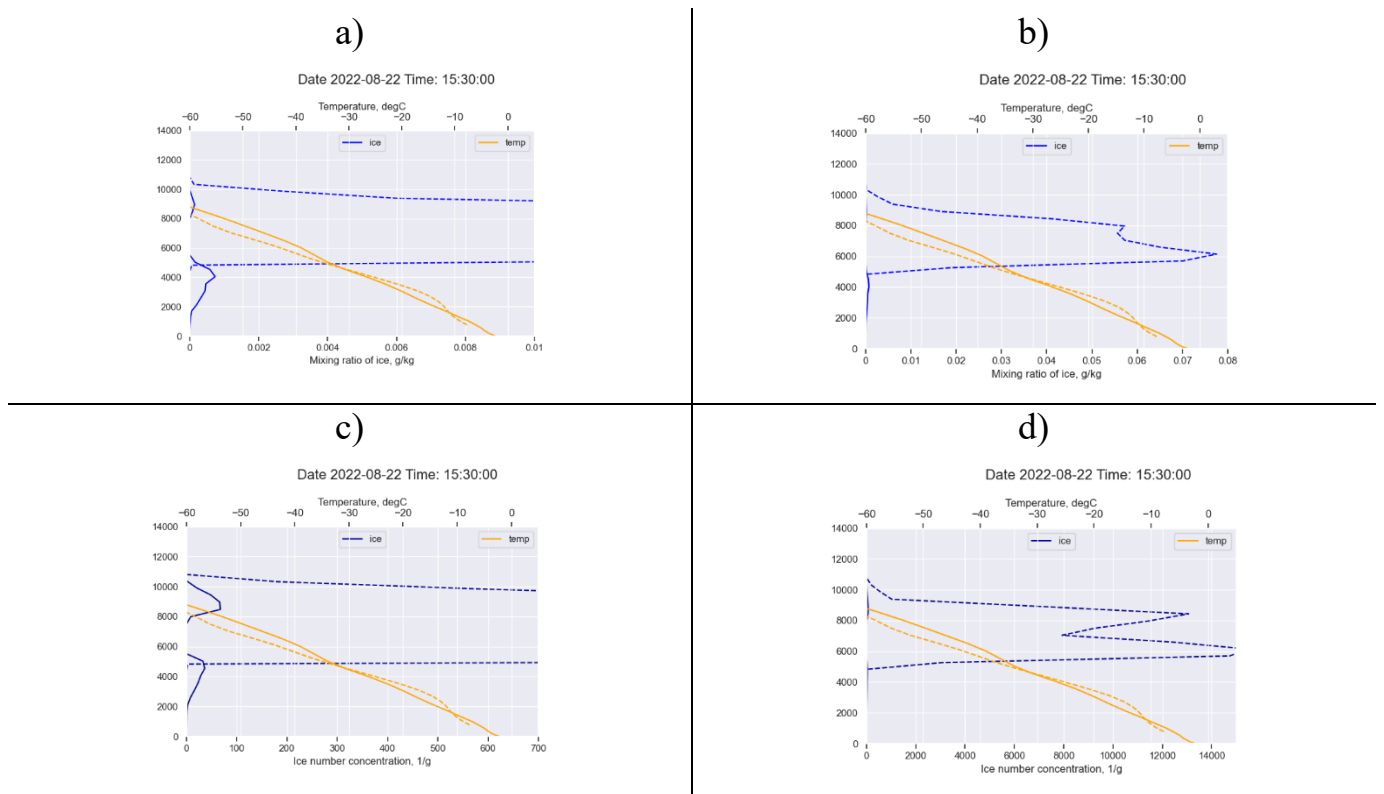


Рисунок 3.49. Масові (a,b) та кількісні (c,d) концентрації кристалів льоду над станцією «Академік Вернадський» (суцільні лінії) та льодовиком Ларсен В (пунктирні лінії) і збільшений масштаб (a, c)

Було проаналізовано розподіл масових концентрацій кристалів та крапель за допомогою 3D візуалізації даних моделювання моделі Polar WRF. У додатку В4 наведений 3D розподіли крапель та кристалів в момент настання максимальної інтенсивності опадів на станції «Академік Вернадський» (рис. 3.50).

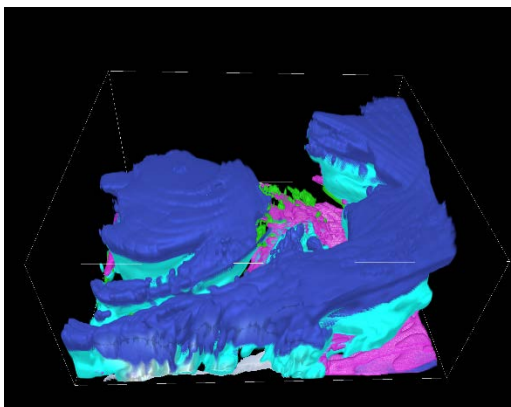


Рисунок 3.50. 3D візуалізація розподілу масових концентрацій крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий) та кристалів снігу (блакитний) для району Антарктичного півострова (сірий) 22 серпня 2022 року о 8 UTC у момент інтенсивних опадів на станції «Академік Вернадський». Домен з кроком 9 км

На рис. 3.50 наведений розподіл для домена з кроком сітки 9 км, з якого видно, що в цей момент утворюється дві основні зони хмар та опадів. З додатків В4 а-е можна простежити формування рідких опадів та хмар в Тихоокеанському секторі Південного океану та біля західного узбережжя Антарктичного півострова. У додатках В4 f-i окремо наведений розподіл для домену з кроком сітки 1 км, де можна простежити формування окремих осередків з краплями дощу та крапельних хмар на навітряних схилах західного узбережжя Антарктичного півострова.

### Підсумки третього розділу

У третьому розділі дисертаційного дослідження було проаналізовано процеси атмосферної циркуляції, мезомасштабні умови та мікрофізичні процеси формування хмар та опадів, що асоціюються з утворенням інтенсивних опадів зі зміною фази в районі Антарктичного півострова. Розглянуті випадки були обрані оскільки вони були не тільки характерними в регіоні, але й їхня повторюваність почала зростати в останню декаду, та з потеплінням клімату очікується подальша інтенсифікація подібних процесів. Дослідження включало випадки у різні сезони: зимовий, літній та

перехідний. При цьому комплексне дослідження хмар та опадів у зимовий період проводилося і результати отримані вперше завдяки участі автора в Міжнародній ініціативі YOPP-SH Winter-2022. Основні висновки третього розділу наступні:

1. За даними реаналізу виявлено, що для розглянутих випадків інтенсивних опадів у літній, зимовий та перехідний періоди характерним було, по-перше, значне меридіональне перенесення теплих насичених вологою повітряних мас з помірних широт Тихого океану, і по-друге, формування низьких, порівняно малих за площею циклонів у північному та північно-західному секторі основного глибокого циклону з центром в районі моря Амундсена, які посилювали меридіонально направлений заток тепла з помірних широт Тихого океану.
2. За даними моделювання Polar WRF для розглянутих випадків у всі сезони виявлено наявність орографічного підсилення формування хмар і опадів, наявність і висоту атмосферних потоків, моменти настання та протяжність областей додатних температур внаслідок надходження теплих повітряних мас чи утворення фєнових ефектів, зокрема в районі бухти льодовика Ларсен В, де отримано підвищення приземної температури повітря навіть взимку до  $+6^{\circ}\text{C}$  за даними моделювання, що може вказувати на причину нещодавнього танення та руйнування шельфових льодовиків східного узбережжя Антарктичного півострова.
3. Модель Polar WRF досить точно передає вертикальні розподіли температури повітря, швидкості та напрям вітру і тому може використовуватися для вивчення регіональних особливостей формування хмар та опадів у регіоні. В результаті порівняння даних моделювання та даних радіозондування можна припустити, що модель Polar WRF з високим ступенем достовірності відображає процеси хмаро- і опадоутворення до висот близько 350 гПа. Проте поточна конфігурація Polar WRF мала відхилення температур у граничному шарі атмосфери на  $1-2^{\circ}\text{C}$  для деяких моментів спостережень. Так як виявлені похибки переважно стосуються

температури повітря близької до нуля, вони можуть прямо впливати на представлення фази опадів у моделюванні.

4. У результатах Polar WRF простежується дещо завищена кількість опадів під час циклонів, що спостерігалися влітку, у порівнянні зі спостереженнями на станціях «Професор Хуліо Ескудеро» та «Академік Вернадський», та дещо занижені значення інтенсивності опадів за даними у перехідний та зимовий сезони. Однак слід враховувати, що вимірювання опадів, проведені на обох станціях у досліджуваній період, самі по собі також мають похибки, характерні для полярних регіонів, які зазвичай пов'язані із сильними вітрами та приземними хуртовинами, а вимірювання кількості опадів на станції «Професор Хуліо Ескудеро» склалися лише з сумарної кількості опадів у вигляді снігу (на основі зміни глибини снігу) та констатації наявності чи відсутності дощу.
5. За проходження теплих фронтів із затоком вологи з тропічних/помірних широт над основним масивом гір розвиваються шаруваті та орографічні крапельні хмари нижнього ярусу, але також створюються умови для розвитку кристалічних орографічних хмар вище, тобто результати моделювання підтвердили наявність розшарування з принаймні двома шарами хмар різного фазового складу.
6. Потепління та зростання масового вмісту водяної пари, що асоціюються з проходженням інтенсивних циклонів, спостерігаються для обох узбережь Антарктичного півострова. Однак навітряний схил характеризується порівняно нижчими значеннями температури та вищими значеннями вмісту водяної пари у граничному шарі до 2 км; в той час як для підвітряного схилу гір характерне утворення стабільних осередків з додатною температурою повітря та порівняно нижчими значеннями вмісту водяної пари.
7. Для інтенсивної циклонічної події перехідного сезону характерним було формування шаруватих рідких та змішаних хмар на висоті до 1 км та шаруватих кристалічних хмар на висотах від 3 до 10 км над тихоокеанським сектором

Південного океану, півостровом Київ та основним гірським масивом Антарктичних гір; над східним узбережжям Антарктичного півострова та над морем Уедделла характерне формування конвективних змішаних хмар з льодяними осередками на висоті 5-10 км та крапельними осередками від 2 до 6 км.

8. Виявлені мікрофізичні властивості хмар, що асоціюються з інтенсивними опадами в регіоні Антарктичного півострова на основі випадків перехідного та зимового сезонів не є достатніми для формулювання узагальнюючих висновків щодо мікрофізичних процесів хмаро- та опадоутворення, оскільки вирішення такої задачі потребує статистично значущої вибірки результатів моделювань для кожного з сезонів, що в свою чергу є дороговартісним, оскільки потребує значних розрахункових потужностей. Проте, вперше було отримано подібні результати на основі комплексного аналізу як даних моделювань, так і вимірів на станціях включно з вертикальними зондуваннями, і вони у цілому узгоджуються із загальними уявленнями та висновками про фізичні процеси в регіоні, отриманими іншими дослідниками та іншими методами.

Результати дослідження, що представлені у третьому розділі, опубліковано у працях за участі автора (Chyhareva et. al. 2020, 2021a, 2021b, 2021c, 2022, 2023a, 2023b; Pishniak et. al. 2021; Rowe et. al. 2022; Durán-Alarcón C et.al. 2022; Dutrievoz et.al 2022, 2023; Gorodetskaya et al. 2022; Chyhareva & Krakovska 2023), та вони були обговорені на вісьмох міжнародних конференціях.



## РОЗДІЛ 4

### КЛІМАТИЧНІ ПРОЄКЦІЇ ХМАР ТА ОПАДІВ В РАЙОНІ АНТАРКТИЧНОГО ПІВОСТРОВА ДО КІНЦЯ ХХІ СТ.

У попередньому розділі було проаналізовано мезомасштабні та мікрофізичні процеси у хмарах та опадах у різні сезони в районі дослідження. Було виявлено, що інтенсивні опади змішаної фази чи зі зміною фазового стану переважно асоціювалися із затоками теплого насиченого вологою повітря з помірних широт Тихого океану. Рідкі хмари та досить інтенсивні опади було виявлено в районі Антарктичного півострова навіть взимку, що може вказувати на можливість впливу таких процесів на танення крижаного покриву, якщо подібні випадки стануть частішими у майбутньому.

Для визначення особливостей прояву вищеописаних метеорологічних умов у майбутньому та їхній вплив на Антарктичний півострів, у четвертому розділі дисертаційного дослідження представлено результати аналізу проєкцій кліматичних індексів та параметрів атмосфери, що асоціюються зі зміною режиму формування хмар та опадів у регіоні через значне потепління і перехід температури повітря через 0°C, що впливатиме на фазовий стан хмар та опадів зокрема. Тому аналізувалися температурні індекси, які пов'язані з від'ємними температурами, характеристики режиму рідких опадів та зміна їхньої екстремальності, а також зміна інтегральної кількості сконденсованої вологи та льоду в атмосфері як характеристики хмар. Оцінки проводилися за двома сценаріями репрезентативних концентрацій RCP 4.5 та RCP 8.5 (Thomson et al., 2011, Riahi et al., 2011). Оцінено та проаналізовано просторовий та часовий розподіл обраних показників, усереднених за історичний період, середину та кінець століття за даними РКМ Antarctic-CORDEX. Методика обробки результатів РКМ представлено в підрозділі 2.2.

#### 4.1. Зміни температурних характеристик холодного періоду

В цьому підрозділі представлено результати розрахунків значень двох кліматичних індексів, а саме кількість днів коли максимальна/мінімальна температури менші за 0°C (ID – Ice Days / FD - Frost Days). Розраховані багаторічні середні значення показників для періодів 1986-2005, 2041-2060 і 2081-2100 та величина їхньої зміни відносно базового періоду 1986-2005 за допомогою програмного пакету climate4R (Iturbide et al., 2019). Детальний алгоритм розрахунку описаний у пункті 2.1. Отримані значення були осереднені за часом за вказаними трьома 20-річними періодами для отримання просторового розподілу зміни у вигляді карт та за простором для отримання багаторічної варіації параметрів, що розглядаються, для регіону Антарктичного півострова у цілому впродовж XXI ст.

##### 4.1.1 Індекс на основі мінімальної температури повітря (FD)

*Багаторічне середнє FD.* Середня кількість днів з мінімальною температурою менше за 0°C (FD) за ансамблем РКМ змінюється в межах  $355 \pm 1$  днів/рік у базовому періоді. За сценарієм RCP 4.5 значення FD зменшується до  $353 \pm 1$  днів/рік до середини і  $352 \pm 1$  днів/рік до кінця століття. За сценарієм RCP 8.5 значення FD помітно зменшується у порівнянні зі значеннями, що очікуються, за сценарієм RCP 4.5.

До середини століття FD зменшиться до  $352 \pm 2$  і до кінця століття – в середньому до  $346 \pm 4$  днів/рік. Такі результати свідчать, що за проєкціями ансамблю РКМ кількість днів з мінімальною температурою менше за 0°C до кінця століття зменшиться в середньому на три дні/рік за сценарієм RCP 4.5 та на 9 днів/рік за сценарієм RCP 8.5. Отримані результати представлені на рисунку 4.1, де на лівому графіку зображені зміни за сценарієм RCP 4.5 а на правому – за сценарієм RCP 8.5. Суцільна затінена зона та темніша лінія на рисунку 4.1 відповідає діапазону значень та середньому значенню за ансамблем РКМ відповідно.

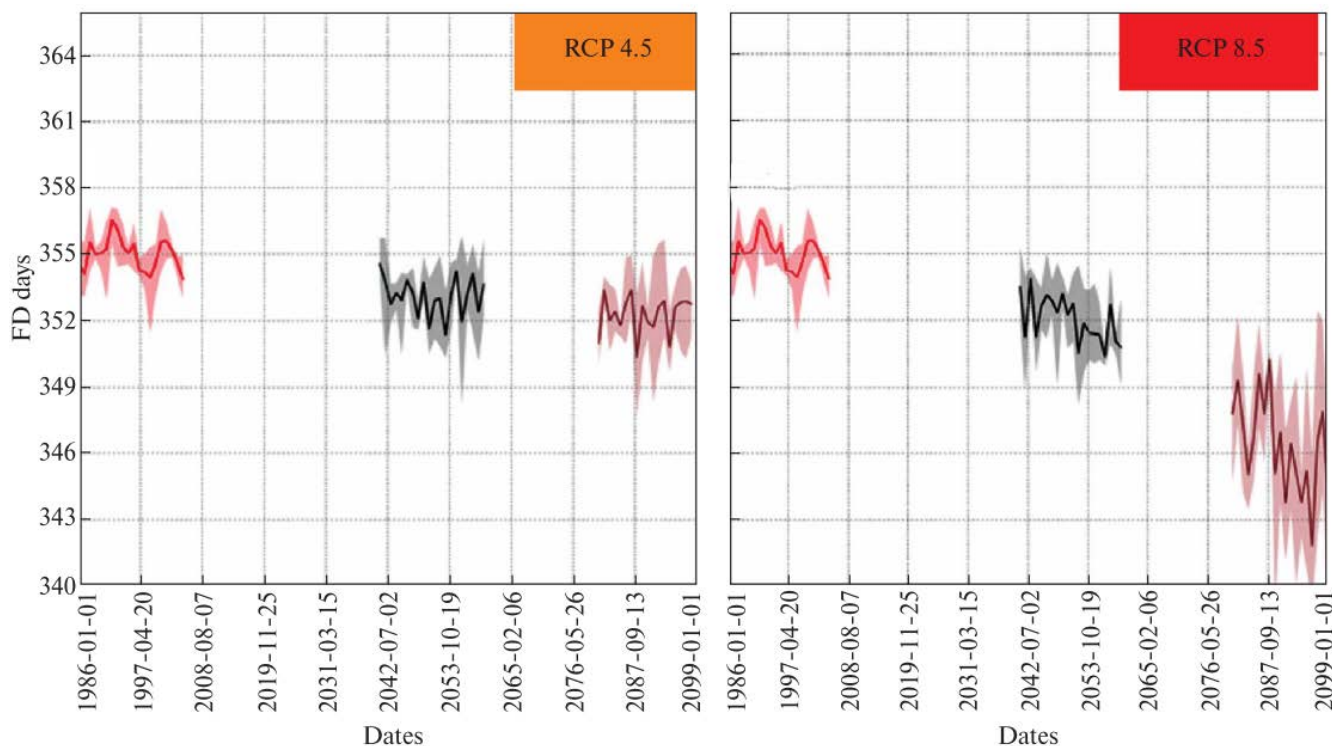


Рисунок 4.1. Кількість днів з мінімальною температурою менше за  $0^{\circ}\text{C}$  для історичного періоду та майбутніх періодів за сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5

***Зміни FD в районі Антарктичного півострова та станції «Академік Вернадський».*** Зміни кількості FD за сценарієм RCP 4.5 та RCP 8.5 до середини та кінця століття представлені на рисунку 4.2. Характер мінливості усереднених значень кількості FD для Антарктичного півострова суттєво відрізняється від мінливості значень для станції «Академік Вернадський».

Відповідно до сценарію RCP 4.5 багаторічне середнє значення кількості FD, усереднене для всього Антарктичного півострова, є рівномірним з невеликою міжрічною мінливістю у кілька днів (рис 4.2 а, с). Багаторічна середня зміна, усереднена за століття, близька до  $-2$  днів/рік. До кінця століття вона становитиме  $-6 \pm 2$  днів/рік. Для станції «Академік Вернадський», яка розташована у північно-західній частині півострова, зменшення кількості FD набагато суттєвіше, ніж у цілому для півострова. Воно становить у середньому  $-30 \pm 10$  днів/рік і змінюється в межах

від  $-6 \div -44$  днів/рік до середини століття. Діапазон зміни значень ансамблю РКМ сягає  $+10 \div -70$  днів/рік в окремі роки. Але всі три моделі вказують на суттєве зменшення кількості днів з мінімальною температурою меншою за  $0^{\circ}\text{C}$  до 2050 року, коли сезон з FD може скоротитися більше, ніж на місяць. Впродовж періоду з 2081 до 2100 зміни FD становитимуть від  $-55$  до  $-25$  днів/рік для району станції, і у середньому зменшення показника до 2100 становитимуть  $-40 \pm 11$  днів/рік.

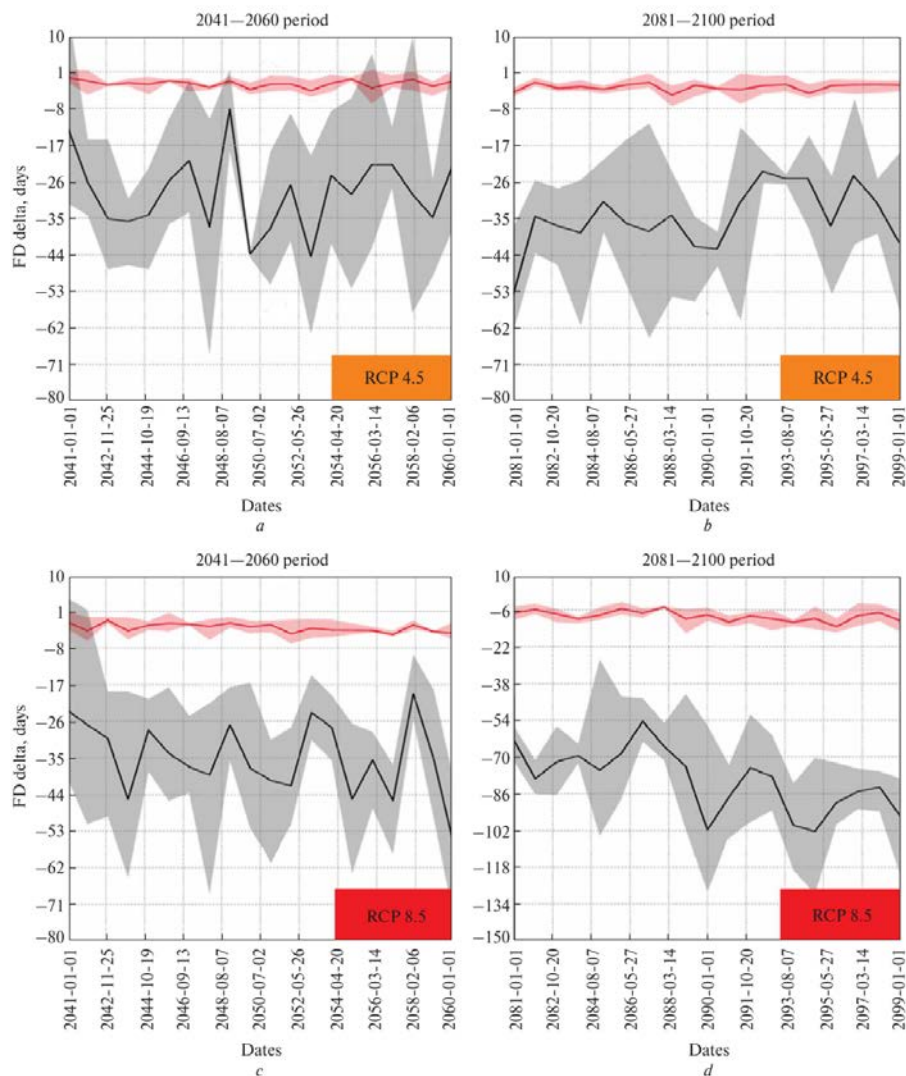


Рисунок 4.2. Часовий хід зміни кількості FD за сценаріями RCP 4.5 і RCP 8.5 для Антарктичного півострова у цілому (червоне) та для району станції «Академік Вернадський» (сіре) у середині та до кінця XXI ст.

Відповідно до сценарію RCP 8.5 зменшення кількості FD для півострова в середньому знаходиться у діапазоні  $-1 \div -5$  днів/рік для середини століття та зростає до  $-11$  днів/рік до кінця століття для регіону Антарктичного півострова. Для району станції «Академік Вернадський» за сценарієм RCP 8.5 до середини століття прогнозується суттєве зменшення кількості FD. Впродовж цього періоду спостерігаються відхилення в діапазоні  $-25 \div -45$  днів/рік з амплітудою у  $\pm 20$  приблизно кожні п'ять років. До 2060 тривалість сезону з FD зменшиться майже на 50 днів/рік. До кінця століття кількість FD продовжить зменшуватися і за сценарієм RCP 8.5 скоротиться приблизно на  $-100$  днів/рік. Більш детальна інформація про коливання багаторічного середнього значення зміни кількості FD представлена на рисунку 4.2.

***Просторовий розподіл середньої зміни кількості FD.*** У середньому, кількість днів з мінімальною температурою менше за  $0^{\circ}\text{C}$  впродовж базового періоду становить 355 днів/рік на переважній території Антарктичного півострова (Рис. 4.3с). На північному сході (Льодовик Ларсена) та південному заході (Острів Олександра I, Льодовик Георга VI) Антарктичного півострова кількість FD скорочується до 330 днів/рік. Загалом найменша кількість FD відмічається на північній окраїні півострова та на його східних схилах, де переважають шельфові льодовики на невеликих висотах.

Результати свідчать, що для Антарктичного півострова зміна FD, осереднена за ансамблем РКМ та обома 20-річними періодами, практично однакова для переважної території півострова і становить  $-4$  дні/рік за сценарієм RCP 4.5. Невелике зростання кількості FD прогнозується до середини сторіччя для південної частини півострова в районі гори Коман (3655 м). Ця аномалія майже зникає до кінця століття. Суттєве скорочення і його посилення до кінця століття у кількості FD очікується в районі західного узбережжя Антарктичного півострова та, особливо, у прибережних зонах району станції «Академік Вернадський», де кількість FD зменшиться на 30 днів/рік впродовж середини століття і на 35-40 днів/рік до кінця століття (рис.4.3 а, б).

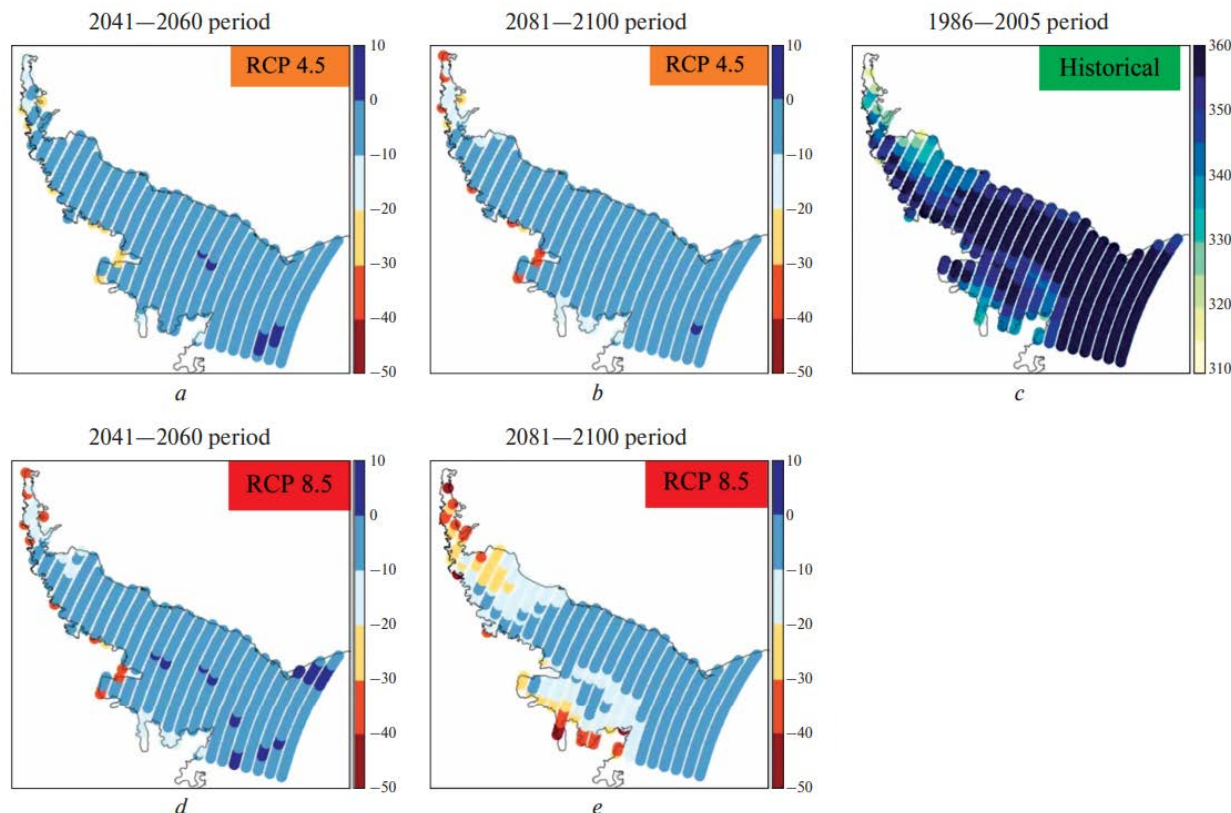


Рисунок 4.3. Просторовий розподіл FD для історичного періоду (с), та усереднена зміна FD для визначених періодів за сценарієм RCP 4.5 (a,b) та RCP 8.5 (d,e)

Відповідно до сценарію RCP 8.5 розраховані зміни параметру FD значно відрізняються від отриманих значень за сценарієм RCP 4.5 (рис. 4.3 d, e). У середньому кількість FD зменшиться на 10 днів/рік впродовж середини століття в регіоні Антарктичного півострова. До кінця століття проявляється неоднорідність у зміні кількості FD на півострові: на північному сході та на півдні півострова кількість FD скоротиться на 10-20 днів/рік, у той час як в деяких прибережних районах на більш ніж 40 днів/рік. Що стосується станції «Академік Вернадський», то кількість FD може зменшитися у середньому на 35-40 до середини і на 80-90 днів/рік до кінця століття.

#### 4.1.2 Індекс на основі максимальної температури повітря (ID)

**Багаторічне середнє ID.** Впродовж історичного періоду усереднене для всього Антарктичного півострова середнє значення кількості днів з максимальною

температурою нижче за  $0^{\circ}\text{C}$  (ID – ice days) становить  $339 \pm 3$  днів/рік з міжрічною мінливістю від 334 до 345 днів/рік. Незначний тренд до зменшення ID спостерігається для всього базового періоду (рис. 4.4).

Тенденція до зміни ID впродовж XXI століття схожа до тенденції зміни індексу FD. Таким чином, очікується, що до середини століття кількість ID зменшиться до  $330 \pm 4$  днів/рік. До кінця століття осереднені ансамблеві значення РКМ індексу ID становлять  $327 \pm 3$  днів/рік. Загалом за сценарієм RCP 4.5 спостерігається незначна тенденція до зниження ID.

За сценарієм RCP 8.5 очікується швидке зменшення кількості ID. У період 2041–2060 значення ID скоротяться в середньому з 330 до 324 днів/рік. Прогнозується, що за останні двадцять років у XXI столітті ID зменшиться в середньому з 315 до лише  $310 \pm 5$  днів/рік (рис. 4.4).

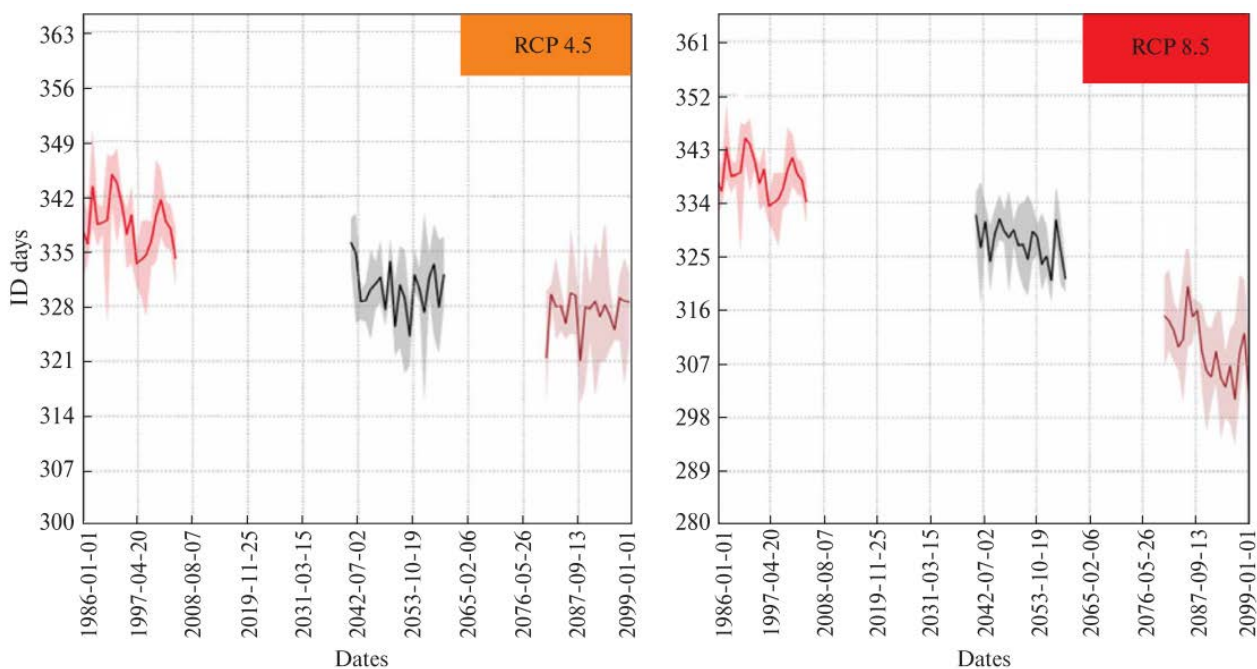


Рисунок 4.4. Кількість днів з максимальною температурою менше  $0^{\circ}\text{C}$  для історичного періоду та майбутніх періодів за сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5

***Зміни ID в районі Антарктичного Півострова та станції «Академік Вернадський».***

Багаторічна середня зміна ID більш виражена за обома сценаріями для регіону Антарктичного півострова, ніж середня зміна FD. Екстремуми усереднених коливань зміни ID відмічаються над півостровом і над станцією «Академік Вернадський», хоча значення на станції значно вищі за середні на півострові для обох сценаріїв (рис. 4.5).

За сценарієм RCP 4.5 зміна для півострова складає у середньому  $-9$  днів/рік впродовж середини століття та  $-14$  днів/рік наприкінці століття для 20-річних осереднених значень. Мінливість багаторічних середніх змін становить від  $-5$  до  $-15$  днів/рік у середині століття та від  $-10$  до  $-17$  днів/рік до кінця століття. Значне зниження ID спостерігається у районі станції «Академік Вернадський» впродовж періоду 2041—2060 років. Це зниження коливається в середньому від  $-20$  на початку до  $-50$  днів/рік наприкінці зазначеного періоду. Наприкінці століття як коливання амплітуди зміни середнього багаторічного значення кількості ID, так і її середнє значення падають до  $-26 \div -60$  днів/рік із зменшенням середнього значення на  $-35$  днів/рік (рис. 4.5).

Відповідно до сценарію RCP 8.5, значне зниження ID прогнозується як над Антарктичним півостровом, так і над станцією «Академік Вернадський». У середині століття багаторічна середня зміна ID зменшиться з  $-10$  до  $-17$  днів/рік з невеликою міжрічною мінливістю у 3–4 дні/рік над Антарктичним півостровом. Наприкінці століття це значення знизиться до  $-35$  днів/рік. За сценарієм RCP 8.5 темпи зниження ID приблизно дорівнюють двом дням за рік і значно перевищують розраховані за сценарієм RCP 4.5. Для району станції «Академік Вернадський» зменшення кількості ID не є лінійним. Спостерігаються значні міжрічні коливання з амплітудами до 20 днів/рік і вищою частотою в середині століття, які дещо згладжуються в кінці століття. Загалом можна стверджувати про тенденцію до суттєвого зменшення кількості ID,



коли середні значення скоротяться на більше ніж  $-45$  днів/рік у середині та на  $-115$  днів/рік у кінці століття (рис. 4.5).

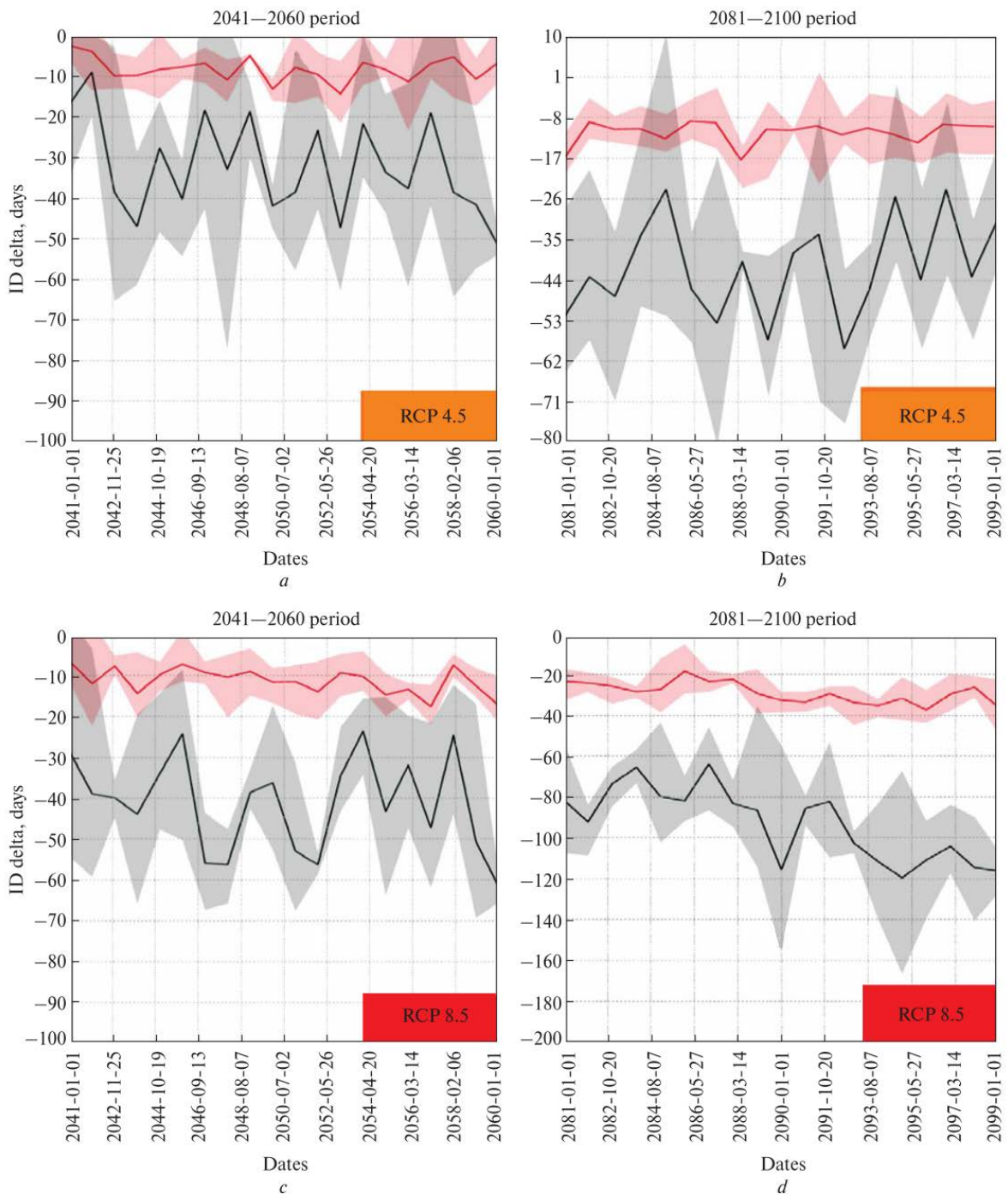


Рисунок 4.5. Часовий хід зміни кількості ID за сценаріями RCP 4.5 і RCP 8.5 для Антарктичного півострова у цілому (червоне) та для району станції «Академік Вернадський» (сіре) у середині та до кінця XXI ст.

***Просторовий розподіл усередненої зміни кількості ІД.***

За історичний період просторовий розподіл середніх значень ІД показано на рис. 4.6. Цей розподіл є середнім значенням ансамблю РКМ по території півострова. Кількість ІД становила приблизно 340 днів/рік у історичний період над центральною частиною півострова. У північній (льодовик Ларсена, Земля Греяма) і південно-західній (острів Олександра I, льодовик Георга VI) частинах півострова кількість ІД менша зі значеннями в середньому 260 днів/рік, що вказує на менш суворий (морський) клімат, ніж у гірській частині півострова.

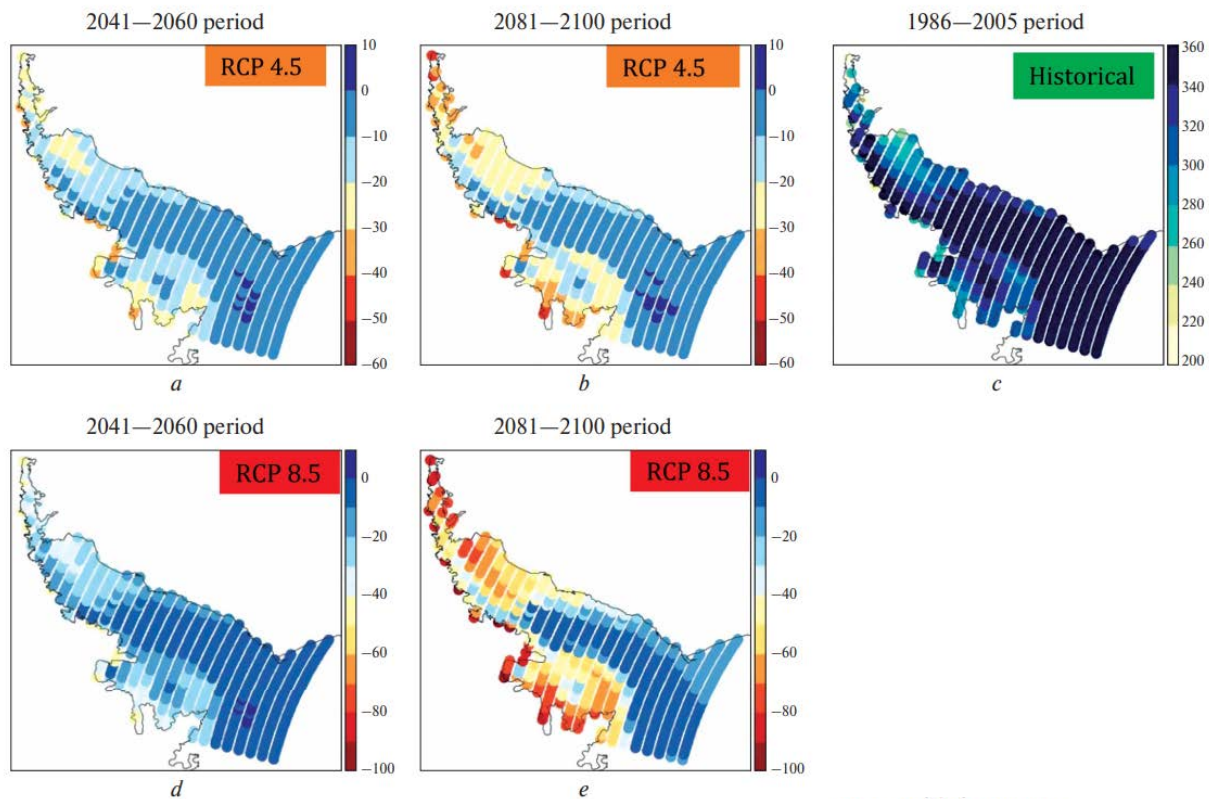


Рисунок 4.6. Просторовий розподіл ІД для історичного періоду (с), та усереднена зміна ІД для визначених періодів за сценарієм RCP 4.5 (а, b) та RCP 8.5 (d, e)

За ансамблем моделей і сценаріями прогнозується, що у майбутньому тенденції зменшення кількості ІД є набагато більшими, ніж зменшення FD. За сценарієм RCP 4.5 суттєве зменшення очікується майже для всього регіону півострова в середині

століття (рис. 4.6 a), з найменшими значеннями у -10 днів/рік у центральній гірській частині півострова. Над льодовиком Ларсена, островом Олександра I та південними прибережними районами ця негативна зміна дорівнює -30 та -40 днів/рік у деяких вузлах сітки. Наприкінці століття в цих районах тенденція до зниження посилиться (рис. 4.6 b).

За сценарієм RCP 8.5 очікується значне скорочення ID приблизно на 100 днів/рік менше в деяких районах наприкінці століття (рис. 4.6, e). Над гірською місцевістю отримано мінімальні зміни ID близько -10 днів/рік в середині століття (рис. 4.6 d), але площа цих мінімальних змін скоротиться в кінці століття (рис. 4.6 e). Над льодовиком Ларсена, Греяма і регіоном навколо острова Олександра I середня зміна в середині століття становитиме -30 днів/рік, досягаючи -70 днів/рік наприкінці століття. Варто зазначити, що в розглянутих проєкціях незначне збільшення кількості днів з максимальною температурою менше 0°C (аналогічно до FD) було виявлено в районі гори Коман за сценарієм RCP 4.5, і в середині століття – за сценарієм RCP 8.5.

#### **4.2. Зміна режиму зволоження/посушливості**

Для аналізу зміни режиму зволоження/посушливості в районі Антарктичного півострова аналізувалися чотири кліматичні індекси: загальна кількість опадів (PRCPTOT), середня інтенсивність опадів (SDII), максимальна тривалість безперервного періоду з опадами менше за 1 мм/добу (CDD) і максимальна тривалість періоду з опадами більше за 1 мм/добу (CWD). Вони розраховувалися як середнє за ансамблем РКМ і аналізувалися відповідно до викладених у підрозділі 2.2 методичних підходів. Як і для температурних індексів аналізували проєкції значень, які усереднювалися за територією всього півострова та окремо для району станції «Академік Вернадський». Особливістю отриманих даних є те, що зміни індексів зволоження/посушливості для станції «Академік Вернадський» мають схожі тенденції та значення, як і усереднені по всьому Антарктичному півострова, що відрізняється від результатів, отриманих вище, щодо зміни показників

температурного режиму холодного періоду, коли діапазон значень для станції «Академік Вернадський» у кілька разів перевищує діапазон усереднених значень для всього півострова. Оскільки отримані показники режиму зволоження для станції «Академік Вернадський» суттєво не відрізняються від характеристик для півострова в цілому, вони не розглядатимуться детально, але представлені в Додатку Г.

#### 4.2.1. Аналіз індексів зволоження/посушливості в районі Антарктичного півострова в історичний період

Області з найбільшою кількістю опадів (PRCPTOT) та їхньою інтенсивністю (SDII) розташовані на західній навітряній стороні Антарктичного півострова, зокрема це Земля Ґреяма і Земля Палмера, на північний захід від острова Олександра I (рис. 4.7 а, б).

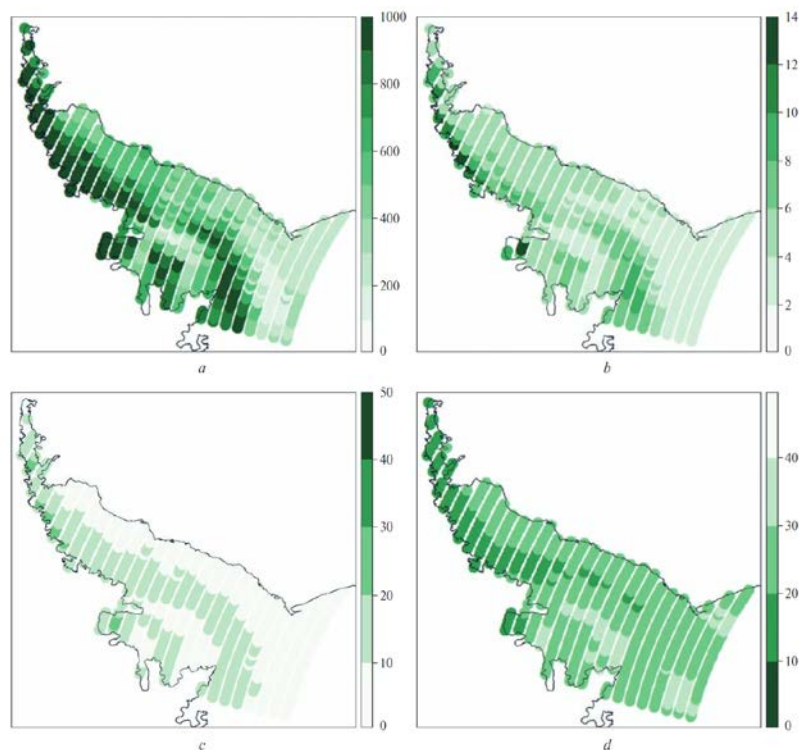


Рисунок 4.7. Індекси зволоження/посушливості в районі Антарктичного півострова за історичний період 1986-2005: а — PRCPTOT (мм); б — SDII (мм/добу); с — CWD (дні); д — CDD (дні)

В зазначеному регіоні найбільша тривалість періоду з опадами більше 1 мм (CWD) переважно менша 20 днів, за виключенням деяких прибережних локацій, де вона становить більше 20 днів (рис. 4.7 c). У цей же час максимальна тривалість періоду без суттєвих опадів (CDD) складає також до 20 днів, з мінімальними значеннями менше 10 днів (рис. 4.7 d). Відповідно регіони з найменшими значеннями PRCPTOT (200-300 мм) та SDII (приблизно 5 мм/добу) це Льодовик Ларсена та підвітряний схил східного узбережжя Антарктичного півострова, де CWD становить менше 10 днів, в той час як CDD сягає 30 днів (рис. 4.7).

#### 4.2.2. Проекції індексів у XXI столітті

Зростання сумарної кількості опадів прогнозується за двома сценаріями, що розглядаються (рис.4.8). Відповідно до сценарію RCP 4.5 очікується, що PRCPTOT зросте на 17% до середини століття у порівнянні з базовим періодом 1986-2005, та ця тенденція зберігатиметься на такому ж рівні до кінця століття.

Відповідно до сценарію RCP 8.5 прогнозується, що PRCPTOT зросте від 20% впродовж середини століття до приблизно 40% на кінець XXI століття (рис. 4.8 b).

До кінця XXI століття в регіоні Антарктичного півострова значення CWD зросте на 5—10% за сценарієм RCP 4.5 (рис. 4.8 e) і на 7—15% за сценарієм RCP 8.5 (рис. 4.8 f). Більша мінливість прогнозується для району станції «Академік Вернадський» (Додаток Г), де максимальні значення CWD можуть зростати більше ніж на 30% у деякі періоди за обома сценаріями; однак усереднені багаторічні зміни подібні до значень для всього півострова. Мінливість максимальних змін CWD відносно базового періоду більша за мінливість змін CDD.

Загалом за обома сценаріями прогнозується, що максимальна тривалість періоду без суттєвих опадів скоротиться як для всього півострова, так і для станції «Академік Вернадський». CDD зменшиться на 7-10% за сценарієм RCP 4.5 (рис. 4.8 g) та на 10-15% за сценарієм RCP 8.5 (рис. 4.8 h) для всього півострова.

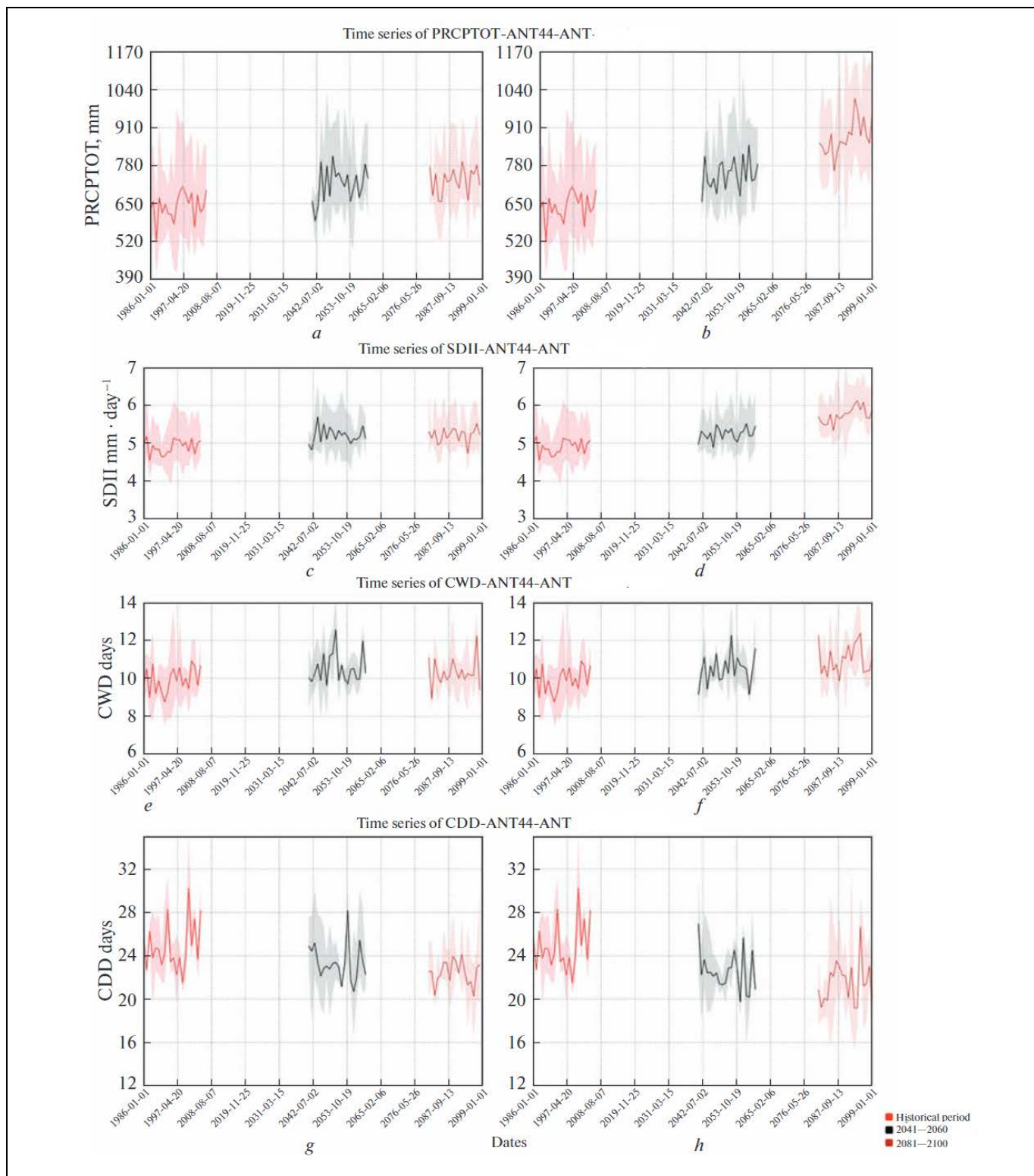


Рисунок 4.8. Часові ряди кліматичних індексів PRCPTOT (a, b), SDII (c, d), CWD (e, f) і CDD (g, h) для історичного періоду (зображено на всіх графіках), сценаріїв RCP 4.5 (a, c, e, g) та RCP 8.5 (b, d, f, h) до кінця ХХІ століття. Суцільна лінія — середнє значення ансамблю РКМ. Заштриховані області на графіках представляють діапазон значень РКМ.

### 1.2.3. Просторовий розподіл

Аналіз просторового розподілу виявив декілька регіонів з різною зміною режиму опадів, прогнозовану до кінця XXI століття. Найменші зміни у кількості та усередненій інтенсивності опадів, до 10%, очікуються на східній підвітряній стороні півострова, а саме Землі Грея та в районі Льодовика Ларсена за сценарієм RCP 4.5. За сценарієм RCP8.5 прогнозується зменшення кількості опадів та їхньої інтенсивності до 5% над шельфовим льодовиком Ларсена в середині та збільшення до 10% наприкінці століття (рис.4.9 с, d, рис 4.10 с, d). Ці значення є найнижчими для Антарктичного півострова для обох сценаріїв.

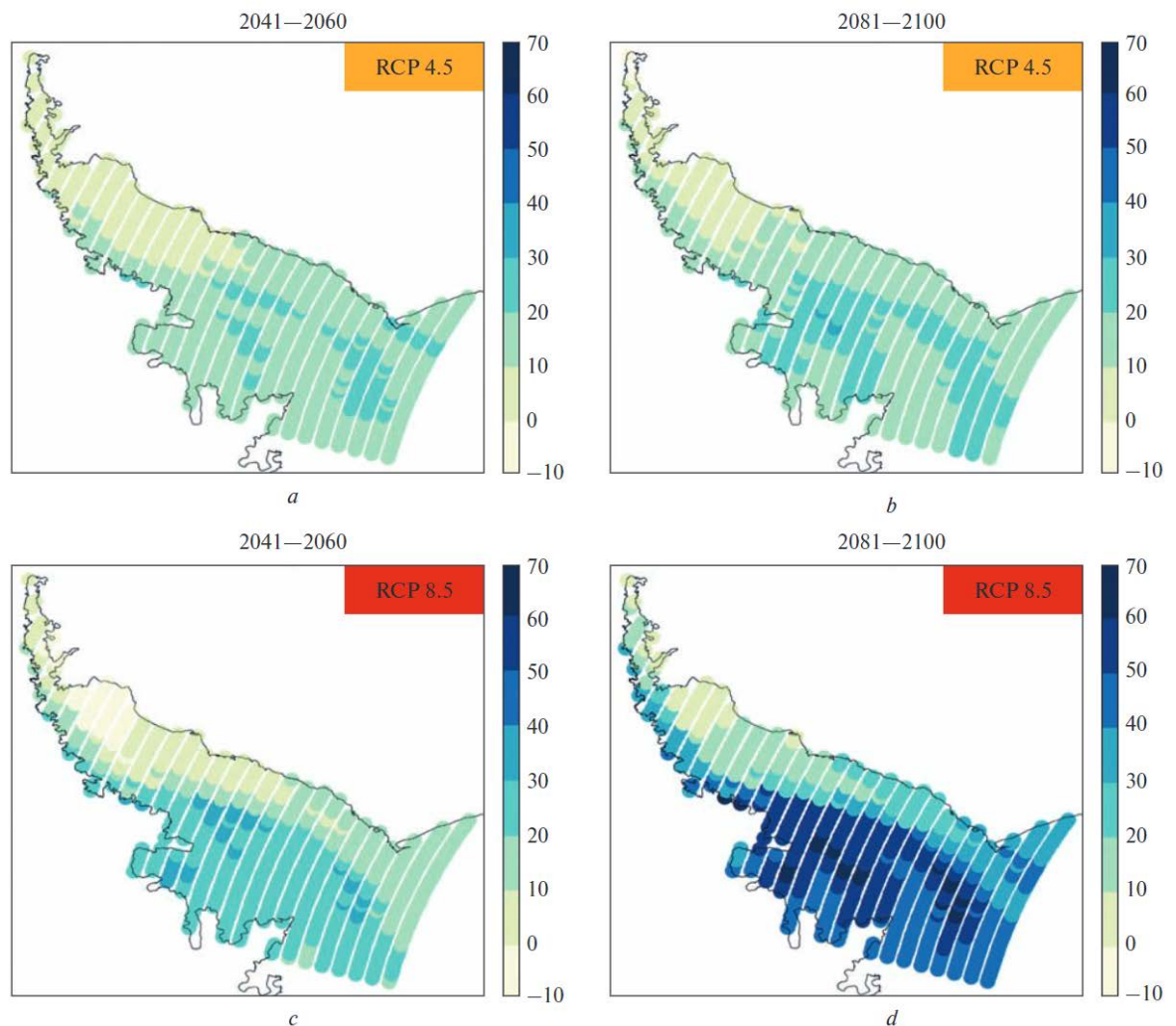


Рисунок 4.9. Просторовий розподіл середньої зміни PRCPTOT (%) для зазначених кліматичних періодів для сценаріїв RCP 4.5 (a, b) та RCP 8.5 (c, d)

Загалом, за сценарієм RCP 4.5 PRCPTOT зростає на 20—30% (рис.4.9 а, b), а SDII – на 5—10% (рис.4.10 а, b) на переважній території Антарктичного півострова для обох періодів. За сценарієм RCP 8.5 на західному навітряному схилі гір півострова максимальні отримані значення свідчать про зростання PRCPTOT на 40% (рис. 4.9 с) та SDII на 15% (рис. 4.10 с) до середини століття. В районі Землі Палмера до кінця століття за даними моделей, зростання PRCPTOT та SDII становитиме більше ніж 60% (рис.4.9 d) та 5—25% (рис. 4.10 d) відповідно.

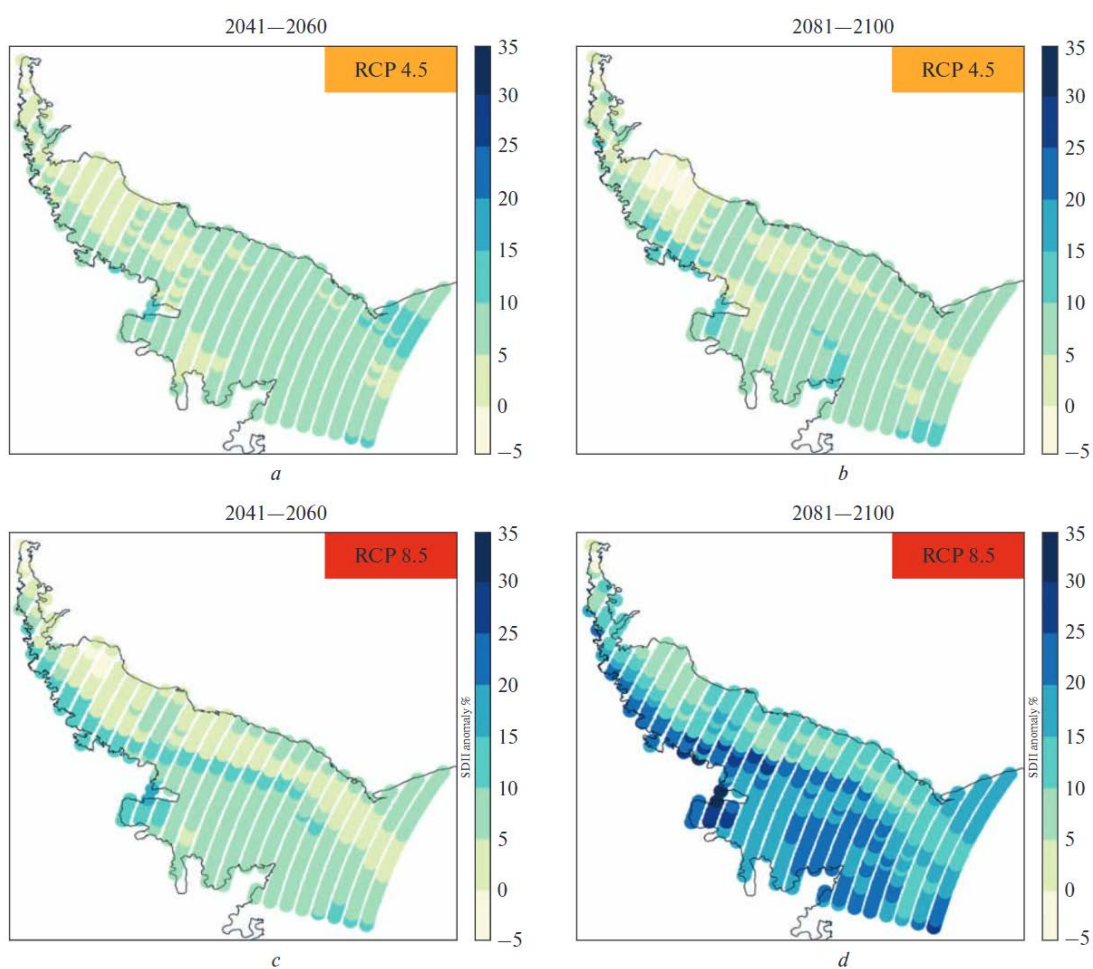


Рисунок 4.10. Просторовий розподіл середньої зміни SDII (%) для зазначених кліматичних періодів для сценаріїв RCP4.5 (а, b) та RCP8.5 (с, d)



Просторовий розподіл прогнозованих змін CWD, представлений на рис. 4.11, схожий на розподіли, що отримані для PRCPTOT та SDII. Зменшення CWD очікується в районі льодовика Ларсена та деяких інших районах східного узбережжя (підвітряні схили при переважаючих західних вітрах) за сценарієм RCP 4.5 (рисунок 4.11 a, b). Ці зміни становлять приблизно 10% з максимумом, що досягає 20% до кінця століття. У той же час для переважної частини регіону очікується також скорочення на 10% CDD (рис. 4.12 a, b).

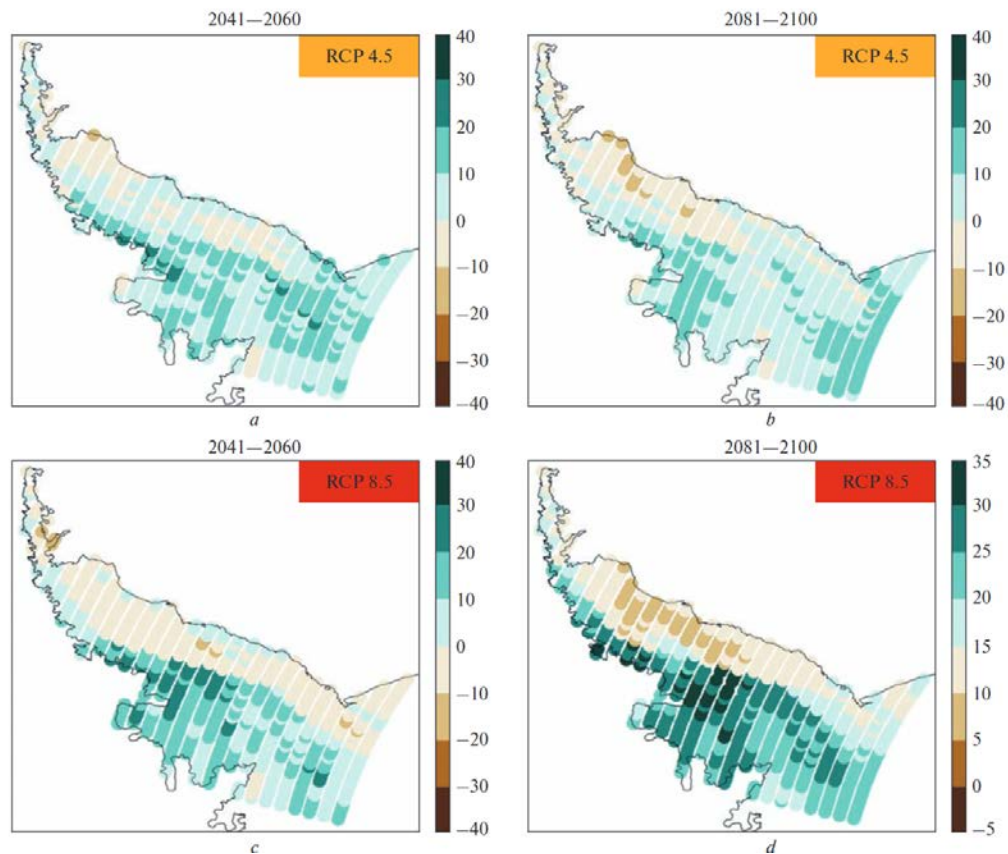


Рисунок 4.11. Просторовий розподіл середньої зміни CWD (%) для зазначених кліматичних періодів для сценаріїв RCP4.5 (a, b) та RCP8.5 (c, d)

Для решти півострова зростання тривалості CWD становить у середньому 10% з максимумами до 20% у деяких західних районах, що є переважно навітряними схилами гір (рис. 4.11 a, b). Для цих регіонів прогнозується, що тривалість CDD

скоротиться на 10%, з максимальним змінами приблизно на 20% у гірських регіонах до кінця століття (рис. 4.12 а, b).

Прогнозовані зменшення тривалості CWD за сценарієм RCP 8.5 є більш вираженими і становлять -10% (рис. 4.11 с) з максимумом, що досягає -20% (рис. 4.11 d) на східних підвітряних схилах гір та льодовику Ларсен. Для решти півострова, очікується зростання тривалості CWD на 10-20% з максимальними значеннями, що становитимуть до 30% у середині століття та до 40% впродовж останніх двадцяти років століття.

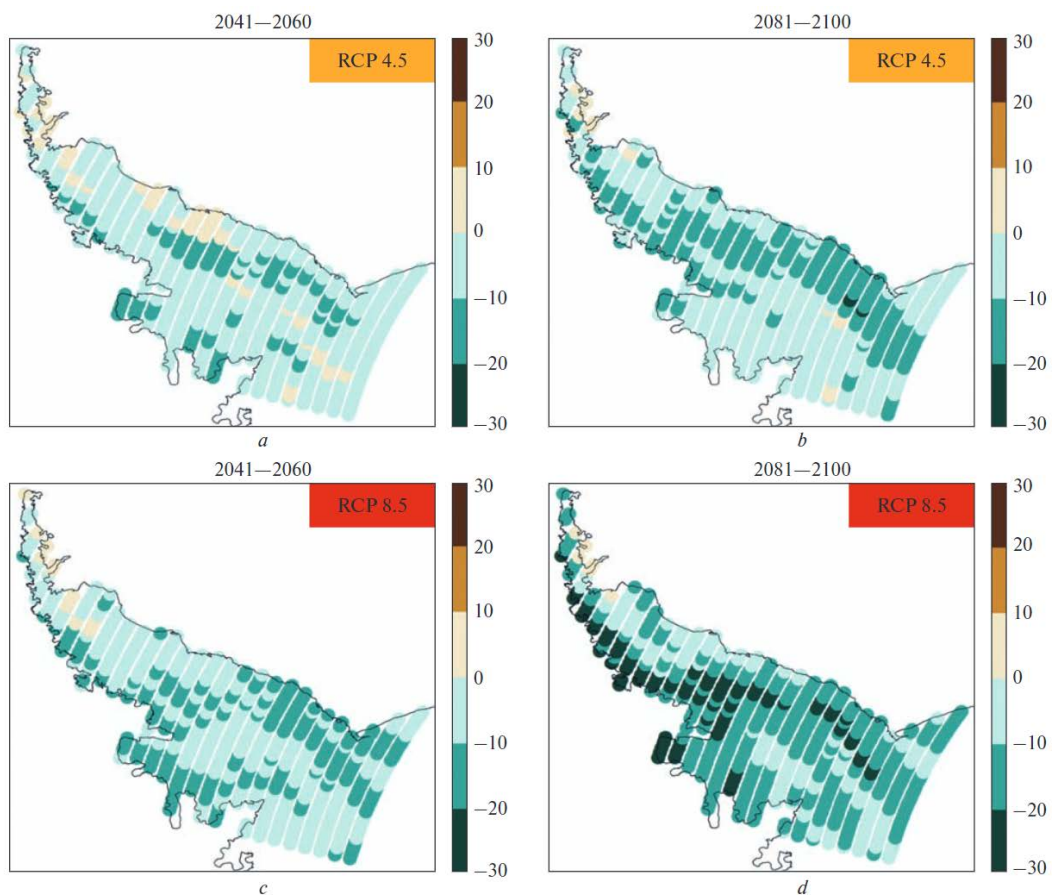


Рисунок 4.12. Просторовий розподіл середньої зміни CDD (%) для зазначених кліматичних періодів для сценаріїв RCP 4.5 (а, b) та RCP 8.5 (с, d)

У той же час, за сценарієм RCP 8.5 майже для всього півострова очікується скорочення тривалості CDD на 10-20% (рис. 4.12 с, d). Значення цих змін більші на навітряних західних схилах гір, де очікується, що максимальні значення досягатимуть 40% до кінця століття. Оскільки прогнозується, що CDD скоротиться на переважній площі півострова, потенційно можуть існувати субрегіони, де CWD і CDD будуть знижуватися одночасно (рис. 4.11 с, d і рис. 4.12 с, d), що може свідчити про зачну погодну мінливість у цих субрегіонах.

### **4.3. Зміна характеристик хмар та екстремальних опадів**

#### **4.3.1. Інтегральний вміст сконденсованої вологи і льоду в атмосфері**

У представленому дисертаційному дослідженні кліматичні аспекти хмар та опадів оцінено через дослідження інтегрованого вмісту льоду (IWP) та інтегрованого вмісту всієї сконденсованої вологи (CWP) у стовпі атмосфери. IWP та CWP є ключовими для розуміння поглинаючої здатності хмар, оптичної товщини та рівня випромінювання (Stephens, 1980; Platt & Harshvardhan, 1988; Platt, 1997; Heymsfield et al., 2003).

Відповідно до проєкцій за сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5 IWP та CWP (рис. 4.13) зросте в усьому регіоні Антарктичного півострова впродовж століття. Проте, прогнозовані зміни CWP набагато більші, ніж прогнозовані зміни IWP, що свідчить про те, що саме відносна частка рідкої фази води зросте у хмарах до кінця століття. Найбільш значні зміни очікуються в районі Землі Палмера, а найменші – на півночі Антарктичного півострова.

Варто відмітити, що IWP значно не змінюється впродовж століття відповідно до обох сценаріїв для півночі Антарктичного півострова. У той же час прогнозується, що CWP в цьому регіоні зросте на 10% за сценарієм RCP 4.5 та від 10% до 30% відповідно для RCP 8.5 впродовж століття, що також свідчить про зростання частки рідкої фази води у хмарах.

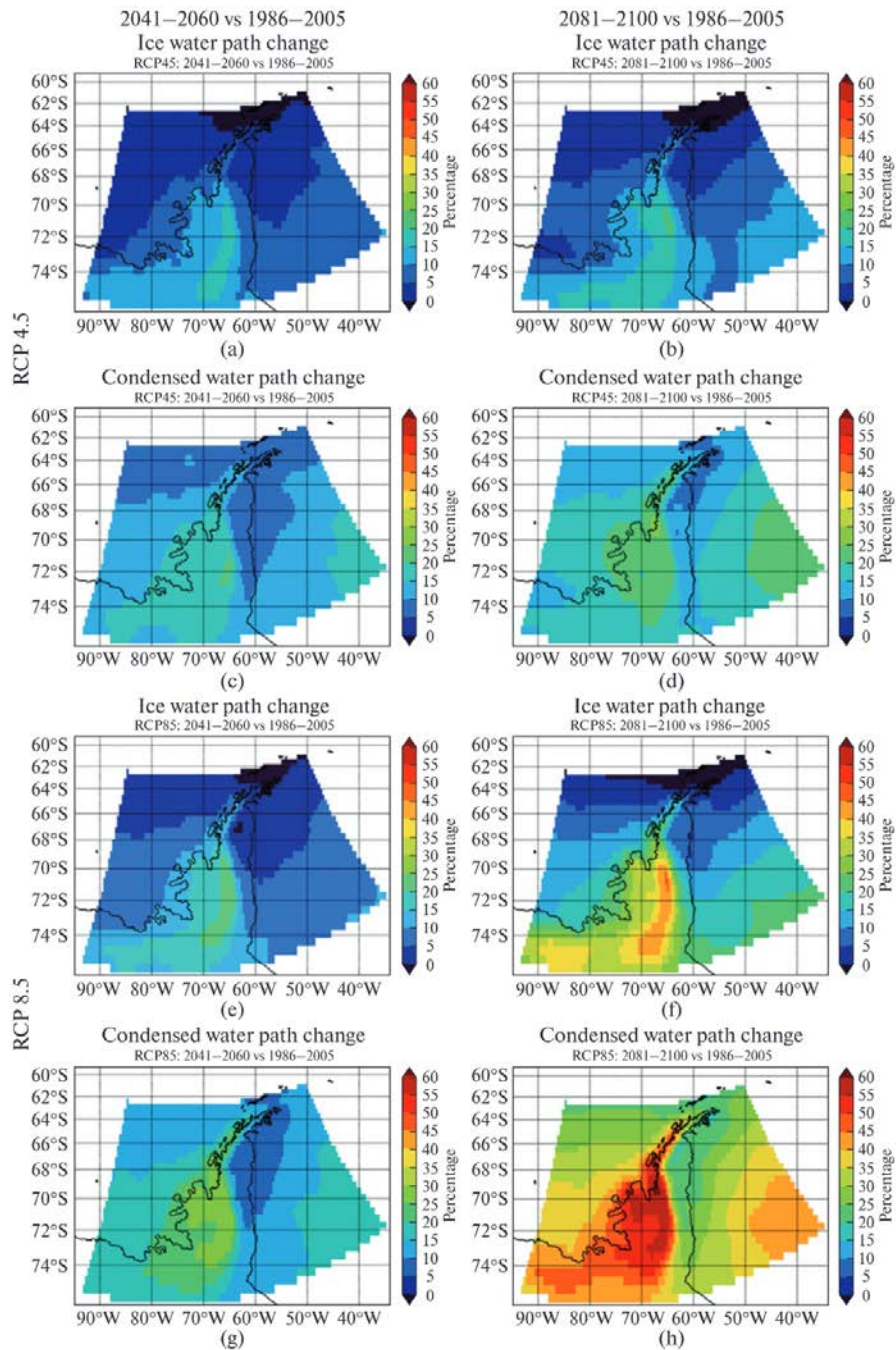


Рисунок 4.13. Ансамблева багаторічна середня зміна (%) відносно періоду 1986-2005 для ІВП (а, б, е, ф) та СВП (с, д, г, h) для 2041-2060 (а, с, е, г) та 2081-2100 (б, д, ф, г) відповідно до сценаріїв RCP 4.5 (а-с) та RCP 8.5 (е-h)

Для району Землі Палмера ІВП впродовж століття зросте на 20-25% і на 20-50% відповідно для сценаріїв RCP 4.5 та RCP 8.5 (рис. 4.13 а, б, е, ф). Також прогнозується

зростання IWP до кінця століття на 40% в районі Землі Елсуорта (рис. 4.13 f) за сценарієм RCP 8.5. Також для району Землі Палмера та Землі Елсуорта очікуване зростання CWP становитиме 20-30% (рис. 4.13 c, d) відповідно до сценарію RCP 4.5, та 25–55% відповідно до сценарію RCP 8.5 (рис. 4.13. g, h).

Зміна IWP в районі південної частини Тихого океану має зональний розподіл та зростає до 15% впродовж середини століття відповідно для обох сценаріїв (рис. 4.13 a, e). В районі моря Уедделла зміни є більш помітними, ніж ті, що очікуються в районі моря Беллінсгаузена, і досягають 25% до кінця століття за сценарієм RCP 8.5 (Рис. 4.13 f). CWP зросте в районі південної частини Тихого океану та моря Уедделла на 10-25% відповідно до RCP 4.5 та 15–50% відповідно до RCP 8.5 (Рис. 4.13 d, h). У цих районах зростання IWP та CWP мають схожі розподіли: зональний – в районі південної частини Тихого океану та переважно меридіональний, паралельний до Антарктичного півострова, в районі моря Уедделла.

На основі проведеного аналізу можна стверджувати, що зросте не тільки загальна кількість хмар в регіоні, але і рідка фаза у хмарах відповідно до співвідношення змін IWP та CWP. Але отримані кількісні оцінки IWP і CWP слід розглядати з обережністю, оскільки у дослідженні не виконувалась верифікація результатів розрахунків РКМ за будь-якими вимірюваннями в історичний період у зв'язку з їхньою відсутністю.

### **4.3.2. Рідка фаза опадів**

Оскільки було показано, що частка хмар з рідкою фазою буде збільшуватися, то й зокрема очікується, що зросте частка рідкої фази опадів із подальшим потеплінням в Антарктиді (Vignon et al., 2021). Тому в дослідженні було визначено частку рідких опадів у сумарних опадах для регіону Антарктичного півострова. Для початку було оцінено значення частки рідких опадів у багаторічних середніх сумарних значеннях опадів для історичного періоду 1986-2005 (рис. 4.14).

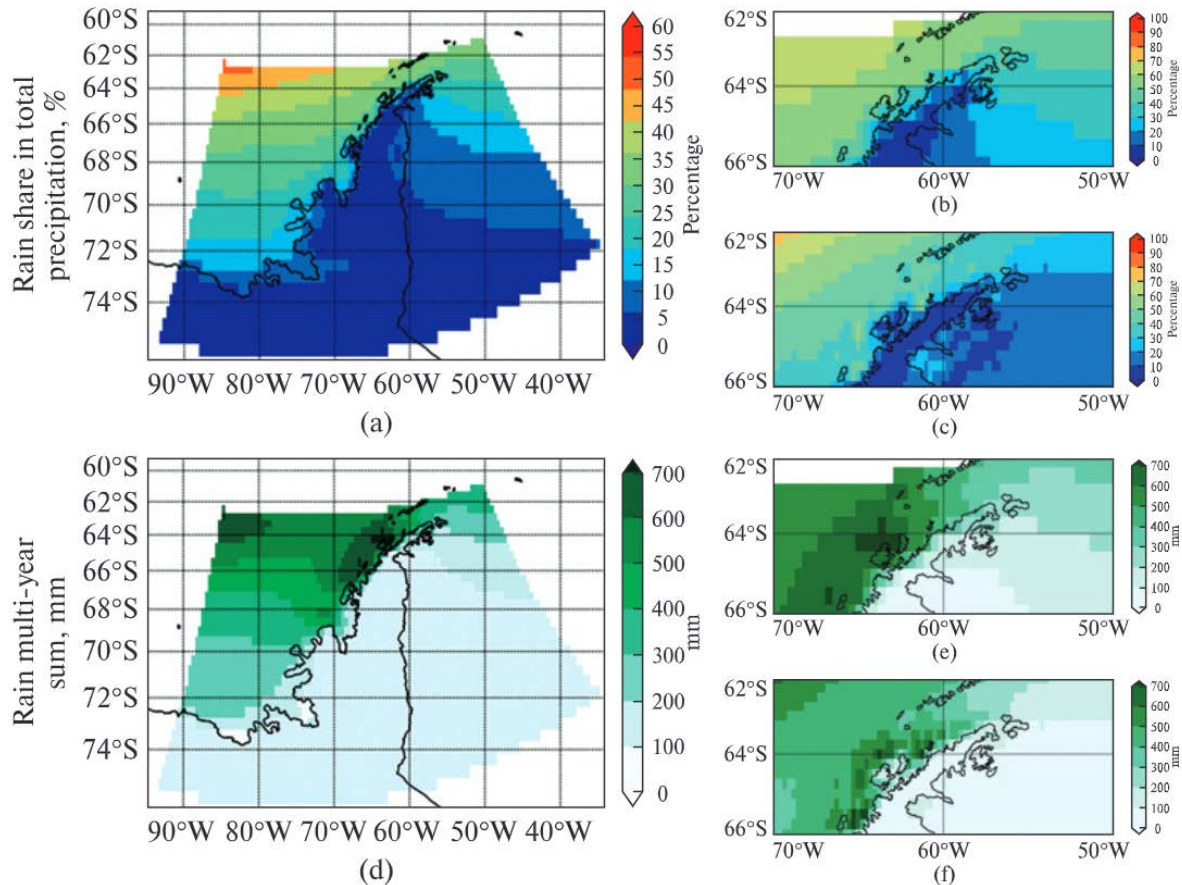


Рисунок 4.14. Частка рідкої фракції у сумарних річних опадах (а, b, c) та середня багаторічна сума дощу (d, e, f) за історичний період 1986-2005 для Антарктичного півострова (а, d) та північної частини півострова (b, c, e, f) відповідно за даними з Antarctic-CORDEX (а, b, d, e) та ERA5 (c, f)

Частка дощу у загальних опадах складає приблизно 50% в районі північної та північно-західної навітряної частини гір Антарктичного півострова (рис. 4.14 b). Вона менша для південно-західної навітряної частини гір і досягає 30% на західних схилах острову Олександра I (рис. 4.14 a). Частка дощу становить приблизно 10% в районі гір Антарктичного півострова, Землі Палмера та моря Уедделла (рис. 4.14 a). Частка рідких опадів порівняно невелика на схід від Антарктичного півострова для переважної частини моря Уедделла (рис 4.14 a). Вона становить приблизно 40% для північно-східної частини півострова, де розташована науково-дослідницькі станції

Есперанза (Esperanza) та Петрел (Petrel), та 20% для району, де знаходиться острів Джеймса Росса та розташована станція Мендель (Mendel) (рис 4.14 b).

Найбільша сума багаторічних рідких опадів була виявлена в регіоні, де розташовані станції «Академік Вернадський» і «Розера» (Rothera), між островами Анверс і Аделаїда на північному заході Антарктичного півострова. Для цього регіону річні суми опадів за історичний період становлять більше ніж 600 мм з максимумом, що досягає 700 мм в районі острова Анверс (рис. 4.14 e). При цьому для досліджуваного регіону Антарктичного півострова у цілому частка дощу в загальній кількості опадів розподіляється рівномірно з поступовим зменшенням на південний схід. Такий розподіл підкреслює, що територія між островами Анверс і Аделаїда має найбільшу кількість опадів за історичний період. Це може бути спричинено поєднанням у цьому районі орографічного ефекту та наявності переважаючого атмосферного потоку з Тихого океану, що має високий вміст вологи, а саме наявність високого гірського хребта, що розташований перпендикулярно до переважаючого атмосферного потоку. У той же час в північній частині півострова знаходяться порівняно нижчі гори, які розташовані більш паралельно до переважаючого атмосферного потоку, що згладжує прояв орографічного ефекту.

Частка дощу у сумарних опадах розрахована за даними історичного періоду міжнародної наукової ініціативи Antarctic-CORDEX (рис. 4.14 b, e) та порівняна з даними реаналізу ERA5 (рис. 4.14 c, f) для північної частини досліджуваного регіону, для якої було отримано максимальні багаторічні значення суми опадів. Загалом обидві характеристики в історичному періоді за даними Antarctic-CORDEX приблизно на 15-20% вищі за дані реаналізу ERA5. Варто відмітити, що дані ERA5 мають вище просторове розділення  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  та краще представляють регіональні особливості розподілу розглянутих параметрів. За даними ERA5 майже відсутні рідкі опади над північною частиною та підвітряними схилами півострова.

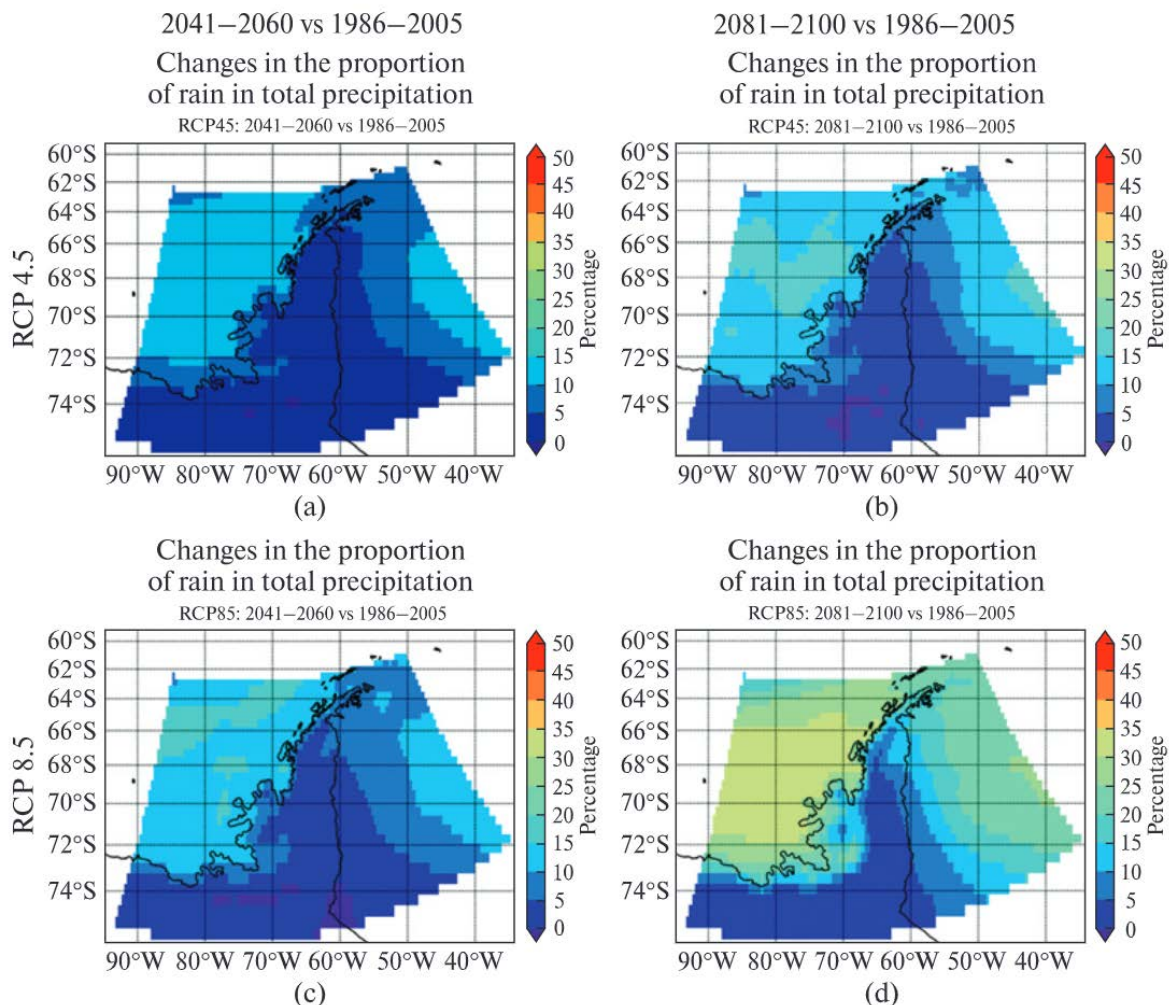


Рисунок 4.15. Зміна фракції рідких опадів у річній кількості опадів для періодів 2041–2060 (а, с) та 2081–2100 (b, d) відносно 1986–2005 за сценаріями RCP 4.5 (а, b) та RCP 8.5 (с, d)

Результати, отримані за даними ансамблю РКМ ініціативи Antarctic-CORDEX, свідчать про зростання рідкої частки опадів в усьому регіоні Антарктичного півострова за двома розглянутими сценаріями до кінця століття в порівнянні з історичним періодом (рис. 4.15). Найбільші зміни очікуються над океанами, найменші – над континентальною частиною регіону, південніше 65 пд.ш. Зміни, прогнозовані за сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5, схожі за характером та величиною для середини століття: 10-15% в районі південної частини Тихого океану та навітряних схилах



Антарктичного півострова, до 5% на переважній частині безпосередньо Антарктичного півострова та до 5-15% в районі моря Уедделла (рис. 4.15 а, с), та суттєво відрізняються на кінець століття (рис. 4.15 b, d). На основі отриманих результатів за характером розподілу змін рідкої частки опадів можна візуально виділити три райони: південна частина Тихого океану, Антарктичний півострів та море Уедделла .

Очікується, що над південною частиною Тихого океану впродовж століття частка дощу зросте до 15-20% (рис. 4.15 а, b) за сценарієм RCP 4.5, та до 30% між 65° та 72° пд.ш. за сценарієм RCP 8.5 (рис. 4.15 с, d). Схожий характер змін очікується для північної та північно-західної частини гір Антарктичного півострова.

Прогнозовані зміни частки дощу у сумарних опадах для моря Уедделла менші, ніж для південної частини Тихого океану. Вони варіюються від 5% до 15% для середини століття за обома сценаріями та від 5% до 30% до кінця століття відповідно до сценарію RCP 8.5 (рис. 4.15 d).

Найменші зміни частки рідких опадів до 5% прогнозуються для високогір'я Антарктичного півострова, Землі Палмера, Землі Елсуорта та частини моря Уедделла. Очікується, що західна частина моря Уедделла та підвітряного узбережжя Антарктичного півострова зазнають менших змін щодо частки дощу через меншу кількість сумарних опадів у цьому регіоні.

Зауважимо, що глобальна модель HadGEM2 від ініціативи CMIP5, яка використовується як початкові та граничні умови для РКМ KNMI-RACMO21R у цьому дослідженні, занижує кількість рідкої води у атмосферному стовпі над льодовиковим щитом Антарктики та Південним океаном (Рисунок S4 in Lenaerts et al., 2017). Тим не менш, у представленому дисертаційному дослідженні на рисунках 4.13 і 4.14 було використано співвідношення (зміну у %) прогнозованих і минулих значень, що означає, що було виключено більшість можливих систематичних відхилень в оцінці обраних параметрів для характеристик хмар та опадів. Хоча було

проаналізовано лише рідку фазу опадів, але висновки, отримані у попередніх наукових дослідженнях та оцінка кліматичних індексів у представленому аналізі, дозволяють мати високу впевненість у результатах, отриманих на основі РКМ CORDEX-CMIP5. Зокрема і через те, що отримані результати підтверджують попередні висновки про те, що кількість опадів та їхня рідка частка зростуть протягом XXI століття (Pörtner та ін., 2019; Gutiérrez та ін., 2021; Vignon та ін., 2021).

На основі результатів, отриманих у пункті 4.1 та 4.2 було обрано п'ять точок (POI – Point Of Interest), що представляють області регіону Антарктичного півострова, з різним режимом опадів та приземної температури повітря: станція «Академік Вернадський», що представляє навітряний схил гір (POI-1); район колишнього Льодовика Ларсен В, що представляє підвітряні схили гір (POI-5); точка 70° пд.ш., 65° зах.д. представляє умови над хребтом Антарктичного півострова (POI-3); і дві точки 70°S, 80°W (POI-2) і 70°S, 60°W (POI-4), що описують район морів Беллінсгаузена та Уедделла відповідно. Розподіл річної кількості рідких опадів та їхня частка в загальній кількості опадів у описаних локаціях показані на рис. 4.16 а та рис. 4.16 б, зліва направо.

Характеристики опадів сильно відрізняються в регіоні Антарктичного півострова. Більші річні суми рідких опадів і їхня частка в загальній кількості опадів очікуються на заході, а менші – на сході від Антарктичного півострова. Найнижчі значення та їхні зміни прогнозуються для гірського регіону (рис. 4.14–4.16).

Найбільше рідких опадів в річній сумі виявлено над районом станції «Академік Вернадський» (POI-1), а саме близько 310 мм для періоду 1986–2005 (рис. 4.14 d), збільшуючись до 700 мм і 1100 мм до кінця століття, за сценаріями RCP 4.5 і RCP 8.5 відповідно (рис. 4.16 а). За історичний період частка дощу становить близько 17% у загальній кількості опадів (рис. 4.14 б). Прогнозується, що ця частка зросте до 30% за сценарієм RCP 4.5 та до 42% за сценарієм RCP 8.5 (рис. 4.16 б).

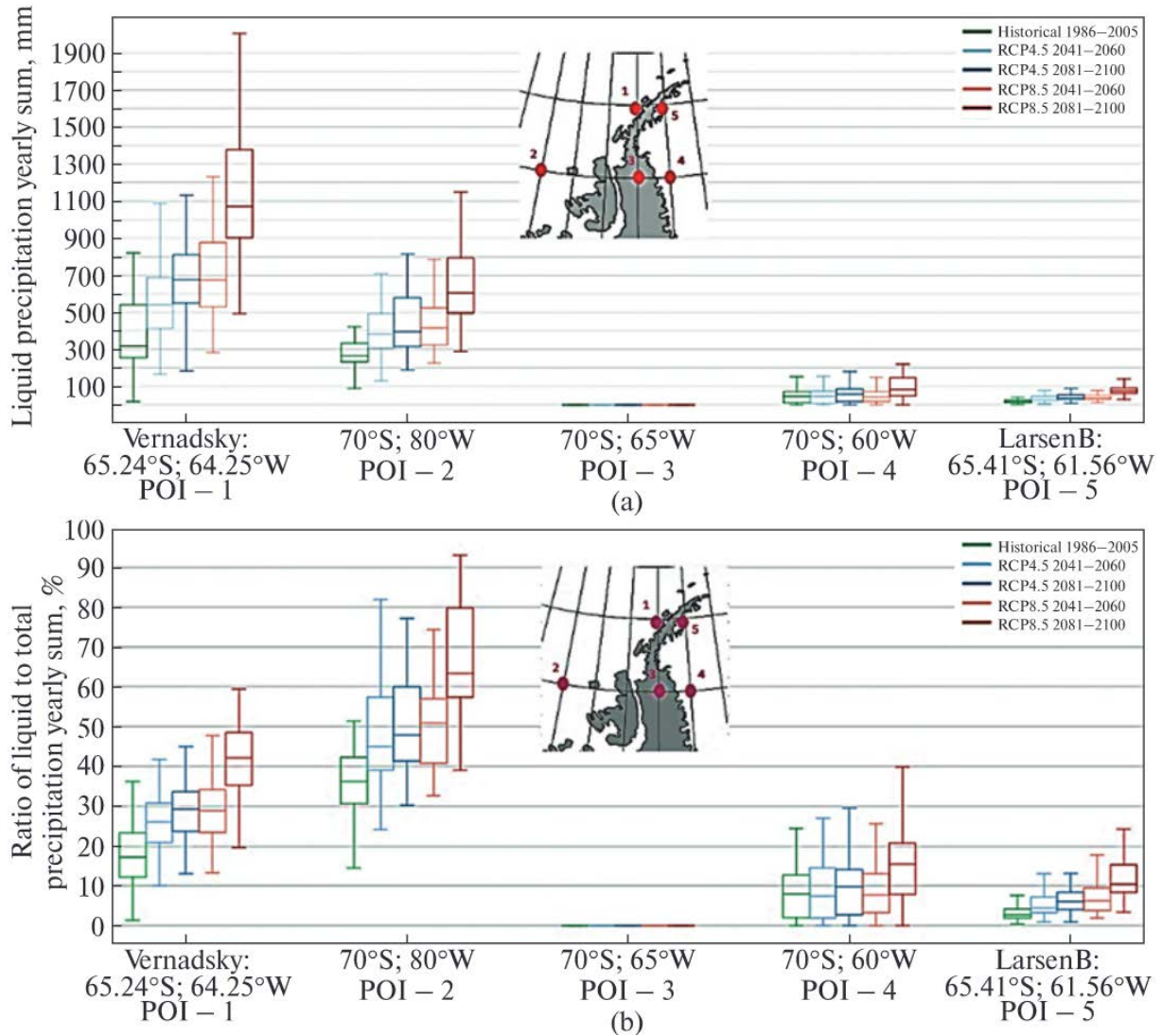


Рисунок 4.16. Розподіл річної суми рідких опадів (а) та їхньої частки у річних сумарних опадах (б) в історичний період та до кінця сторіччя для точок інтересу (POI) в регіоні Антарктичного півострова відповідно до ансамблю РКМ за сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5

Для точки, яка відповідає морю Беллінсгаузена (POI-2), отримано меншу річну кількість рідких опадів порівняно з районом станції «Академік Вернадський». Річна кількість рідких опадів становить близько 250 мм для 1986–2005 та 400 мм і 600 мм для RCP 4.5 і RCP 8.5 відповідно до кінця століття (рис. 4.16 а). Проте частка рідких опадів над морем Беллінсгаузена значно вища, ніж над районом станції «Академік

Вернадський». Вона становить 35% для історичного періоду, 45 і 49% для RCP 4.5 та 51 і 64% для RCP 8.5 на середину і кінець XXI століття відповідно (рис. 4.16 b).

Над морем Уедделла (POI-4) і районом Льодовика Ларсен В (POI-5) прогнозована річна кількість рідких опадів переважно залишиться незмінною. Річна сума рідких опадів у вигляді дощу зростає від 50 мм у історичний період до 95 мм до кінця століття на основі сценарію RCP 8.5 для регіону моря Уедделла (рис. 4.16 a). Це відповідатиме зміні частки дощу у сумарних опадах від 8% до 17% (рис. 4.16 b). Прогнозована річна кількість рідких опадів у регіоні Ларсен В збільшиться з 10 до 70 мм (або з 3% до 10% частки дощу у сумарних опадах) для історичного періоду та за сценарієм RCP 8.5 відповідно.

Згідно з отриманими результатами, протягом історичного періоду частка дощів над гірським регіоном (POI-3) невелика і до кінця століття її зростання не прогнозується (рис. 4.16).

### 4.3.3. Дуже сильні опади

Оскільки за розглянутими сценаріями очікується значне збільшення кількості опадів практично у всьому регіоні Антарктичного півострова і відомо про збільшення екстремальності випадання опадів в недавньому минулому і в сценаріях на майбутнє для інших регіонів планети, то в дослідженні також аналізувалась зміна екстремальності опадів. Зокрема, було розраховано майбутні прогнозовані значення 95 перцентилі розподілів добових сум опадів та їхні зміни порівняно з історичними періодом як індикатор зміни режиму дуже сильних опадів впродовж XXI століття за двома сценаріями.

В районі Антарктичного півострова значення 95го перцентилію не є однорідними у проєкціях за обома сценаріями на середину і кінець XXI ст. (рис. 4.17 a, b, e, f). Для західної навітряної частини Антарктичного півострова отримані більш високі значення, ніж для східної підвітряної частини та моря Уедделла, що свідчить про ефект посилення інтенсивності опадів орографічно через гірський хребет

півострова. Найвищі значення 95 перцентилю, 20–40 мм на добу, отримані для західного узбережжя Антарктичного півострова від 64° пд.ш. до 70° пд.ш. та для Землі Палмера та Елсуорта в районі 72°–74° пд.ш. Найменші добові суми опадів, що відповідають 95 перцентилю, становлять 15 мм/добу та отримані для океанічних районів регіону. Просторовий розподіл значень 95го перцентилю не змінюється суттєво до кінця століття за обома розглянутими сценаріями.

Для оцінки зміни режиму екстремальних опадів, було обрано показник що відповідав частці (%) днів у майбутньому періоді, коли значення добової суми опадів були вищим за значення 95го перцентилю у базовий період (рис. 4.17 с, d, g, h).

Найбільші зміни отримано над морем Уедделла та підвітряними схилами Антарктичного півострова, оскільки в базовий період в тому регіоні значення показника відносно низькі, непрямим підтвердженням чому є найнижчі інтенсивності опадів у регіоні (рис.4.7 b). Тому навіть незначне збільшення добової кількості опадів призводить до значних відносних змін показника. Прогнозується, що у цьому регіоні відсоток днів з опадами вище 95 перцентиля в історичний період збільшиться на 12–20%. На кінець століття, згідно зі сценарієм RCP 8.5, ці зміни будуть навіть більшими за 20% в районі моря Уедделла та північної частини шельфового льодовика Ронне (рис. 4.14 g, h). Найменше зростання кількості днів з екстремальними опадами, що перевищуватимуть історичні значення 95 перцентилю, спостерігається над тихоокеанським сектором Південного океану та північною околицею Антарктичного півострова, хоча в обидва періоди до кінця століття воно становитиме 10–12%. Тим не менш, над морем Беллінсгаузена зростання кількості днів з екстремальними опадами буде більш суттєвими, а саме 10–16% за RCP 4.5 (рис. 4.17 с, d) та 10–18% за RCP 8.5 (рис. 4.17 g, h).

Таким чином, отримані результати свідчать про те, що кількість екстремальних опадів збільшиться для всього регіону Антарктичного півострова до кінця століття за обома сценаріями порівняно з історичним періодом. Очікується, що відсоток днів з

опадями, що перевищують значення 95-го перцентилу в історичний період, неоднорідно змінюватиметься в районі Антарктичного півострова, де можна виділити дві зони: 64°пд.ш.–70°пд.ш. зі збільшенням на 8–14% і 70°пд.ш.–76°пд.ш. із збільшенням від 14% до понад 20%.

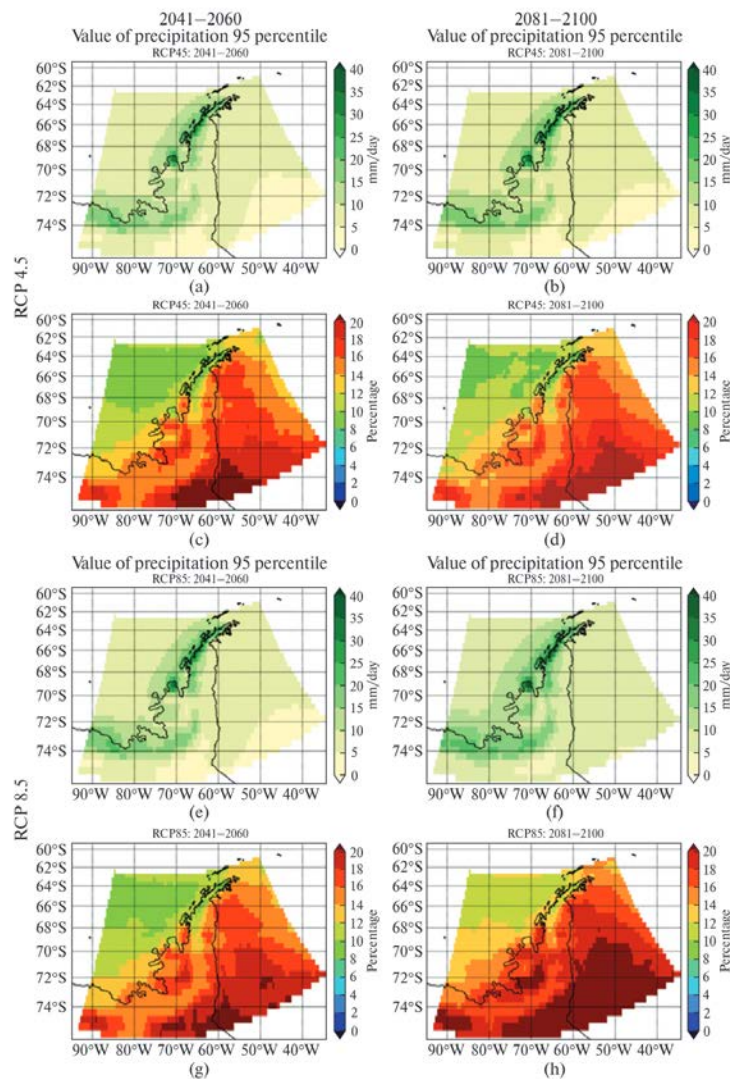


Рисунок 4.17. Значення 95го перцентилу суми опадів за добу (а, b, e, f) та частка періоду (%) з опадами більше 1 мм/день, коли опади вище відповідного історичного значення (c, d, g, h). Результати представлені для періодів 2041–2060 (а, c, e, g) та 2081–2100 (b, d, f, h) відповідно до сценаріїв RCP 4.5 (a–d) та RCP 8.5 (e–h).

## Підсумки четвертого розділу

У четвертому розділі дисертаційного дослідження представлено аналіз проєкцій кліматичних характеристик за ансамблем РКМ в районі Антарктичного півострова за двома сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5 для середини та кінця XXI століття.

**Аналіз температурного режиму холодного періоду року** для розуміння умов сталості кріосфери включав оцінку індексів ID та FD як зміну кількості днів із відповідно максимальною та мінімальною температурами повітря нижче за 0°C.

*Для регіону Антарктичного півострова* за обома сценаріями прогнозується, що кількість ID зменшиться на всьому Антарктичному півострові, що вказує на підвищення додатних температур, тобто скорочення тривалості холодного сезону у регіоні, що відповідає висновкам МГЕЗК та багатьом іншим сучасним дослідженням. На основі осереднених для Антарктичного півострова результатів значень РКМ можна стверджувати про зменшення кількості ID у середньому на 14 днів/рік за сценарієм RCP 4.5 та на 35 днів/рік за сценарієм RCP 8.5 до кінця століття. Кількість днів з максимальною температурою менше 0°C (ID) має тенденцію до більш швидкого зменшення, ніж кількість днів з мінімальною температурою менше за 0°C (FD). Згідно з результатами дослідження, кількість днів з додатною температурою значно збільшиться для східної частини Антарктичного півострова (льодовик Ларсена, східний схил гір) і для островів моря Беллінсгаузена (Анверс, Аделаїда), порівняно менше для Землі Ґреяма та Землі Палмера.. Зокрема, згідно зі сценарієм RCP 8.5 до середини століття в районі шельфового льодовика Ларсена очікується стрімке скорочення тривалості періоду з від'ємними температурами, що може спричинити його часткове або повне руйнування. Проте за сценарієм RCP 4.5 індекси FD та ID мають незначну зміну значень наприкінці століття порівняно з серединою століття, тобто температурний режим холодного періоду набуде ознак стаціонарності.

*Для району станції «Академік Вернадський»* отримані зміни розглянутих температурних кліматичних індексів майже втричі вищі, ніж усереднені значення для

Антарктичного півострова за обома сценаріями. Наприкінці століття середнє значення кількості ID зменшуються на  $-26 \div -60$  днів/рік та FD на  $-25 \div -55$  днів/рік за сценарієм RCP 4.5. До кінця століття кількість FD продовжить зменшуватися і за сценарієм RCP 8.5 скоротиться приблизно на  $-100$  днів/рік, при цьому темпи зниження ID вищі і приблизно дорівнюють двом дням за рік, коли середні значення скоротяться на  $-115$  днів/рік до кінця століття.

**Проаналізовано режим зволоження/посушливості** та його можливу зміну за індексами PRCPTOT, SDII, CDD та CWD. Особливості отриманих результатів для регіону Антарктичного півострова є безпосередній зв'язок розподілу PRCPTOT та SDII з орографією півострова, зокрема найбільше зростання суми опадів та їх інтенсивності очікується для переважно навітряних західних схилів гір півострова, де загалом тривалість CWD зростає, а тривалість CDD скорочується. Розподіл змін CWD у майбутньому більше, ніж CDD, пов'язаний з особливостями орографії, в той час як за результатами отриманими для CDD зростання очікується лише в кількох точках на східних схилах півострова. Зміни проаналізованих часових рядів параметрів режимів посушливості та зволоження в районі станції «Академік Вернадський» подібні до змін на всьому Антарктичному півострові. Такий характер змін є відмінним від тенденції зміни розглянутих температурних індексів, які мають більші значення і часову варіативність для станції «Академік Вернадський» у порівнянні з Антарктичним півостровом у цілому.

**Оцінено можливі зміни у фазовому складі хмар, частки рідких опадів у сумарних опадах та характер зміни режиму екстремальних опадів** в районі Антарктичного півострова. Результати аналізу *IWP та CWP*, представлені у цьому дослідженні, свідчать про збільшення не тільки загальної кількості хмар, але і частки рідкої фази у хмарах у досліджуваному регіоні. Прогнозується, що IWP збільшуватиметься переважно зонально, з максимальними змінами в районі Землі Палмера від  $70^\circ$  пд.ш до  $75^\circ$  пд.ш. Очікується, що CWP змінюватиметься більш



меридіонально з максимальними змінами в районі Землі Палмера і островом Олександра I, порівняно меншими змінами на схід від моря Уедделла, і мінімальними над східними схилами Антарктичного півострова.

Найбільше зростання *річної суми рідких опадів* до 1100 (700) мм, що становитиме 42% (30%) від загальної кількості опадів, отримано за сценаріями RCP 8.5 (RCP 4.5) до кінця сторіччя в районі станції «Академік Вернадський» порівняно з історичними значеннями 310 мм і 17%. При цьому, найбільшу частку рідких опадів у загальній кількості 64% (49%) відповідно до сценаріїв на кінець сторіччя отримано на захід від Антарктичного півострова порівняно з 35% в історичному періоді. Значно менше зростання кількості рідких опадів прогнозується для моря Уедделла та східних схилів Антарктичного півострова до 95 (70) мм, що складатиме 17% (10%) від усіх опадів порівняно з 8% в історичному періоді. Над горами Антарктичного півострова значного збільшення рідких опадів не очікується за обома сценаріями впродовж XXI сторіччя. Навіть якщо значна частка опадів становитиме тверду фазу, яка їх частина накопичуватиметься, залишається питанням, на яке можна відповісти лише завдяки широким польовим експериментам. Майбутні дослідження інших кліматичних показників можуть додати більше інформації, для точніших оцінок зміни балансу льоду/снігу в регіоні Антарктичного півострова.

Для всього регіону Антарктичного півострова зростатиме повторюваність *екстремальних опадів* з добовою кількістю опадів, що перевищує значення 95 перцентилля за історичний період. Найвищі значення показника 20–40 мм на добу отримані для західного узбережжя Антарктичного півострова від 64° пд.ш. до 70° пд.ш. та для Землі Палмера та Елсуорта в районі 72°–74° пд.ш. Найменші добові суми опадів, що відповідають 95 перцентиллю, становлять 15 мм/добу та отримані для океанічних районів регіону. Просторовий розподіл значень 95го перцентиллю не змінюється суттєво до кінця століття за обома розглянутими сценаріями, однак більші

відносні зміни очікуються на південний схід від Антарктичного півострова, де таких подій та значення показника у цілому за історичний період було менше.

Загалом зміни всіх розглянутих кліматичних параметрів наприкінці століття за сценарієм RCP 4.5 співставні зі змінами у середині століття за сценарієм RCP 8.5.

На основі отриманих результатів було проведено візуальний аналіз і **виділено декілька субрегіонів Антарктичного півострова** з різними проєкціями кліматичних умов за обома розглянутими сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5 (рис. 4.18):

*а. Східні схили Землі Грея і Землі Палмера:* зменшення кількості ID та FD та незначне збільшення кількості опадів та їхньої інтенсивності, скорочення тривалості CWD з найвищим рівнем потепління та посушливості для регіону шельфового льодовик Ларсена із значним зменшенням тривалості холодного періоду (за зміною ID та FD) одночасно з лише 10% зростанням кількості опадів.

*б. Західні схили хребтів, Земля Грея і Земля Палмера:* максимальне прогнозоване збільшення кількості опадів і порівняно низьке зменшення кількості ID та FD одночасно з суттєвим скороченням тривалості CDD та зростанням тривалості CWD. Навітряна сторона на півночі Антарктичного півострова між станціями «Академік Вернадський» і «Розера» має найбільшу річну кількість рідких опадів у досліджуваному регіоні впродовж XXI століття із помірним зростанням IWP та CWP.

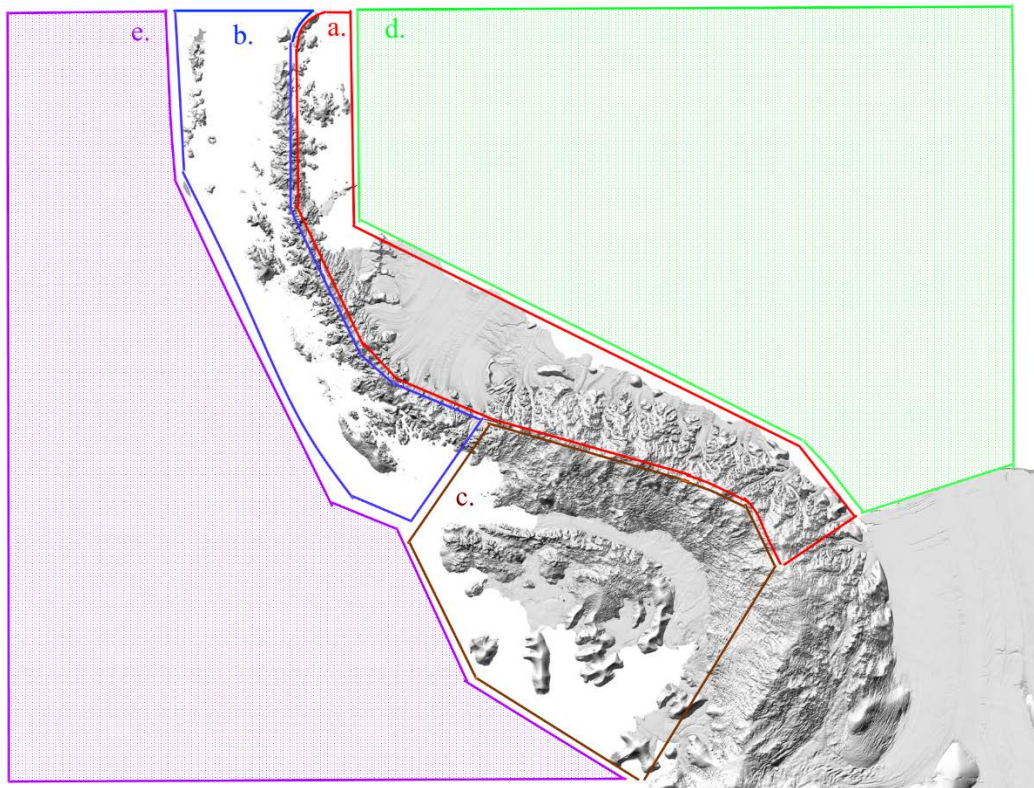


Рисунок 4.18. Субрегіони Антарктичного півострова з різними прогнозованими змінами кліматичних умов: східні схили Землі Греяма і Землі Палмера (a); західні схили хребтів, Земля Греяма і Земля Палмера (b); західне узбережжя та острови, включаючи Острів Олександра I та протоку Георга VI (c); море Уедделла (d); південна частина Тихого океану (e)

*c. Західне узбережжя та острови, включаючи Острів Олександра I та протоку Георга VI:* збільшення суми опадів та їх інтенсивності, зростання тривалості CWD, скорочення тривалості CDD, найвище збільшення PRCPTOT і SDP з одночасним прогнозованим одним із найвищих зменшенням кількості ID та FD. Найменша кількість опадів і їх рідкої частки без істотної зміни режиму опадів за проєкціями, але найбільше в досліджуваному регіоні зростання IWP та CWP.

*d. Море Уедделла:* зміни IWP мають розподіл, паралельний до Антарктичного півострова з найбільшими значеннями на півдні, де зміни CWP сягають максимуму на південному сході до мінімуму на північному сході моря. Значення 95 процентиля

становить 5–10 мм/добу до кінця століття для обох періодів з найнижчими значеннями на півдні регіону, де очікується найбільші відносні зміни в кількості днів із екстремальними опадами, одночасно із значно меншою кількістю днів з опадами у цілому, ніж в інших частинах регіону.

***е. Південна частина Тихого океану:*** має високу річну суму опадів і найбільшу частку дощу в загальній кількості опадів, найбільше збільшення частки рідких опадів порівняно з історичним періодом.

Не можна стверджувати, що певний виділений субрегіон зазнає найбільшої зміни клімату порівняно з іншими, оскільки прояви зміни клімату неоднорідні в регіоні Антарктичного півострова, і вони потенційно вливатимуть на екосистему регіону по різному, наприклад, через потенційне зменшення площі морського льоду, збільшення відкритих ділянок суші і зменшення льодовикової маси, розпріснення прибережних вод внаслідок збільшення рідких опадів і/або танення верхнього шару континентального льоду. Оскільки потенційні зміни у циркуляції атмосфери та океану по різному впливатимуть на прояв зміни клімату в регіоні, питання визначення найбільш вразливих до зміни клімату ділянок потребує подальшого вивчення. У подальшому аналіз проєкцій зміни клімату та інформації про товщину льоду у кожному окремому регіоні дозволить оцінити потенційні зміни кріосфери та визначити території, які більш вразливі до потепління клімату.

Результати дослідження, що представлені у четвертому розділі опубліковано у працях за участі автора (Chyhareva et. al. 2019a, 2019b, 2022; Krakovska & Chyhareva 2023; Mottram et. al. 2023a, 2023b) та пройшли апробацію на трьох міжнародних конференціях.

## ВИСНОВКИ

1. Сформовано сучасний методичний підхід до аналізу кліматичних характеристик режиму хмарності та опадів, а також спеціалізованих кліматичних характеристик термічного режиму холодного періоду і режиму зволоження/посушливості для полярних регіонів. Апробовано метод 3D візуалізації для аналізу процесів формування хмар та опадів в районі Антарктичного півострова. Визначено оптимальну конфігурацію регіональної числової моделі Polar WRF для проведення моделювань з високою роздільною здатністю для аналізу випадків з високою інтенсивністю опадів зі зміною їхньої фази для регіону Антарктичного півострова.
2. За даними реаналізу виявлено, що для розглянутих випадків інтенсивних опадів у літній, зимовий та перехідний періоди характерно розташування глибокого циклону у морі Амундсена з подальшим формуванням у його північному секторі улоговини, що простягається до помірних широт, та приземного циклону біля узбережжя Північної Америки, близько  $60^{\circ}$  пд.ш.,  $90^{\circ}$  зх.д., що посилює перенесення теплого, насиченого вологою повітря у бік Антарктичного півострова. В результаті проведеного вперше комплексного аналізу випадку інтенсивних опадів взимку 2022 року виявлено мінімум атмосферного тиску на рівні моря 918 гПа в центрі такого глибокого циклону у морі Амундсена.
3. За даними моделювання Polar WRF виявлено:
  - наявність орографічного підсилення опадів і формування хмар, а саме утворення осередків на висоті від 2 до 4 км над навітряною західною частиною гір з максимальними масовими концентраціями кристалів та крапель до 1 г/кг;
  - характеристики і висоту переважаючих атмосферних потоків, зокрема максимальні горизонтальні швидкості вітру спостерігалися над станцією

«Академік Вернадський» під час випадку у перехідний сезон у шарі від 8 до 10 км та становили 60 м/с;

- *моменти настання та протяжність областей додатних температур повітря* внаслідок надходження теплих повітряних мас чи утворення фенових ефектів у районі бухти льодовика Ларсен В, зокрема для розглянутих випадків характерне короткочасне потепління до  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  з навітряного боку гір до висоти 500-700 м до та під час інтенсивних опадів, в той час як для підвітряного схилу гір характерне тривале потепління до  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$  у шарі до 1,5 (іноді 2,5) км.
4. Визначено кількісні різниці у розподілі кристалів та крапель у хмарах з навітряного та підвітряного схилів гір; кількісні особливості розподілу кристалів та крапель під час, до та після моментів настання максимальної інтенсивності опадів. Отримано якісну різницю у вертикальному розподілі часточок та кількісні відмінності у розподілі масової концентрації водяної пари для різних випадків інтенсивних опадів зимового і перехідного сезонів
  5. На основі комплексного аналізу проєкцій характеристик полярних хмар та опадів в регіоні Антарктичного півострова за найбільш актуальними даними РКМ проєкту Polar CORDEX було оцінено зміну розглянутих кліматичних параметрів, а саме:
    - Для всього регіону Антарктичного півострова зростатиме повторюваність екстремальних опадів з добовою кількістю, що перевищує значення 95 процентиля в історичний період. Найвищі значення показника 20–40 мм на добу отримані для західного узбережжя Антарктичного півострова від  $64^{\circ}$  пд.ш. до  $70^{\circ}$  пд.ш. та для Землі Палмера та Елсуорта в районі  $72^{\circ}$ – $74^{\circ}$  пд.ш.
    - Для переважної території регіону зростатиме річна сума рідких опадів, за винятком гір Антарктичного півострова. Найбільше зростання річної суми рідких опадів до 1100 (700) мм, що становитиме 42% (30%) від загальної кількості опадів, отримано за сценаріями RCP 8.5 (RCP 4.5) до кінця сторіччя

в районі станції «Академік Вернадський» порівняно з історичними значеннями 310 мм і 17%.

- Прогнозується, що за сценарієм RCP 4.5 (RCP 8.5) IWP збільшуватиметься переважно зонально з максимальними змінами на 25% (50%) в районі Землі Палмера від 70° пд.ш до 75° пд.ш; CWP змінюватиметься більш меридіонально з максимальними змінами 30% (60%) в районі Землі Палмера і островом Олександра I, порівняно меншими змінами на схід від моря Уедделла, і мінімальними над східними схилами Антарктичного півострова. Отримані результати свідчать про збільшення не тільки загальної кількості хмар, але і частки рідкої фази у хмарах у досліджуваному регіоні.
  - На кінець століття в середньому для півострова за сценарієм RCP 4.5 (RCP 8.5) PRCPTOT зросте на 17% (40%) до кінця століття; CWD зросте на 10% (15%); CDD зменшиться на 10% (15%).
  - Кількість днів з максимальною/мінімальною температурою повітря менше за 0°C зменшуватиметься для Антарктичного півострова, і в середньому на кінець XXI століття кількість ID становитиме  $327 \pm 3$  ( $310 \pm 5$ ) днів/рік, у той час як індекс FD зменшуватиметься повільніше і становитиме  $352 \pm 1$  ( $346 \pm 4$ ) днів/рік за сценарієм RCP 4.5 (RCP 8.5).
6. Визначено та охарактеризовано п'ять субрегіонів Антарктичного півострова за зміною у майбутньому 10ти кліматичних показників, що були проаналізовані: (1) Східні схили Землі Греяма і Землі Палмера; (2) Західні схили хребтів, Земля Греяма і Земля Палмера; (3) Західне узбережжя та острови, включаючи Острів Олександра I та протоку Георга VI; (4) Море Уедделла; (5) Південна частина Тихого океану.
7. Отримані результати можуть бути використані для покращення прогнозу інтенсивних опадів, а отже планування безпечніших експедиційних місій та навігації у регіоні; для визначення мас-балансу льодовиків, формування

поверхневого стоку та інших процесів в регіоні Антарктичного півострова, а також у помірних широтах, наприклад для випадків інтенсивних снігопадів в Україні, а також як база для досліджень у суміжних наукових галузях, наприклад впливу на екосистеми і для оцінки зміни біорізноманіття в регіоні.



**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Abrams, M., Crippen, R., & Fujisada, H. (2020). ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). *Remote Sensing*, 12(7), 1156. <https://doi.org/10.3390/rs12071156>
2. Agosta, C., Fettweis, X., & Datta, R. (2015). Evaluation of the CMIP5 models in the aim of regional modelling of the Antarctic surface mass balance. *The Cryosphere*, 9(6), 2311–2321. <https://doi.org/10.5194/tc-9-2311-2015>
3. Bedia, J., San-Martín, D., Iturbide, M., Herrera, S., Manzanas, R., Gutiérrez, J.M. 2019. The METACLIP semantic provenance framework for climate products. *Environmental Modelling & Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.07.005>.
4. Bennartz, R., Shupe, M. D., Turner, D. D., Walden, V. P., Steffen, K., Cox, C. J., Kulie, M. S., Miller, N. B., & Pettersen, C. (2013). July 2012 Greenland melt extent enhanced by low-level liquid clouds. *Nature*, 496, 83–86. <https://doi.org/10.1038/nature12002>
5. Bonekamp, P. N. J., E. Collier, and W. W. Immerzeel, 2018: The Impact of Spatial Resolution, Land Use, and Spinup Time on Resolving Spatial Precipitation Patterns in the Himalayas. *J. Hydrometeor.*, 19, 1565–1581, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0212.1>.
6. Bony, S., Stevens, B., Frierson, D. M. W., Jakob, C., Kageyama, M., Pincus, R., Shepherd, T. G., Sherwood, S. C., Siebesma, A. P., Sobel, A. H., Watanabe, M., & Webb, M. J. (2015). Clouds, circulation and climate sensitivity. *Nature Geoscience*, 8, 261–268. <https://doi.org/10.1038/ngeo2398>
7. Bozkurt, D., Bromwich, D. H., Carrasco, J., & Rondanelli, R. (2021). Temperature and precipitation projections for the Antarctic Peninsula over the next two decades: Contrasting global and regional climate model simulations. *Climate Dynamics*, 56, 3853–3874. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05667-2>

8. Bozkurt, D., Bromwich, D. H., Carrasco, J., Hines, K. M., Maureira, J. C., & Rondanelli, R. (2020). Recent near-surface temperature trends in the Antarctic Peninsula from observed, reanalysis and regional climate model data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 477–493. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9183-x>
9. Bracegirdle, T. J., Krinner, G., Tonelli, M., Haumann, F. A., Naughten, K. A., Rackow, T., Roach, L. A., & Wainer, I. (2020). Twenty first century changes in Antarctic and Southern Ocean surface climate in CMIP6. *Atmospheric Science Letters*, 21(9), e984. <https://doi.org/10.1002/asl.984>
10. Bromwich, D. H., Nicolas, J. P., Hines, K. M., Kay, J. E., Key, E. L., Lazzara, M. A., Lubin, D., McFarquhar, G. M., Gorodetskaya, I. V., Grosvenor, D. P., Lachlan-Cope, T., & van Lipzig, N. P. M. (2012). Tropospheric clouds in Antarctica. *Reviews of Geophysics*, 50(1), RG1004. <https://doi.org/10.1029/2011RG000363>
11. Bromwich, D. H., Otieno, F. O., Hines, K. M., Manning, K. W., & Shilo, E. (2013). Comprehensive evaluation of polar weather research and forecasting model performance in the Antarctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(2), 274–292. <https://doi.org/10.1029/2012jd018139>
12. Bromwich, D. H., Werner, K., Casati, B., Powers J. G., Gorodetskaya, I. V., Massonnet, F., Vitale, V., Heinrich, V. J., Liggett, D., Arndt, S., Barja, B., Bazile, E., Carpentier, S., Carrasco, J. F., Choi, T., Choi, Y., Colwell, S. R., Cordero, R. R., Gervasi, M., & Zou, X. (2020). The Year of Polar Prediction in the Southern Hemisphere (YOPP-SH). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(10), E1653–E1676. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0255.1>
13. Bromwich, D.H., Hines, K.M., & Bai, L.S. (2009). Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D08), 122. <https://doi.org/10.1029/2008JD010300>
14. Cannon, F., Carvalho, L.M.V., Jones, C., Norris, J., Bookha-gen, B., Kiladis, G. N. 2017. Effects of topographic smoo-thing on the simulation of winter precipitation

- in High Mountain Asia, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 122, 1456–1474, <https://doi.org/10.1002/2016jd026038>.
15. Carrasco, J. F. & Cordero, R. R. (2020). Analyzing Precipitation Changes in the Northern Tip of the Antarctic Peninsula during the 1970–2019 Period. *Atmosphere*, 11(12), 1270. <https://doi.org/10.3390/atmos11121270>
16. Christensen, O. B., Drews, M., Hesselbjerg Christensen, J., Dethloff, K., Ketelsen, K., Hebestadt, I., Rinke, A. 2007. The HIRHAM Regional Climate Model. Version 5 (beta). Danish Climate Centre, Danish Meteorological Institute. Denmark. Danish Meteorological Institute. Technical Report, 06—17.
17. Chyhareva A., Gorodetskaya I., Luis D., Wille J., Passalacqua G., Krakovska S., Cloud and precipitation microphysics during atmospheric river events at the Antarctic Peninsula». Virtual Symposium by the International Atmospheric Rivers Conference (IARC) Community (5-9 жовтня 2020), Book of Abstracts
18. Chyhareva A., Krakovska S., Pishniak D. Climate projections over the Antarctic Peninsula region to the end of the 21st century. Part I: cold temperature indices. *Ukrainian Antarctic Journal*, 2019a. № 1(18), p. 45—57, DOI: [https://doi.org/10.33275/1727-7485.1\(18\).2019.131](https://doi.org/10.33275/1727-7485.1(18).2019.131).
19. Chyhareva A., Krakovska S., Pishniak D. Climate projections over the Antarctic Peninsula region to the end of the 21st century. Part II: wet/dry indices. *Ukrainian Antarctic Journal* 2019b. № 2 (19), p.47 – 63, DOI: [https://doi.org/10.33275/1727-7485.2\(19\).2019.151](https://doi.org/10.33275/1727-7485.2(19).2019.151).
20. Chyhareva A., S. Krakovska, I. Gorodetskaya, D. Pishniak. Preliminary results of PolarWRF application for cloud and precipitation study at Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station». X International Antarctic Conference (Kyiv, Ukraine, May 11-13, 2021c). Book of Abstracts <http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Abstracts-X-IAC-2021.pdf>

21. Chyhareva, A., & Krakovska, S. (2022). Climate projections over the Antarctic Peninsula region to the end of the 21st century. Part III: clouds and extreme precipitation. *Ukrainian Antarctic Journal*, 20(2), 188–202. DOI: <https://doi.org/10.33275/1727-7485.2.2022.699>
22. Chyhareva, A., I. V. Gorodetskaya, S. Krakovska, D. Pishniak, P. Rowe. Precipitation phase transition in austral summer over the Antarctic Peninsula *Ukrainian Antarctic Journal*, 2021a. № 1(2021), DOI: <https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2021.664> ст. 32-46
23. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S. (2023): PolarWRF microphysics' schemes sensitivity to cloud droplets concentration in the Antarctic Peninsula region, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4618>.
24. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S. Year of Polar Prediction in the Southern Hemisphere at Vernadsky station: Preliminary results on cloud characteristics from the radiosounding measurements and modelling. XI International Antarctic Conference (Kyiv, Ukraine, May 10-12, 2023b) Book of Abstracts [http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts\\_IAC-11\\_2023\\_.pdf](http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts_IAC-11_2023_.pdf)
25. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Gorodetskaya, I., and Palamarchuk, L.: Cloud and precipitation profiles from observations and Polar-WRF simulations over Vernadsky station (western Antarctic Peninsula) during austral winter 2022, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-667, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-667> , 2023a.
26. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Gorodetskaya, I., Pishniak, D., Wille, J., and Rowe, P.: Cloud and precipitation microphysics evaluated with ERA-5 and Polar WRF over the northern Antarctic Peninsula, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13058, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13058>, 2021 b

27. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Palamarchuk, L., and Gorodetskaya, I.: Mixed cloud properties during high-intensity precipitation events over Northern Antarctic Peninsula, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10388, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10388> , 2022.
28. Convey, P., Smith, R.I.L. 2005. Responses of terrestrial Antarctic ecosystems to climate change. In: Rozema J., Aerts R., Cornelissen H. (eds) *Plants and Climate Change. Tasks for vegetation science*, 41. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4443-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4443-4_1).
29. Dai, A. (2008). Temperature and pressure dependence of the rain-snow phase transition over land and ocean. *Geophysical Research Letters*, 35(12), L12802. <https://doi.org/10.1029/2008GL033295>
30. Deb, P., Orr, A., Hosking, J. S., Phillips, T., Turner, J., Bannister, D., Pope, J. O., & Colwell, S. (2016). An assessment of the Polar Weather Research and Forecasting (WRF) model representation of near-surface meteorological variables over West Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(4), 1532–1548. <https://doi.org/10.1002/2015jd024037>
31. Dethloff, K., Glushak, K., Rinke, V., Handorf, D. 2010. Antarctic 20th Century Accumulation Changes Based on Re-gional Climate Model Simulations. *Advances in Meteorology*, ID 327172, 14. <https://doi.org/10.1155/2010/327172>.
32. Doblus-Reyes, F.J., A.A. Sörensson, M. Almazroui, A. Dosio, W.J. Gutowski, R. Haarsma, R. Hamdi, B. Hewitson, W.-T. Kwon, B.L. Lamptey, D. Maraun, T.S. Stephenson, I. Takayabu, L. Terray, A. Turner, and Z. Zuo, 2021: Linking Global to Regional Climate Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O.

- Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1363–1512, doi: 10.1017/9781009157896.012.
33. Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two–Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(20), 3077–3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
34. Durán-Alarcón C., Gorodetskaya I., **Chyhareva A.**, Rowe P., Zou X., Dutrievoz N., Krakovska S., Afteniuk O., Favier V., Campos D, Cordero R., Cabello F., Jiménez-Sánchez G., Chicaeme K.: Rainfall and snowfall during two strong atmospheric river events in the Antarctic Peninsula in summer 2022: characterization and evaluation of impact on surface mass balance. International Atmospheric River Conference 2022 [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf)
35. Dutrievoz N, Gorodetskaya I., Durán-Alarcón C., Santos C. L.-D., **Chyhareva A.**, Krakovska S, Agosta C., Fourre E., Landais A., Wille J., Favier V., Dethinne. T., Kittel C.: Summer atmospheric rivers during February 2022 at the Antarctic Peninsula: large-scale circulation, moisture sources and precipitation. International Atmospheric River Conference 2022. [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf)
36. Dutrievoz, N., Agosta, C., Nguyen, S., Risi, C., Vignon, E., Landais, A., Leroy-Dos Santos, C., Fourné, E., Cauquoin, A., Werner, M., Gorodetskaya, I., **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Minster, B., Prié, F. (2023): An observational benchmark for water isotope-enabled atmospheric general circulation models in Antarctica, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4358>.

37. Feng, X., Liu, C., Xie, F., Lu, J., Chiu, L.S., Tintera, G., Chen, B. 2019. Precipitation characteristic changes due to global warming in a high-resolution (16 km) ECMWF simulation. *Q J R Meteorol Soc*, 145 (718), 303—317. <https://doi.org/10.1002/qj.3432>.
38. Giorgi, F., Gutowski, W.J. 2015. “Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative”. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 1. 467–490
39. Gonzalez, S., Vasallo, F., Recio-Blitz, C., Guijarro, J. A., & Riesco, J. (2018). Atmospheric Patterns over the Antarctic Peninsula. *Journal of Climate*, 31(9), 3597—3608. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0598.1>
40. Gorodetskaya I., Zou X., Durán-Alarcón C., Rowe P., González-Herrero S., Dutrievoz1 N., Imazio P., Wille J., Park S., Campos D., Cordero R., Carrasco J., Colwell S., Gulisano A., **Chyhareva A.**, Krakovska S., Ralph F.M.: Summer 2022 temperature extremes at the Antarctic Peninsula triggered by a strong atmospheric river and foehn. International Atmospheric River Conference 2022 [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf)
41. Gorodetskaya, I. V., Rowe, P. M., Kalesse, H., Silva, T., Hirasawa, N., Schmithüsen, H., Seifert, P., Park, S.-J., Choi, Y., & Cordero, R. R. (2020b). The vertical structure of atmospheric rivers and their impact in the Atlantic sector of Antarctica from the Year of Polar Prediction observations. EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-20313. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-20313>
42. Gorodetskaya, I. V., Silva, T., Schmithüsen, H. & Hirasawa, N. (2020a). Atmospheric River Signatures in Radiosonde Profiles and Reanalyses at the Dronning Maud Land Coast, East Antarctica. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 455–476. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9221-8>
43. Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., D’Angiola, A., van der Gon, H.D., Frost, G., Heil, A., Kainuma, M., Kaiser, J., Kinne, S., Klimont, Z., Kloster, S., Lamarque, J-F.,

- Liousse, C., Matsui, T., Meleux, F., Mieville, A., Ohara, T., Raihi, K., Schultz, M., Smith, S.J., Thomson, A.M., van Aardenne, J., van der Werf, G. 2011. Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980– 2010 period. *Climatic Change*, 109: 163—190. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0154-1>.
44. Gutiérrez, J. M., Jones, R. G., Narisma, G. T., Alves, L. M., Amjad, M., Gorodetskaya, I. V., Grose, M., Klutse, N. A. B., Krakovska, S., Li, J., Martínez-Castro, D., Mearns, L. O., Mernild, S. H., Ngo-Duc, T., van den Hurk, B., & Yoon, J.-H. (2021). Atlas. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, J. B. R. Matthews, S. Berger, M. Huang, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, E. Lonnoy, T. K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell, & N. Caud (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1927–2058*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/atlas/>
45. Hassell, D., Gregory, J., Blower, J., Lawrence, B. N., & Taylor, K. E. (2017). A data model of the Climate and Forecast metadata conventions (CF-1.6) with a software implementation (cf-python v2.1). *Geoscientific Model Development*, 10, 4619–4646. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4619-2017>
46. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Ho rányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Sche pers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999—2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>



47. Heymsfield, A. J., Matrosov, S., & Baum, B. (2003). Ice Water Path–Optical Depth Relationships for Cirrus and Deep Stratiform Ice Cloud Layers. *Journal of Applied Meteorology*, 42(10), 1369–1390. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<1369:IWPDRF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<1369:IWPDRF>2.0.CO;2)
48. Hines, K. M., & Bromwich, D. H. (2008). Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting (WRF) model. Part I: Greenland ice sheet meteorology. *Monthly Weather Review*, 136(6), 1971–1989. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2112.1>
49. Hines, K. M., Bromwich, D. H., Bai, L.-S., Barlage, M., & Slater, A. G. (2011). Development and testing of Polar WRF. Part III: Arctic Land. *Journal of Climate*, 24(1), 26–48. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3460.1>
50. Hines, K. M., Bromwich, D. H., Wang, S.-H., Silber, I., Verlinde, J., & Lubin, D. (2019). Microphysics of summer clouds in central West Antarctica simulated by the Polar Weather Research and Forecasting Model (WRF) and the Antarctic Mesoscale Prediction System (AMPS). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(19), 12431–12454. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12431-2019>
51. IMBIE team, Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E., Smith, B., van den Broeke, M., Velicogna, I., Whitehouse, P., Briggs, K., Joughin, I., Krinner, G., Nowicki, S., Payne, T., Scambos, T., Schlegel, N., A. G., Agosta, C., Ahlstrøm, A., Babonis, G., Barletta, V., Blazquez, A., ... Wouters, B. (2018). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 558(7709), 219–222. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>
52. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535

53. Iturbide, M., Bedia, J., Herrera, S., Baño-Medina, J., Fernández, J., Frías, M.D., Manzanas, R., San-Martín, D., Cimadevilla, E., Cofiño, A.S., Gutiérrez, J.M. 2019. The R-based climate4R open framework for reproducible climate data access and post-processing. *Environmental Modelling and Software*, 111. 42–54.
54. Janjić, Z. I. (1994). The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5), 927–945. [https://doi.org/10.1175/1520-0493-\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493-(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)
55. Janjić, Z. I. (2002). Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note No. 437, 61 pp.
56. Jones, M. E., Bromwich, D. H., Nicolas, J. P., Carrasco, J., Plavcová, E., Zou, X., & Wang, A. S.-H. (2019). Sixty Years of Widespread Warming in the Southern Middle and High Latitudes (1957–2016). *Journal of Climate*, 32(20), 6875–6898. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0565.1>
57. Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43(1), 170–181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
58. Karl T.R., N. Nicholls, and A. Ghazi. 1999. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Climatic Change*, 42.3-7.
59. Kay, J. E., Bourdages, L., Miller, N. B., Morrison, A., Yettella, V., Chepfer, H., & Eaton, B. (2016). Evaluating and improving cloud phase in the Community Atmosphere Model version 5 using spaceborne lidar observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(8), 4162–4176. <https://doi.org/10.1002/2015JD024699>
60. King, J. C., Gadian, A., Kirchgaessner, A., Kuipers Munneke, P., Lachlan-Cope, T. A., Orr, A., Reijmer, C., van den Broeke, M. R., van Wessem, J. M., & Weeks, M.

- (2015). Validation of the summertime surface energy budget of Larsen C Ice Shelf (Antarctica) as represented in three high-resolution atmospheric models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(4), 1335—1347. <https://doi.org/10.1002/2014JD022604>.
61. Koenigk, T., Berg, P., Doescher, R. 2015. Arctic climate change in an ensemble of regional CORDEX simulations. *Polar Res.*, 34, 24603. <https://doi.org/10.3402/polar.v34.24603>
62. Krakovska, S., Balabukh, V., **Chyhareva, A.**, Pysarenko, L., Trofimova, I., and Shpytal, T.: Projections of regional climate change in Ukraine based on multi-model ensembles of Euro-CORDEX, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13821, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13821> , 2021.
63. Krakovska, S., Balabukh, V., **Chyhareva, A.**, Shpytal, T., Pysarenko, L., Trofimova, I., and Kryshchtop, L.: Assessment of climatic season changes in Ukraine during 21st century based on an ensemble of 34 RCM projections of Euro-CORDEX, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-835, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-835> , 2023b.
64. Krakovska, S., **Chyhareva, A.** Rain fraction of precipitation during the 21st century as an indicator of climate change in the Antarctic peninsula region. XI International Antarctic Conference (Kyiv, Ukraine, May 10-12, 2023) Book of Abstracts [http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts\\_IAC-11\\_2023\\_.pdf](http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts_IAC-11_2023_.pdf)
65. Krakovska, S., Shpytal, T., **Chyhareva, A.**, Pysarenko, L., Trofimova, I., and Kryshchtop, L.: Ensembles of Euro-CORDEX RCMs for assessment of specialized climate indices in Ukraine, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10724, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10724> , 2022.

66. Krakovskaia, S., & Pirnach, A. (2000). Theoretical study formation and development of antarctic cloudiness under different intensity of ice and cloud droplet nucleation. *AIP Conference Proceedings*, 534 (1), 467. <https://doi.org/10.1063/1.1361908>
67. Krakovskaia, S., & Pirnach, A. (2003). Mesoscale and Microphysical Features of Frontal Rainbands in the Deep Depression of Explosive Cyclone Type over the Antarctic Peninsula. *Ukrainian Antarctic Journal*, 1, 85—92. <https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2003.629>
68. Krakovska S. ., Palamarchuk, L. ., Azarov Y. ., Chyhareva A. ., & Shpytal T. . (2023a). The least squares method in estimating the accuracy of surface air temperature projections based on ensembles of regional climate models. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(5), 34–53. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i5.272326>
69. Lachlan-Cope, T., Listowski, C., & O’Shea, S. (2016). The microphysics of clouds over the Antarctic Peninsula – Part 1: Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16 (24), 15605–15617. <https://doi.org/10.5194/acp-16-15605-2016>
70. Ladwig, W. (2017). wrf-python (Version 1.0.1) [Software]. Boulder, Colorado: UCAR/NCAR. <https://doi.org/10.5065/D6W094P1>
71. Lee, H., Johnston, N., Nieradzik, L., Orr, A., Mottram, R. H., van de Berg, W. J., & Mooney, P.A. (2022). Toward Effective Collaborations between Regional Climate Modeling and Impacts-Relevant Modeling Studies in Polar Regions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(8), E1866-E1874. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0102.1>
72. Lenaerts, J. T. M., Van Tricht, K., Lhermitte, S., & L’Ecuyer, T. S. (2017). Polar clouds and radiation in satellite observations, reanalyses, and climate models. *Geophysical Research Letters*, 44(7), 3355–3364. <https://doi.org/10.1002/2016GL072242>

73. Li S, Jaroszynski S, Pearse S, Orf L, Clyne J. VAPOR: A Visualization Package Tailored to Analyze Simulation Data in Earth System Science. *Atmosphere*. 2019; 10(9):488. <https://doi.org/10.3390/atmos10090488>
74. Li, D. (2022). Physical processes and feedbacks obscuring the future of the Antarctic Ice Sheet. *Geosystems and Geoenvironment*, 1(4), 100084. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100084>
75. Listowski, C., & Lachlan-Cope, T. (2017). The microphysics of clouds over the Antarctic Peninsula — Part 2: modelling aspects within Polar-WRF. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17), 10195–10221. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10195-2017>
76. Listowski, C., Delanoë, J., Kirchgaessner, A., Lachlan-Cope, T., & King, J. (2019). Antarctic clouds, super cooled liquid water and mixed phase, investigated with DARDAR: geographical and seasonal variations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(10), 6771–6808. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6771-2019>
77. Lubin, D., Bromwich, D. H., Vogelmann, A. M., Verlinde, J., & Russell, L. M. (2017). ARM West Antarctic Radiation Experiment (AWARE) Field Campaign Report. United States. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1389616>
78. Mahesh, A., Campbell, J. R., & Spinhirne, J. D. (2005). Multi-year measurements of cloud base heights at South Pole by lidar. *Geophysical Research Letters*, 32(9), L09812. <https://doi.org/10.1029/2004GL021983>
79. May, R. M., Goebbert, K. H., Thielen, J. E., Leeman, J. R., Camron, M. D., Bruick, Z., Bruning, E. C., Manser, R. P., Arms, S. C., & Marsh, P. T. (2022). MetPy: A Meteorological Python Library for Data Analysis and Visualization. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(10), E2273-E2284. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0125.1>
80. McFarquhar, G. M., Bretherton, C. S., Marchand, R., Protat, A., DeMott, P. J., Alexander, S., Roberts, G. C., Twohy, C. H., Toohey, D., Siems, S., Huang, Y., Wood,

- R., Rauber, R. M., Lasher-Trapp, S., Jensen, J., Stith, J. L., Mace, J., Um, J., Järvinen, E., ... & McDonald, A. (2021). Observations of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Surface Radiation over the Southern Ocean: An Overview of CAPRICORN, MARCUS, MICRE, and SOCRATES. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(4), E894–E928 <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0132.1>
81. McKay D.I.A., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S.E., Rockström, J., Lenton T. M. Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science* 377, eabn7950(2022). <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>
82. Meredith, M., M. Sommerkorn, S. Cassotta, C. Derksen, A. Ekaykin, A. Hollowed, G. Kofinas, A. Mackintosh, J. Melbourne-Thomas, M.M.C. Muelbert, G. Ottersen, H. Pritchard, and E.A.G. Schuur, 2019: Polar Regions. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 203-320. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.005>.
83. Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102 (D14), 16663–16682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
84. Mottram, R., Mooney, P., and Torres, J. A. and the PolarRES Consortium: A first look at the new PolarRES ensemble of polar regional climate model storylines to 2100, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-14470, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-14470> , 2023a.
85. Mottram, R., Mooney, P., PolarRES Consortium. (2023b): A new ensemble of Arctic and Antarctic regional climate models with storylines to 2100, XXVIII General

- Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-3080>
86. NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems and U.S./Japan ASTER Science Team (2019). ASTER Global Digital Elevation Model V003 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003>
87. Nicolas, J. P., Vogelmann, A. M., Scott, R. C., Wilson, A. B., Cadeddu, M. P., Bromwich, D. H., Verlinde, J., Lubin, D., Russell, L. M., Jenkinson, C., Powers, H. H., Ryczek, M., Stone, G., & Wille, J. D. (2017). January 2016 extensive summer melt in West Antarctica favoured by strong El Niño. *Nature Communications*, 8, 15799. <https://doi.org/10.1038/ncomms15799>
88. Osypov, V., Speka O., Chyhareva, A., Osadcha, N., Krakovska, S., Osadchyi, V. (2021) Water resources of the Desna river basin under future climate. *Journal of Water and Climate Change*, 12 (7): 3355–3372. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.034>
89. Palerme, C., Genthon, C., Claud, C., Kay, J. E., Wood, N. B., & L'Ecuyer, T. (2017). Evaluation of current and projected Antarctic precipitation in CMIP5 models. *Climate Dynamics*, 48, 225–239. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3071-1>
90. Peterson T.C., and Coauthors. 2001. Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs. Geneva, Switzerland : WMO, Rep.WCDMP-47, WMO-TD 1071, 1998—2001. 143
91. Pishniak, D., & Beznoshchenko, B. (2020). Improving the detailing of atmospheric processes modelling using the Polar WRF model: a case study of a heavy rainfall event at the Akademik Vernadsky station. *Ukrainian Antarctic Journal*, 2, 26—41. <https://doi.org/10.33275/1727-7485.2.2020.650>
92. Pishniak, D., Krakovska, S., **Chyhareva, A.**, and Razumnyi, S.: Preliminary analysis and main problems of instrumental measurement complex at the Vernadsky Antarctic Station, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13591, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13591>, 2021.

93. Platt, C. M. R. (1997). A parameterization of the visible extinction coefficient of ice clouds in terms of the ice/water content. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(16), 2083–2098. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<2083:APOTVE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<2083:APOTVE>2.0.CO;2)
94. Platt, C. M. R., & Harshvardhan. (1988). Temperature dependence of cirrus extinction: Implications for climate feedback. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93(D9), 11051–11058. <https://doi.org/10.1029/JD093iD09p11051>
95. Pysarenko, L., Krakovska, S., Shpytal, T., **Chyhareva, A.**, Trofimova, I., and Kryshchtop, L.: Projections of continentality and cold season indices in Ukraine based on the ensembles of Euro-CORDEX RCMs, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-727, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-727>, 2023.
96. Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., & Weyer, N. M. (Eds.) (2019). IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC\\_FullReport\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf)
97. Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafa, P. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109, 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
98. Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., van den Broeke, M., van Wessem, M. J., & Morlighem, M. (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 116(4), 1095–1103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116>
99. Rodrigo, S. J., Buchlin, J. M., van Beeck, J., Lenaerts J. T. M., van den Broeke M.R. 2013. Evaluation of the antarctic sur-face wind climate from ERA reanalyses and



- RACMO2/ANT simulations based on automatic weather stations. *Climate Dynamics*, 40, 353–376. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1396-y>.
100. Roussel, M.-L., Lemonnier, F., Genthon, C., & Krinner, G. (2020). Brief communication: Evaluating Antarctic precipitation in ERA5 and CMIP6 against Cloud Sat observations. *The Cryosphere*, 14(8), 2715–2727. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2715-2020>
101. Rowe P., Zou X., Gorodetskaya I., Cordero R., Wille J., **Chyhareva A.**, Ralph F.M., Bromwich D., Kawzenuk B., and Zhang Z.: Foehn Warming over the Antarctic Peninsula Amplified by Strong Atmospheric Rivers. International Atmospheric River Conference 2022, [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf)
102. Rowe, P. M, Sepulveda, E., Neshyba, S. P., Caballero, M., Damiani, A., & Cordero, R. (2018). The radiative impact of clouds over the Antarctic Peninsula and Southern Ocean. 15th Conference on Cloud Physics/Atmospheric Radiation, 9–13 July 2018, Vancouver, BC. Retrieved September 20, 2020, from <https://ams.confex.com/ams/15CLOUD15ATRAD/webprogram/Paper347761.html>
103. Sancho, L.G., Green, T.A., Pintado, A. 2007. Slowest to fastest: extreme range in lichen growth rates supports their use as an indicator of climate change in Antarctica. *Flora*, 202, 667–673.
104. Sancho, L.G., Pintado, A., Navarro, F., Ramos, M., De Pablo, M.A., Blanquer, J.M., Raggio, J., Valladares, F., Green, T.G.A. 2017. Recent Warming and Cooling in the Antarctic Peninsula Region has Rapid and Large Effects on Lichen Vegetation. *Sci Rep*, 7, 5689 <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05989-4>.
105. Shiobara, M., Yabuki, M., & Kobayashi, H. (2003). A polar cloud analysis based on Micro-pulse Lidar measurements at Ny-Ålesund, Svalbard and Syowa, Antarctica. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(28–32), 1205–1212. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.057>

106. Siegert, M., Atkinson, A., Banwell, A., Brandon, M., Convey, P., Davies, B., Downie, R., Edwards, T., Hubbard, B., Marshall, G., Rogelj, J., Rumble, J., Stroeve, J., & Vaughan, D. (2019). The Antarctic Peninsula Under a 1.5 °C Global Warming Scenario. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 102. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00102>
107. Silber, I., Verlinde, J., Eloranta, E. W., & Cadeddu, M. (2018). Antarctic cloud macrophysical, thermodynamic phase, and atmospheric inversion coupling properties at McMurdo Station: I. Principal data processing and climatology. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(11), 6099–6121. <https://doi.org/10.1029/2018JD028279>
108. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D., & Huang, X.-Y. (2019). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4 (No, NCAR/TN-556+STR), 145. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
109. Smith, R. C., Ainley, D., Baker, K., Domack, E., Emslie, S., Fraser, B., Kennett, J., Leventer, A., Mosley-Thompson, E., Stammerjohn, S., & Vernet, M. (1999). Marine Ecosystem Sensitivity to Climate Change: Historical observations and paleoecological records reveal ecological transitions in the Antarctic Peninsula region. *BioScience*, 49(5), 393–404. <https://doi.org/10.2307/1313632>
110. Souverijns, N., Gossart, A., Demuzere, M., Lenaerts, J. T. M., Medley, B., Gorodetskaya, I. V., Vanden Broucke, S., & van Lipzig, N. P. M. (2019). A New Regional Climate Model for POLAR-CORDEX: Evaluation of a 30-Year Hindcast with COSMO-CLM2 Over Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3), 1405–1427. <https://doi.org/10.1029/2018JD028862>
111. Stephens, G. L. (1980). Radiative properties of cirrus clouds in the infrared region. *Journal of Atmospheric Sciences*, 37 (2), 435–446. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037<0435:RPOCCI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<0435:RPOCCI>2.0.CO;2)

112. Stull, R., 2017: "Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science" -version 1.02b. Univ. of British Columbia. 940 pages. isbn 978-0-88865-283-6 .
113. Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A., 2011. "An overview of CMIP5 and the experiment design". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93. 485–498
114. Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., Le Mone, M. A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J., & Cuenca, R. H. (2004). Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, 14.2A. Retrieved September 20, 2020, from [https://ams.confex.com/ams/84Annual/techprogram/paper\\_69061.htm](https://ams.confex.com/ams/84Annual/techprogram/paper_69061.htm)
115. Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M., & Hall, W. D. (2008). Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, 136(12), 5095–5115. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>
116. Thomson, A., Calvin, K., Smith, S., Kyle, P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M., Clarke, L., Edmonds, J. 2011. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109: 77–94. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>.
117. Trivelpiece, W. Z., Hinke, J. T., Miller, A. K., Reiss, C. S., Trivelpiece, S. G., & Watters, G.M. (2011). Variability in krill biomass links harvesting and climate warming to penguin population changes in Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 108(18), 7625–7628. <https://doi.org/10.1073/pnas.1016560108>
118. Turner, J., Colwell, S.R., Marshall, G.J., Lachlan-Cope, T.A., Carleton, A.M., Jones, P.D., Lagun, V., Reid, P.A. and Iagovkina, S. (2005), Antarctic climate change

- during the last 50 years. *Int. J. Climatol.*, 25: 279-294.  
<https://doi.org/10.1002/joc.1130>
119. Turner, J., Lachlan-Cope, T., Thomas, J. P., & Colwell, S. R. (1995). The synoptic origins of precipitation over the Antarctic Peninsula. *Antarctic Science*, 7(3), 327—337. <https://doi.org/10.1017/S0954102095000447>
120. Turton, J. V., Kirchgaessner, A., Ross, A. N., & King, J. C. (2018). The spatial distribution and temporal variability of föhn winds over the Larsen C ice shelf, Antarctica. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(713), 1169–1178. <https://doi.org/10.1002/qj.3284>
121. van Meijgaard, E., van Uft, L.H., van de Berg, W.J., Bosveld, F.C., van den Hurk, B.J.J.M., Lenderink, G., Siebesma, A.P. 2008. The KNMI regional atmospheric climate model RACMO version 2.1. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). Technical report 302
122. Van Tricht, K., Lhermitte, S., Lenaerts, J. T. M., Gorodetskaya, I. V., L'Ecuyer, T. S., Noël, B., van den Broeke, M. R., Turner, D. D., & van Lipzig, N. P. M. (2016). Clouds enhance Greenland ice sheet meltwater runoff. *Nature Communications*, 7, 10266. <https://doi.org/10.1038/ncomms10266>
123. van Wessem, J.M., Ligtenberg, S.R.M., Reijmer, C.H., van de Berg, W.J., van den Broeke, M.R., Barrand, N.E., Thomas, E.R., Turner, J., Wuite, J., Scambos, T.A., van Meijgaard, E. 2016. The modelled surface mass balance of the Antarctic Peninsula at 5.5 km horizontal resolution. *The Cryosphere*, 10, 271–285.
124. Vignon, É., Roussel, M.-L., Gorodetskaya, I. V., Genthon, C., & Berne, A. (2021). Present and Future of Rainfall in Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 48(8), e2020GL092281. <https://doi.org/10.1029/2020GL092281>
125. Visualization & Analysis Systems Technologies. (2023) Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers (VAPOR version

- 3.8.0) [Software]. Boulder, CO: UCAR/NCAR - Computational and Information System Lab. doi:10.5281/zenodo.7779648
126. Wille, J. D., Favier, V., Dufour, A., Gorodetskaya, I. V., Turner, J., Agosta, C., & Codron, F. (2019). West Antarctic surface melt triggered by atmospheric rivers. *Nature Geoscience*, 12(11), 911–916. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0460-1>
127. Wille, J. D., Favier, V., Gorodetskaya, I. V., Agosta, C., Kittel, C., Beeman, J. C., Jourdain, N. C., Lenaerts, J. T. M., & Codron, F. (2021). Antarctic atmospheric river climatology and precipitation impacts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(8), e2020JD033788. <https://doi.org/10.1029/2020JD033788>
128. Wille, J. D., Favier, V., Jourdain, N. C., Kittel, C., Turton, J. V., Agosta, C., Gorodetskaya, I. V., Picard, G., Codron, F., Santos, C. L. D., Amory, C., Fettweis, X., Blanchet, J., Jomelli, V., & Berchet, A. (2022). Intense atmospheric rivers can weaken ice shelf stability at the Antarctic Peninsula. *Communications Earth and Environment*, 3, 90. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00422-9>
129. Wille, J.D., Favier, V., Jourdain, N.C., Kittel, C., Turton, J.V., Agosta, C., Gorodetskaya, I., Picard, G., Codron, F., Santos, Ch. L.-D., Amory, Ch., Fettweis, X., Blanchet, J., Jomelli, V., Berchet, A. Intense atmospheric rivers can weaken ice shelf stability at the Antarctic Peninsula. *Commun Earth Environ* 3, 90 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00422-9>
130. Winker, D. M., Pelon, J., Coakley Jr., J. A., Ackerman, S. A., Charlson, R. J., Colarco, P. R., Flamant, P., Fu, Q., Hoff, R. M., Kittaka, C., Kubar, T. L., Le Treut, H., McCormick, M. P., Mégie, G., Poole, L., Powell, K., Trepte, C., Vaughan, M. A., & Wielicki, B. A. (2010). The CALIPSO Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(9), 1211–1230. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3009.1>

131. Xue, J., Z. Xiao, D. H. Bromwich, L. Bai, 2022: Polar WRF V4.1.1 simulation and evaluation for the Antarctic and Southern Ocean. *Front. Earth Sci.*, **16**, 1005-1024, <https://doi.org/10.1007/s11707-022-0971-8>
132. Xun Zou, Penny M. Rowe, Irina Gorodetskaya, David H. Bromwich, Matthew A. Lazzara, Raul R. Cordero, Zhenhai Zhang, Brian Kawzenuk, Jason M. Cordeira, Jonathan D. Wille, F. Martin Ralph, Le-Sheng Bai (2023). Strong warming over the Antarctic Peninsula during combined atmospheric River and foehn events: Contribution of shortwave radiation and turbulence. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD038138. <https://doi.org/10.1029/2022JD038138>
133. Yuter, S. E., Kingsmill, D. E., Nance, L. B., & Löffler-Mang, M. (2006). Observations of Precipitation Size and Fall Speed Characteristics within Coexisting Rain and Wet Snow. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(10), 1450–1464. <https://doi.org/10.1175/JAM2406.1>

## ДОДАТКИ

## Додаток А. Структура дисертації, район дослідження та особливості конфігурації моделі Polar WRF

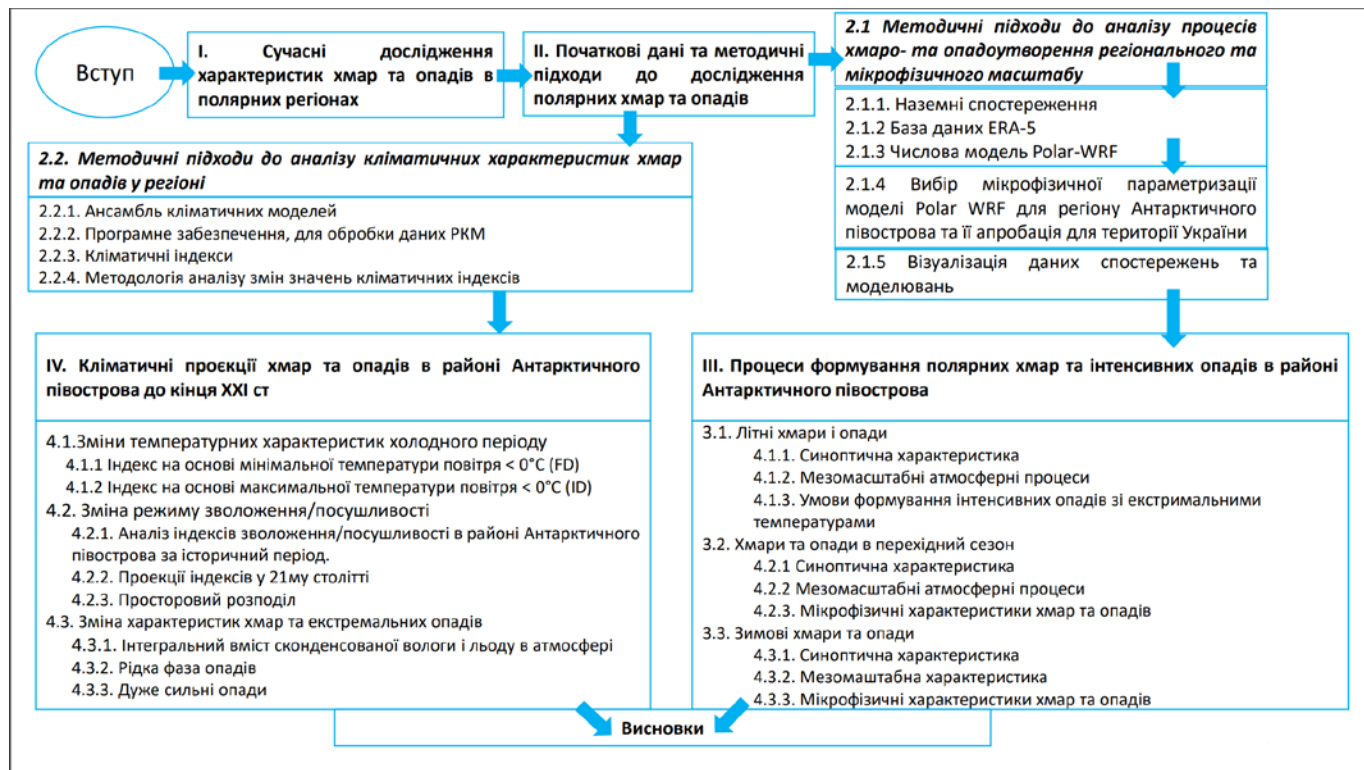


Рисунок А.1. Структура дисертаційного дослідження

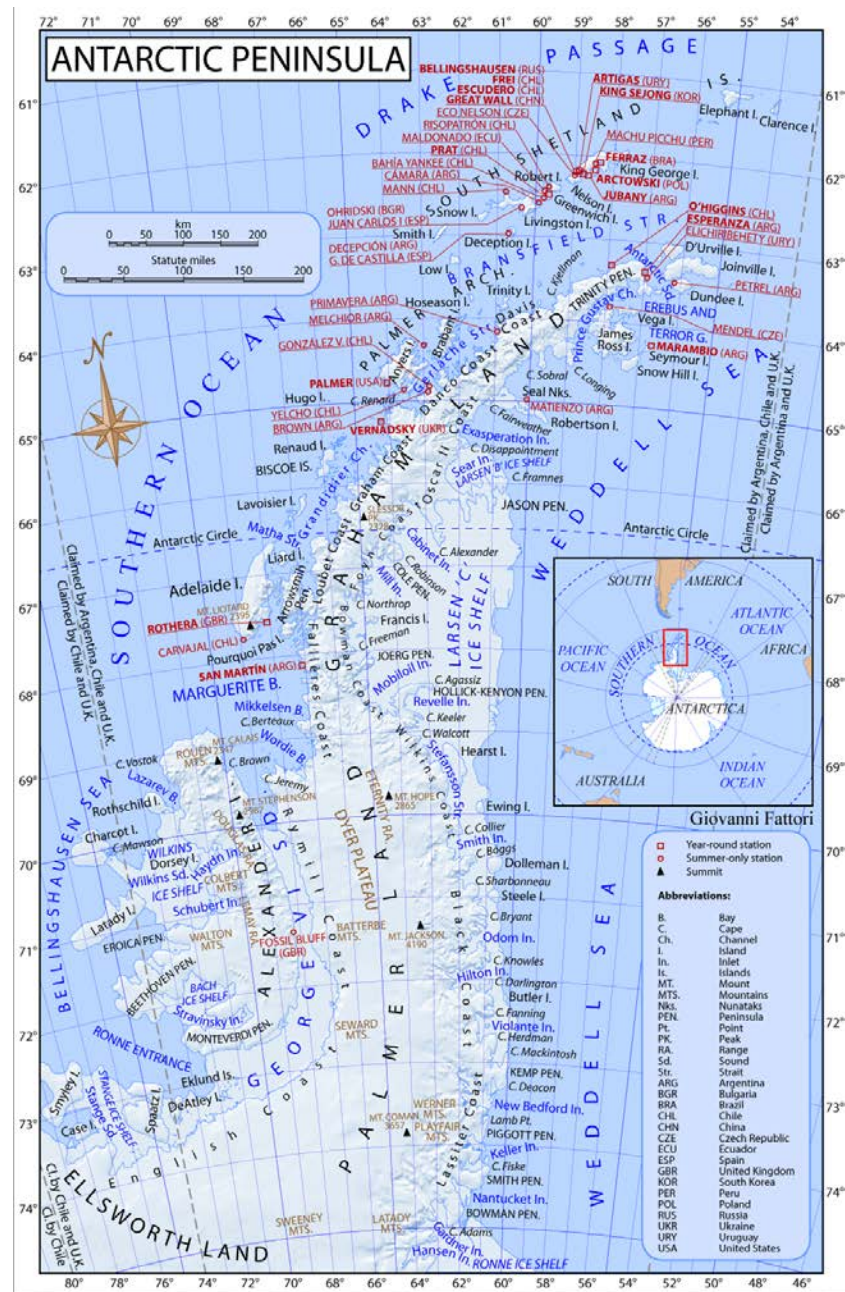
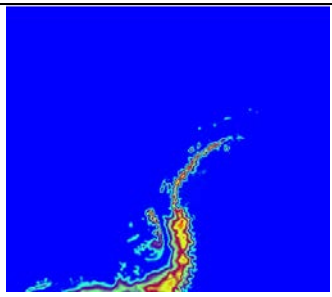
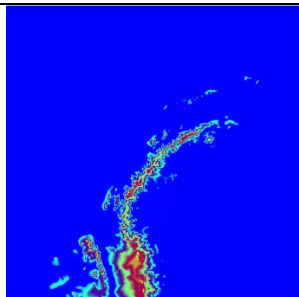
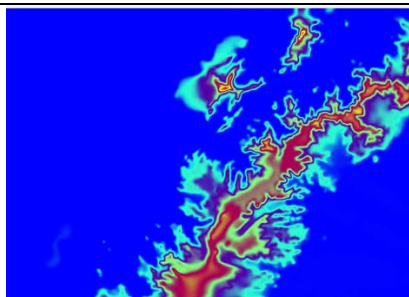
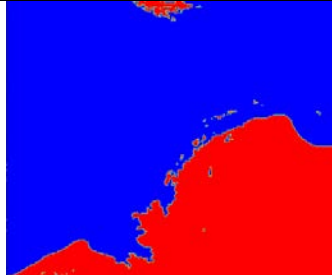
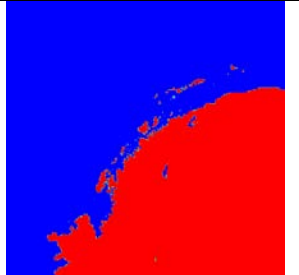
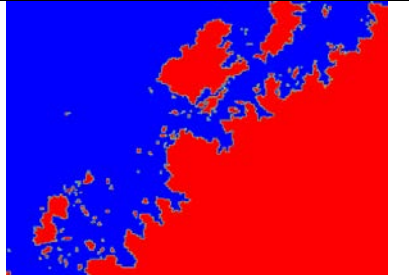


Рисунок А.2 Регіон Антарктичного півострова із назвами географічних об'єктів, що використовуються у дослідженні. Джерело:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Antarctic\\_Peninsula](https://en.wikipedia.org/wiki/Antarctic_Peninsula)



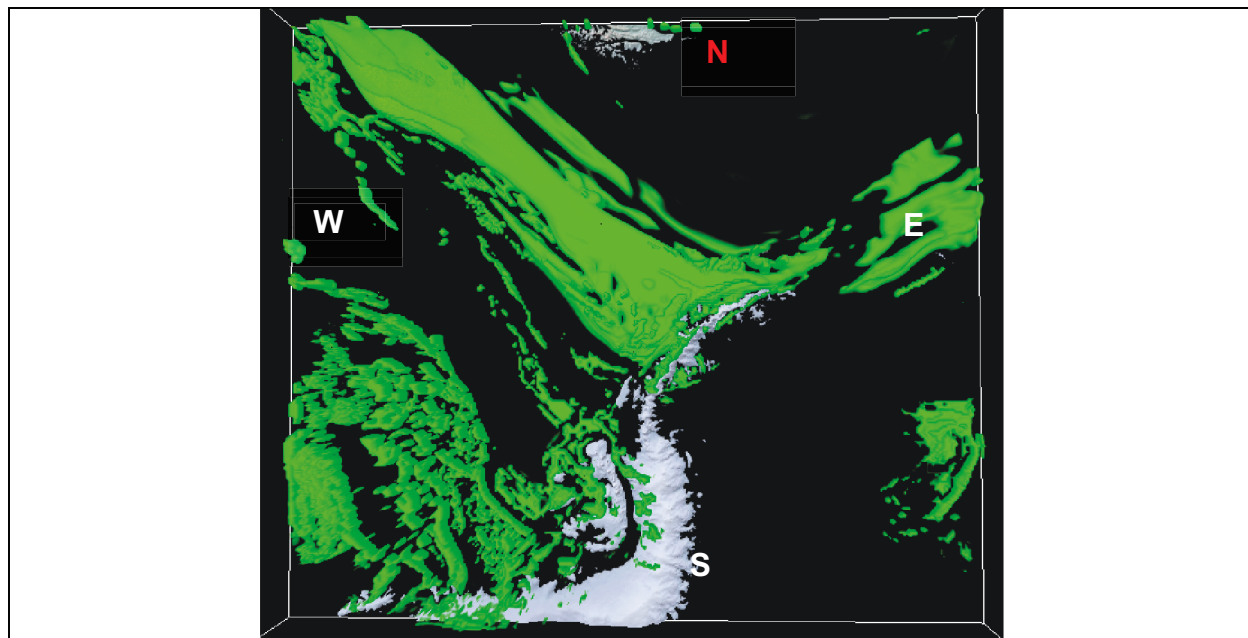
Таблица А.1

	D01 – 9km	D02 – 3km	D01 -1km
HGT			
Land-Sea ice-Sea mask			
Namelist.wps	<pre> &amp;share wrf_core max_dom start_date end_date interval_seconds io_form_geogrid &amp;geogrid parent_id parent_grid_ratio i_parent_start j_parent_start e_we e_sn geog_data_res dx dy map_proj ref_lat ref_lon truelat1 truelat2 stand_lon geog_data_path &amp;ungrib out_format prefix &amp;metgrid fg_name io form metgrid </pre>		
	<pre> = 'ARW', = 3, ='2021-03-31_00:00:00','2021-03-31_00:00:00','2021-03-31_', ='2021-04-04_00:00:00','2021-04-04_00:00:00','2021-04-04_', = 3600, = 2, / = 1, 1, 2, = 1, 3, 3, = 1, 87, 200, = 1, 39, 217, = 295, 502, 301, = 257, 499, 217, = '1s','1s','1s' = 9000, = 9000, = 'lambert', = -64.651, = -67.833, = -64.651, = -64.651, = -64.651, = -67.833, = '/WPS_GEOG/', / = 'WPS', = 'FILE', / = 'FILE', = 2, / </pre>		

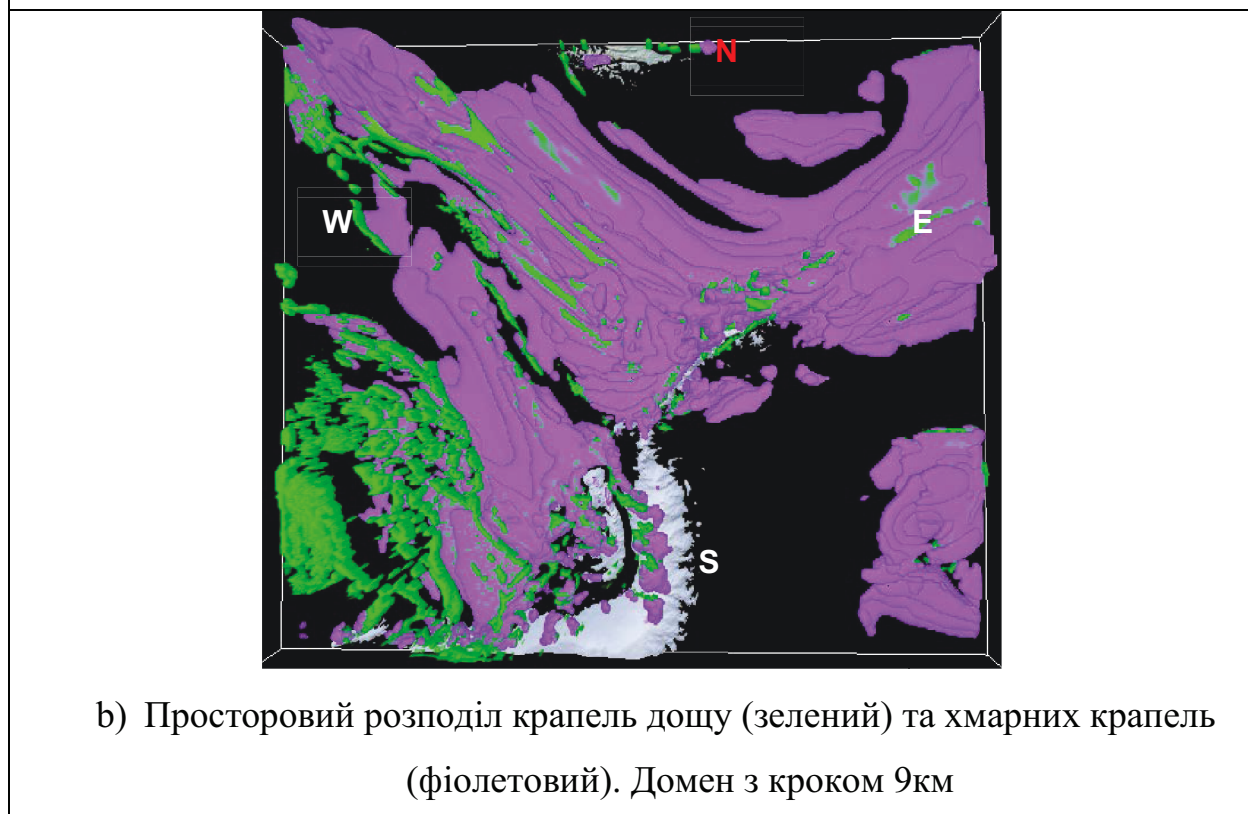
Namelist.input	<pre> &amp;time_control run_days           = 0, run_hours          = 97, run_minutes        = 0, run_seconds        = 0, start_year         = 2021, 2021, 2021, start_month        = 03, 03, 03, start_day          = 31, 31, 31, start_hour         = 00, 00, 00, end_year           = 2021, 2021, 2021 end_month          = 04, 04, 04, end_day            = 04, 04, 04, end_hour           = 00, 00, 00, interval_seconds   = 3600, input_from_file    = .true.,.true.,.true., history_interval   = 30, 30, 10, frames_per_outfile = 1, 1, 1, restart            = .false., restart_interval   = 7200, io_form_history    = 2 io_form_restart    = 2 io_form_input      = 2 io_form_boundary   = 2 / &amp;domains time_step          = 48, time_step_fract_num = 0, time_step_fract_den = 1, max_dom            = 3, e_we               = 295, 502, 301, e_sn                = 257, 499, 217, eta_levels         * = * e_vert             = 38, 38, 38, p_top_requested    = 10000, num_metgrid_levels = 38, num_metgrid_soil_levels = 4, dx                 = 9000, 3000, 1000, dy                 = 9000, 3000, 1000, grid_id            = 1, 2, 3, parent_id          = 1, 1, 2, i_parent_start     = 1, 87, 200, j_parent_start     = 1, 39, 217, parent_grid_ratio  = 1, 3, 3, parent_time_step_ratio = 1, 3, 3, feedback           = 0, smooth_option      = 0 smooth_cg_topo    = .false. wif_input_opt      = 1, num_wif_levels     = 30, / &amp;physics </pre>	<pre> use_aero_icbc      = .true., mp_physics         = 8, 8, 8, cu_physics         = 1, 0, 0, ra_lw_physics      = 4, 4, 4, ra_sw_physics      = 4, 4, 4, bl_pbl_physics     = 2, 2, 2, sf_sfclay_physics = 2, 2, 2, sf_surface_physics = 2, 2, 2 radt               = 30, 30, 30, bldt               = 0, 0, 0, cudt               = 0, 0, 0, icloud             = 1, isfflx             = 1, ifsnow             = 1, maxiens            = 1, maxens             = 3, maxens2            = 3, maxens3            = 16, ensdim             = 144, paerlev            = 29, levsiz             = 59, cam_abs_dim1       = 4, cam_abs_dim2       = 34, num_land_cat       = 21, sf_urban_physics   = 0, 0, 0, 0, / &amp;fdda              / &amp;dynamics hybrid_opt         = 2, w_damping          = 0, diff_opt           = 1, 1, 1, km_opt             = 4, 4, 4, diff_6th_opt       = 2, 2, 2, diff_6th_factor    = 0.12, 0.12, 0.12, base_temp          = 273.155 damp_opt           = 3, zdamp              = 5000.,5000.,5000. dampcoef           = 0.2, 0.2, 0.2, khdif              = 0, 0, 0, kvdif              = 0, 0, 0, non_hydrostatic    = .true.,.true.,.true., epssm              = 0.5, 0.5, 0.5, moist_adv_opt      = 1, 1, 1, scalar_adv_opt     = 1, 1, 1, gwd_opt            = 1, / &amp;bdy_control spec_bdy_width     = 5, specified           = .true. / &amp;grib2             / &amp;namelist_quilt    = 0, nio_tasks_per_group = 1, / nio_groups </pre>
	<pre> *eta_levels = </pre>	<pre> 1, 0.9919054875 0.9824451072 0.9717072 0.9583953 0.9386563875 0.9153297753 0.8835771328 0.8440152 0.8021131125 0.7559440125 0.7061496 0.6534231 0.6033616 0.5558901 0.5109336 0.4684171 0.4282656 0.3904041 0.3547576 0.3212511 0.2898096 0.2603581 0.2328216 0.2071251 0.1831936 0.1609521 0.1403256 0.1212391 0.1036176 0.0873861 0.0724696 0.0587931 0.0462816 0.0348601000000002 0.0244536000000002 0.0149871000000003 0, </pre>

Додаток Б. Характеристики хмар та опадів 31 березня–2 квітня 2021 року

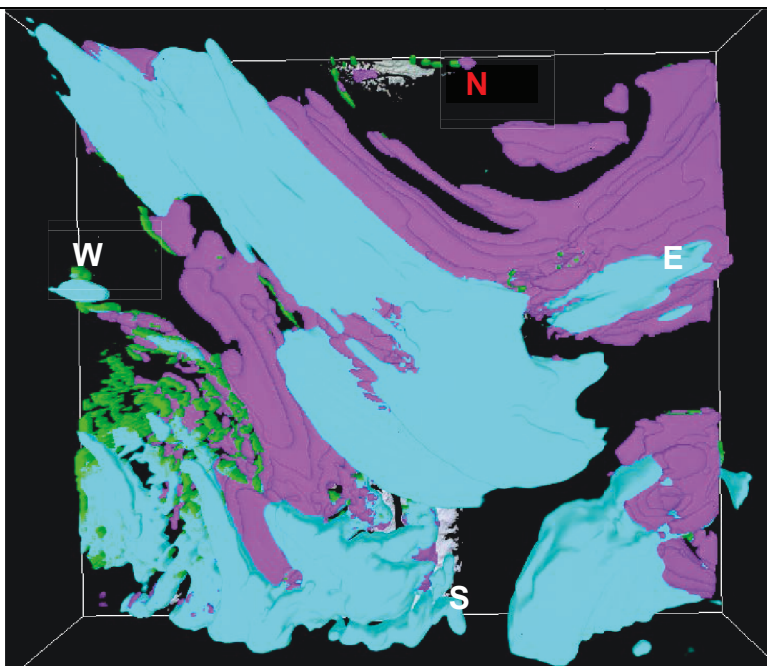
Б1. 3D візуалізація масових концентрацій крапель дощу, хмар, кристалів льоду та снігу для Антарктичного півострова (г/кг) 1 квітня 2021 20 UTC



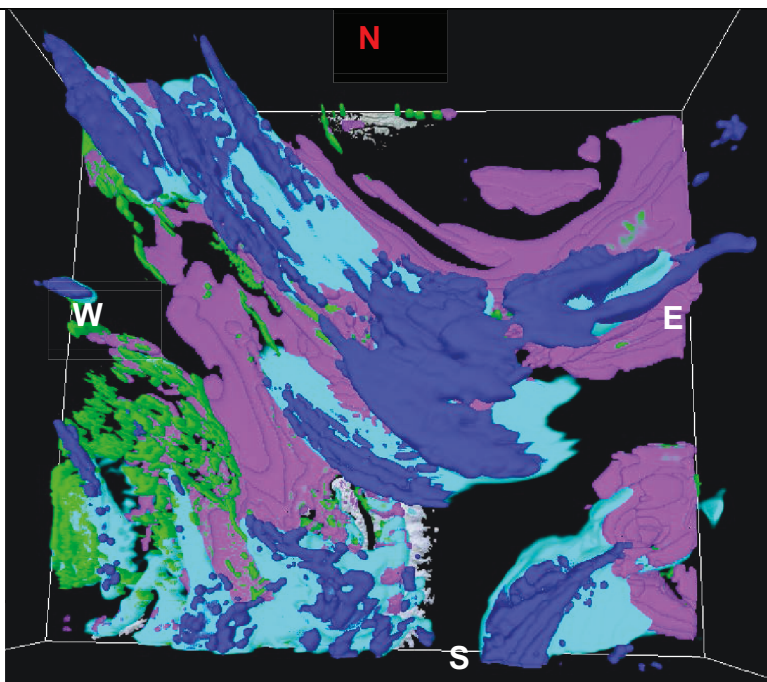
а) Просторовий розподіл крапель дощу. Домен з кроком 9км



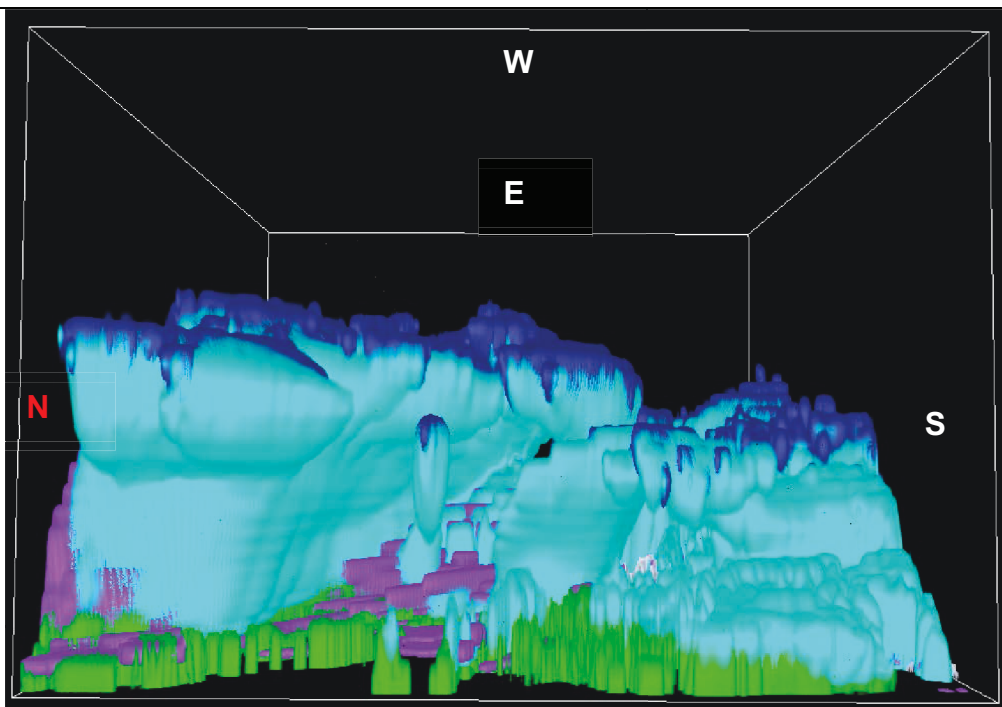
б) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений) та хмарних крапель (фіолетовий). Домен з кроком 9км



c) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий) та кристалів снігу (блакитний). Домен з кроком 9км

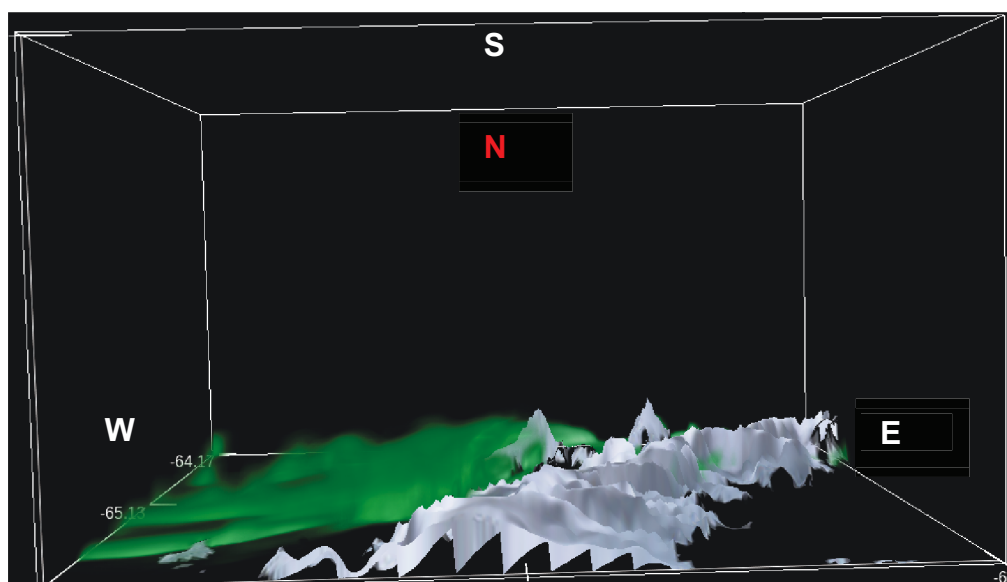


d) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий) та кристалів снігу (блакитний) та кристалів льоду (синій). Домен з кроком 9км

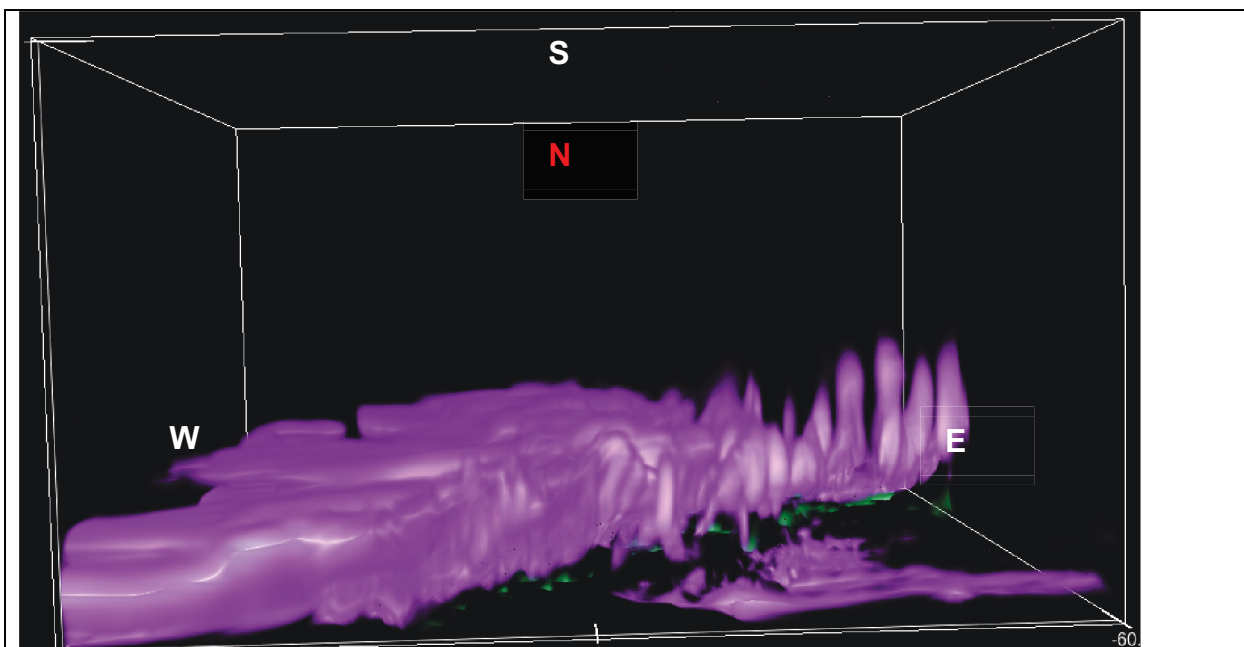


е) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий) та кристалів снігу (блакитний) – вертикальний розподіл.

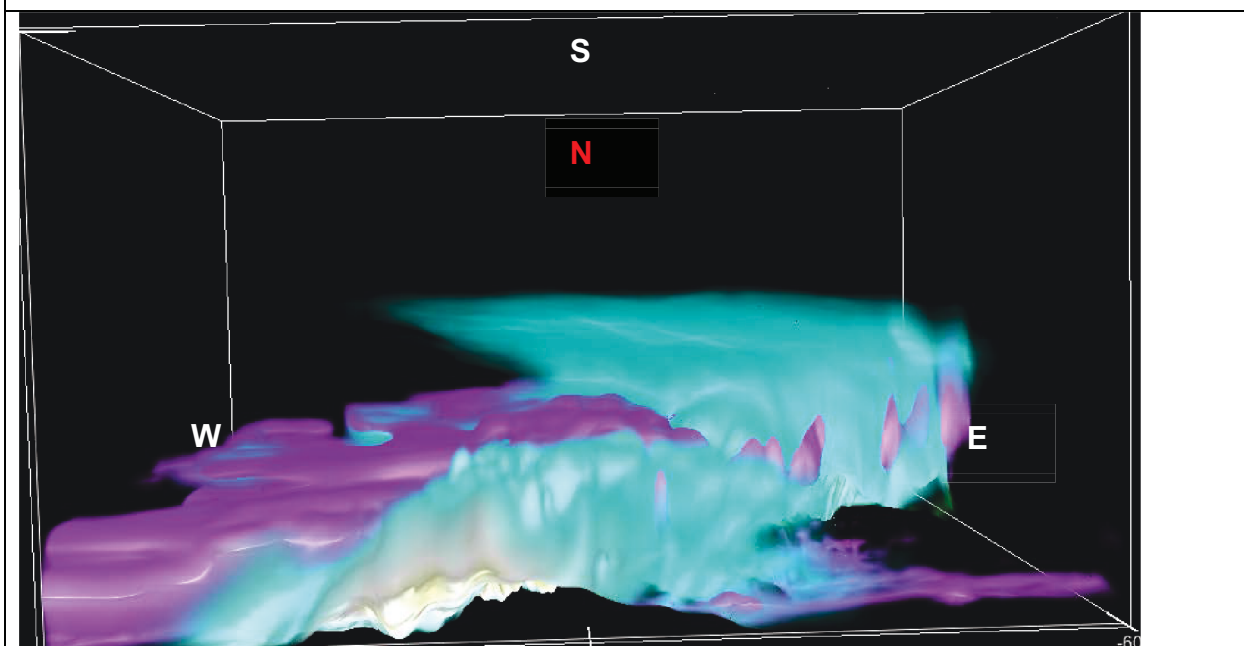
Домен з кроком 9км



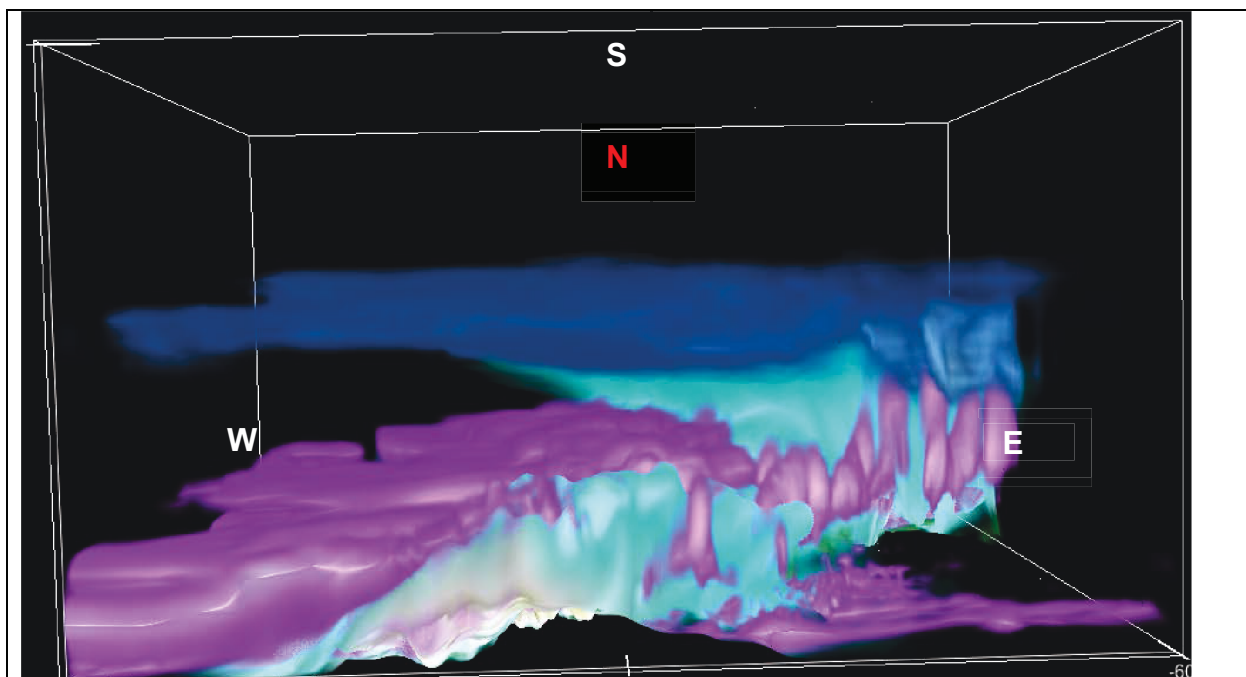
ф) Просторовий розподіл крапель дощу. Домен з кроком 1км – районі станції Академік Вернадський – льодовика Ларсен В



g) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений) та хмарних крапель (фіолетовий). Домен з кроком 1км – районі станції Академік Вернадський – льодовика Ларсен В



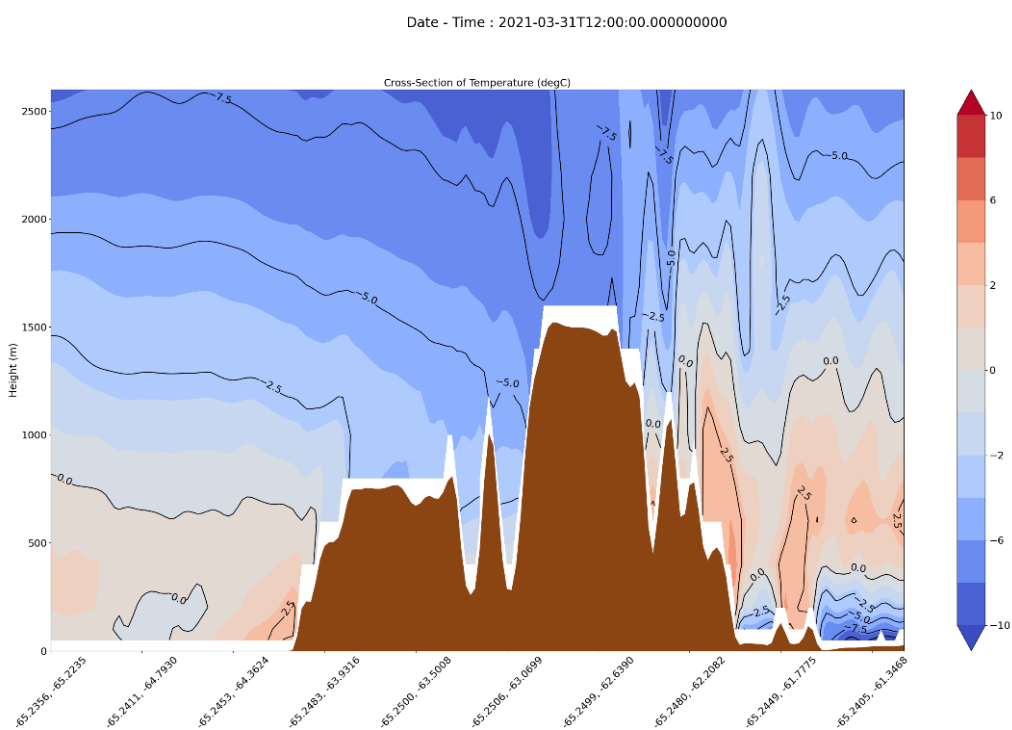
h) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий) та кристалів снігу (блакитний). Домен з кроком 1км – районі станції Академік Вернадський – льодовика Ларсен В



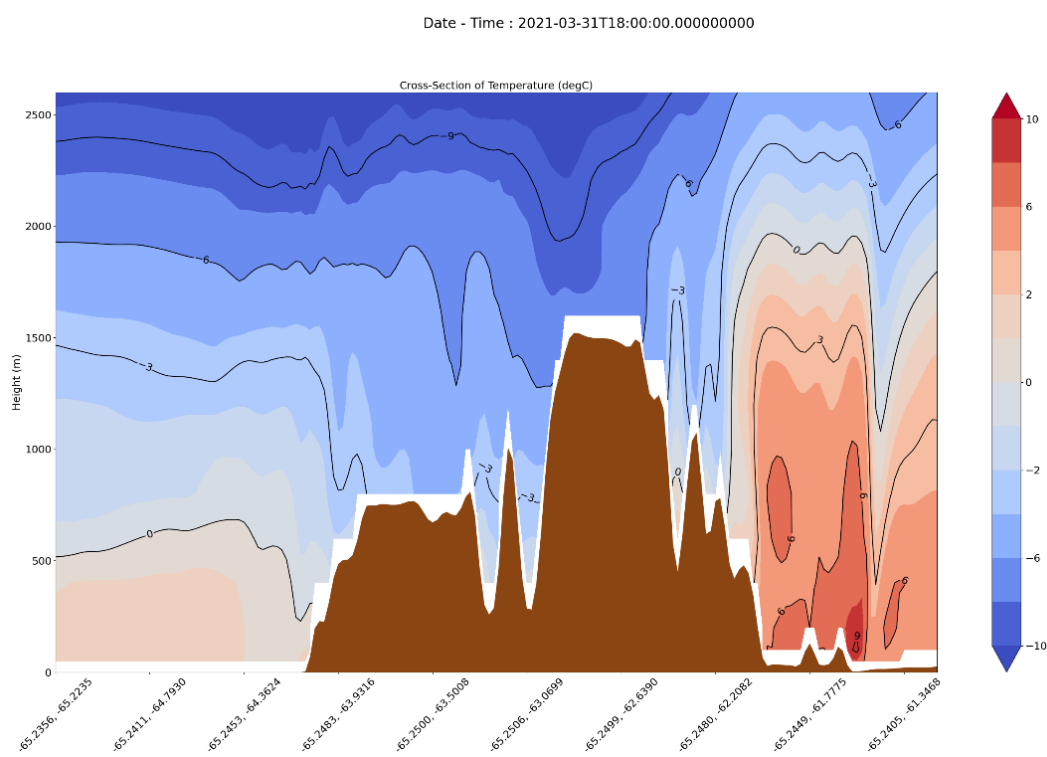
- i) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий) та кристалів снігу (блакитний). Домен з кроком 1км – районі станції Академік Вернадський – льодовика Ларсен В

**Б2. Профіль температури повітря у шарі до 2,5 км**

а) 31 березня 12:00



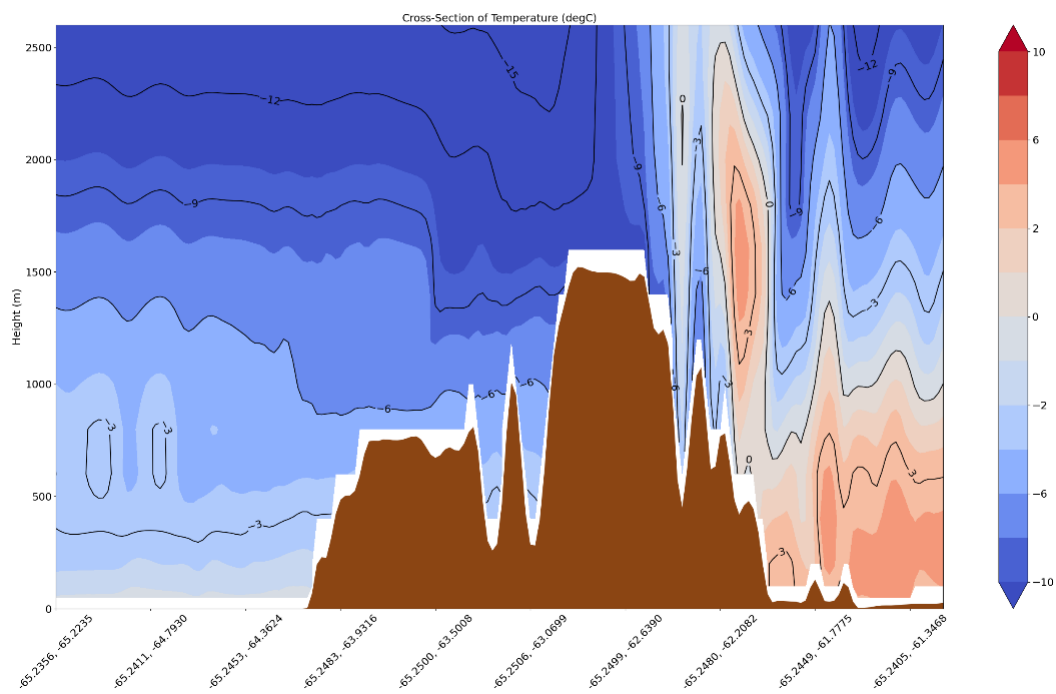
б) 31 березня 18:00





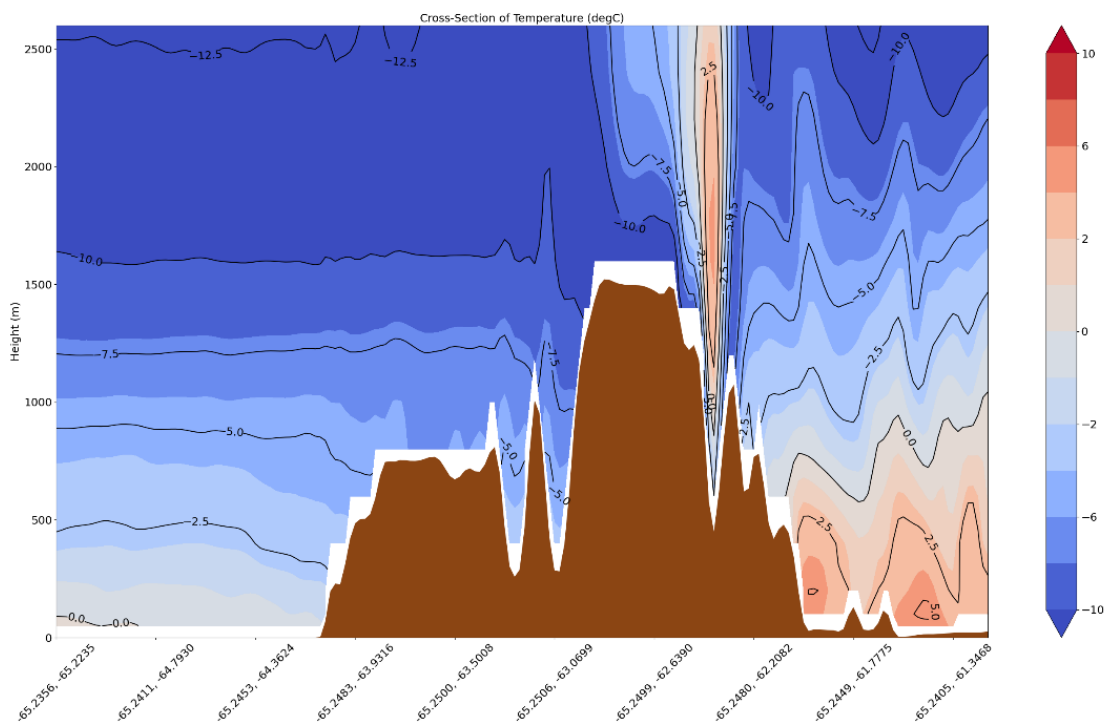
## с) 1 квітня 00:00

Date - Time : 2021-04-01T00:00:00.000000000

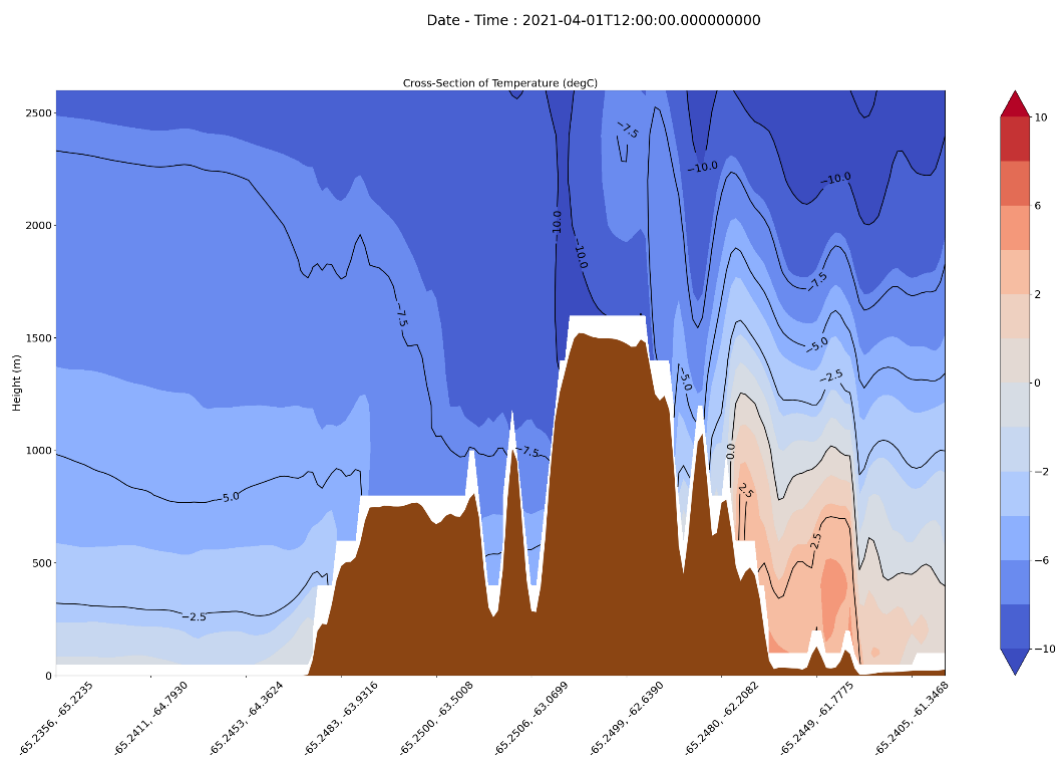


## d) 1 квітня 06:00

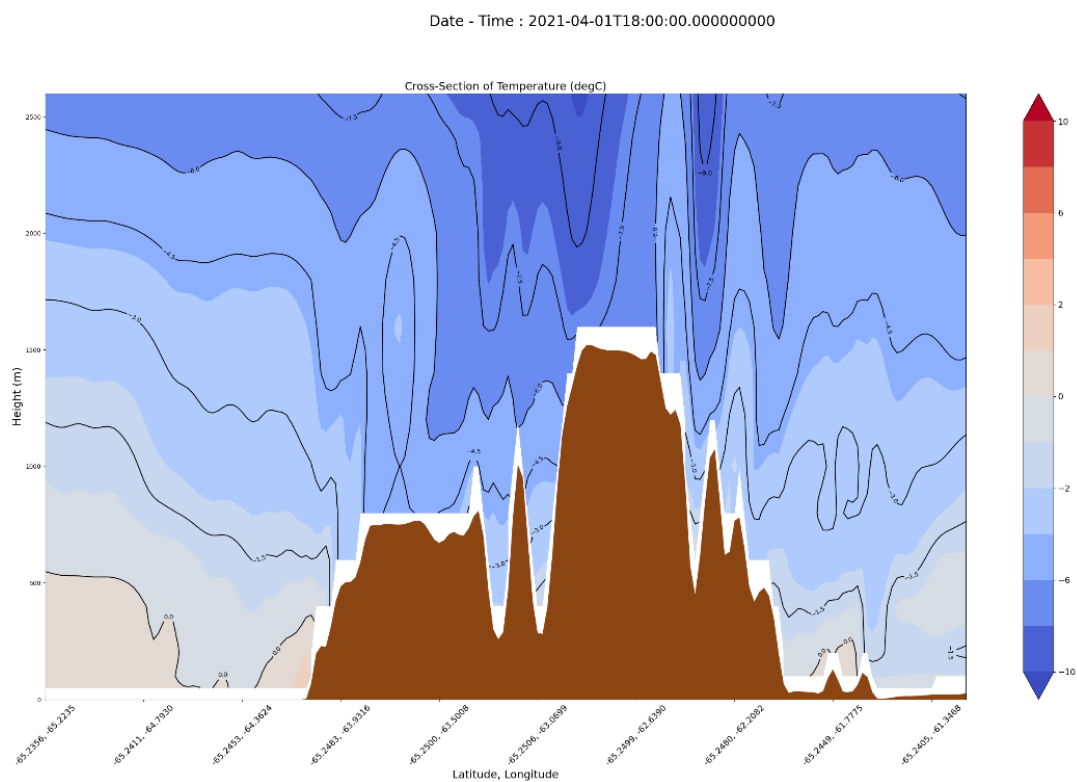
Date - Time : 2021-04-01T06:00:00.000000000



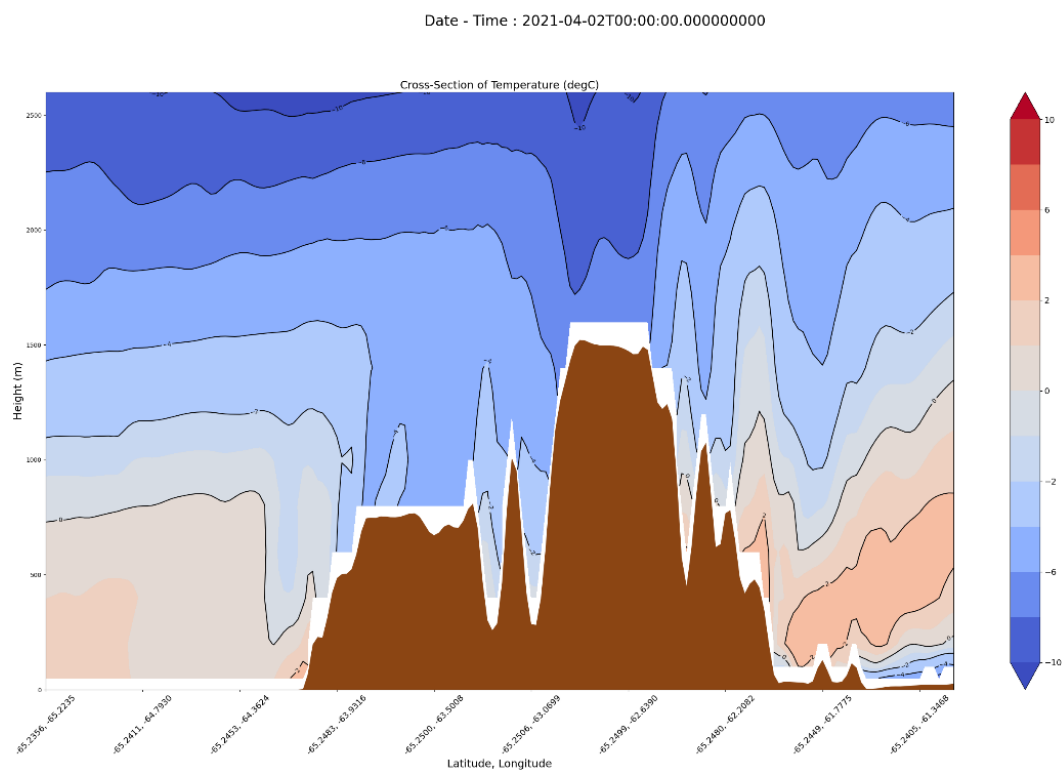
## e) 1 квітня 12:00



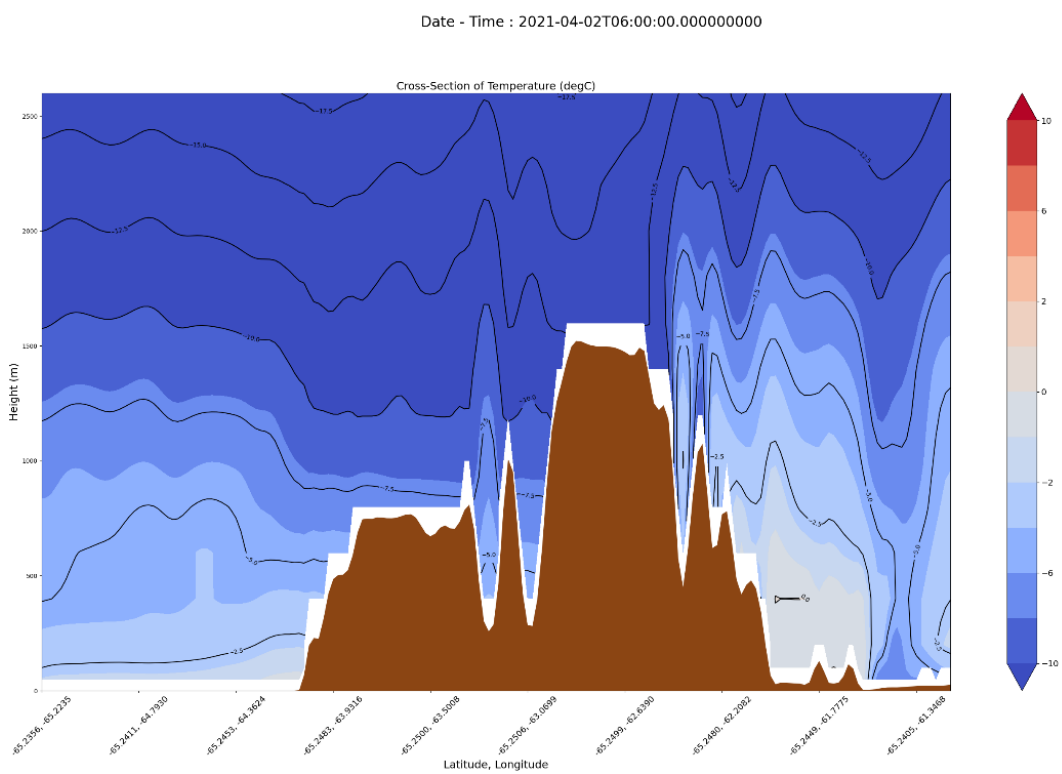
## f) 1 квітня 18:00



## g) 2 квітня 00:00

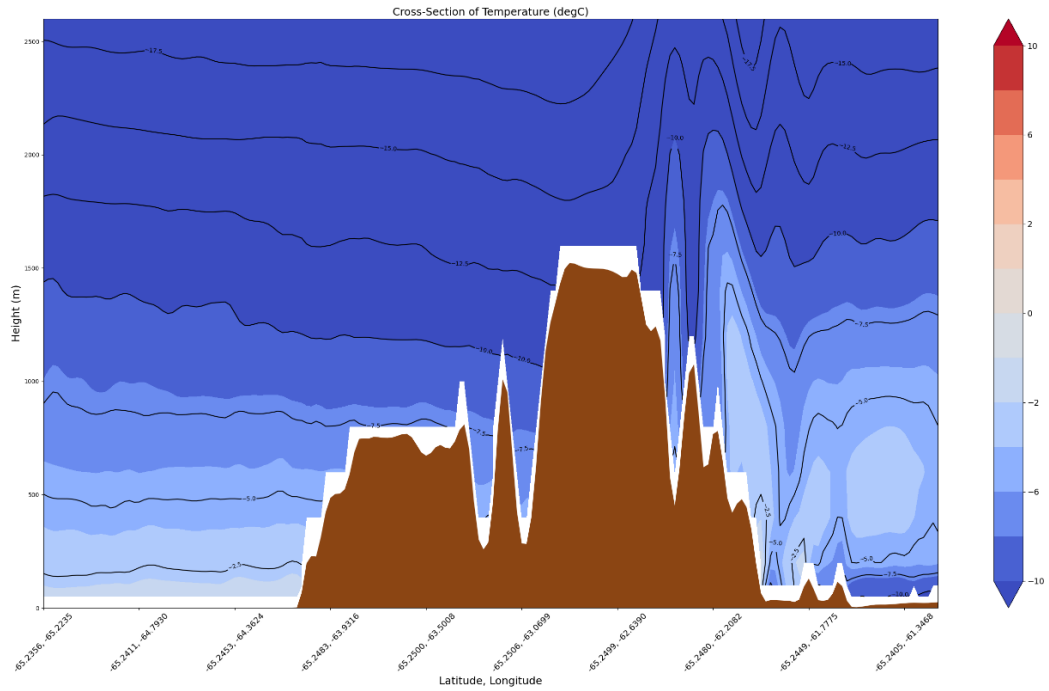


## h) 2 квітня 06:00



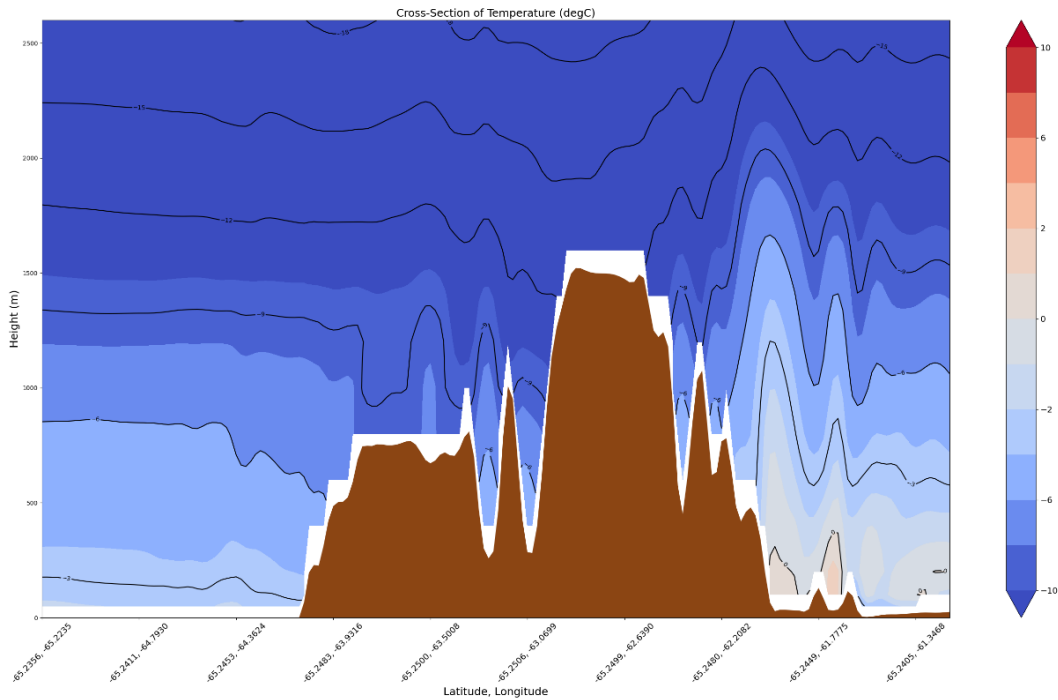
i) 2 квітня 12:00

Date - Time : 2021-04-02T12:00:00.00000000



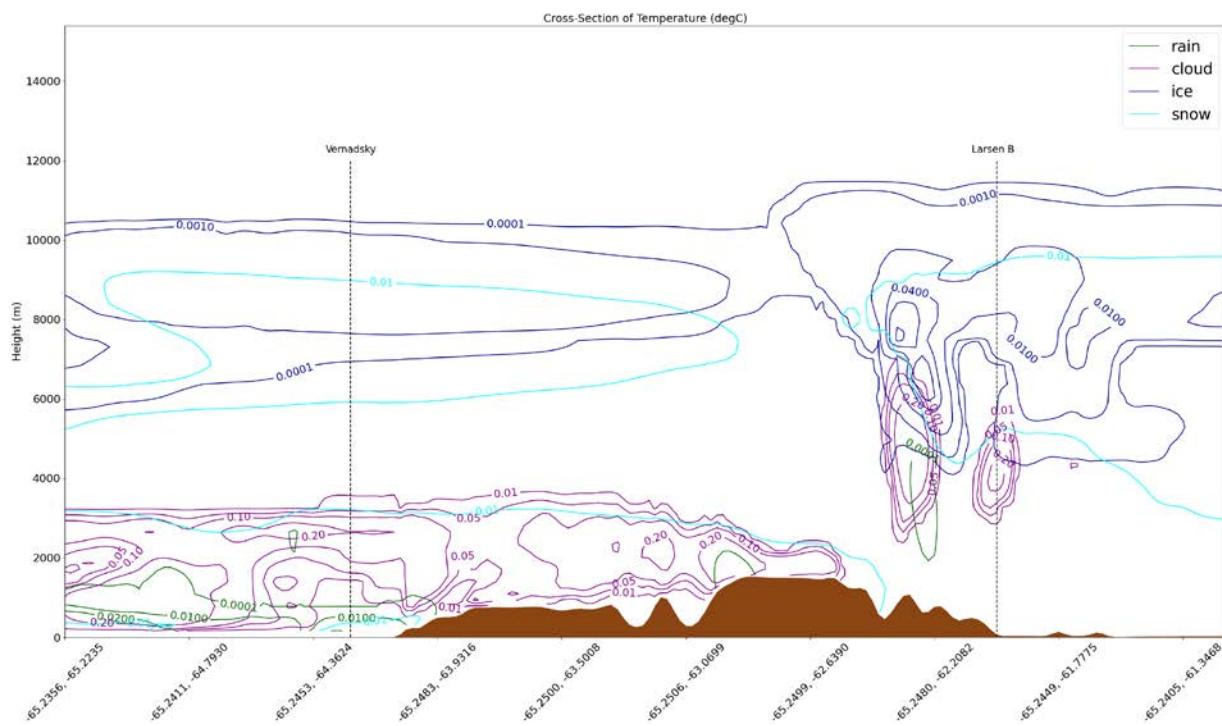
j) 2 квітня 18:00

Date - Time : 2021-04-02T18:00:00.00000000

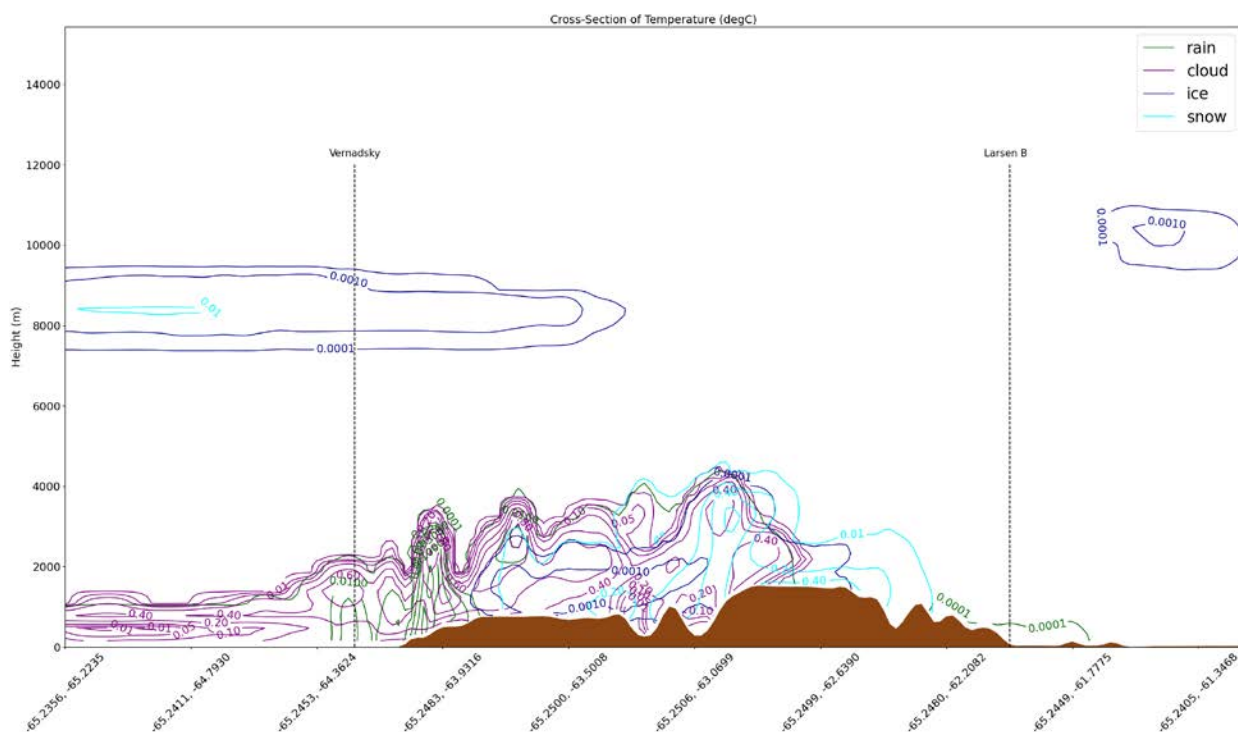


### БЗ. Масові концентрації крапель дощу, хмар, кристалів льоду та снігу у вертикальному перерізі (г/кг)

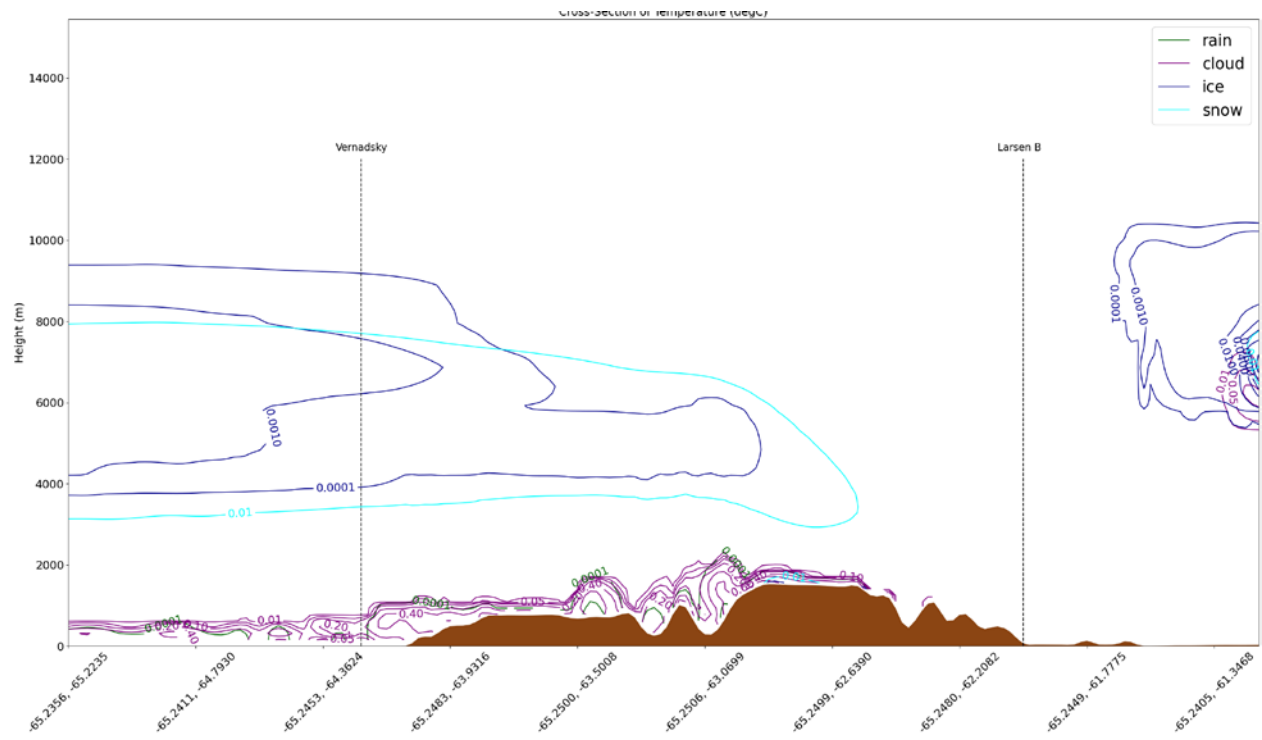
а) 31 березня 12:00



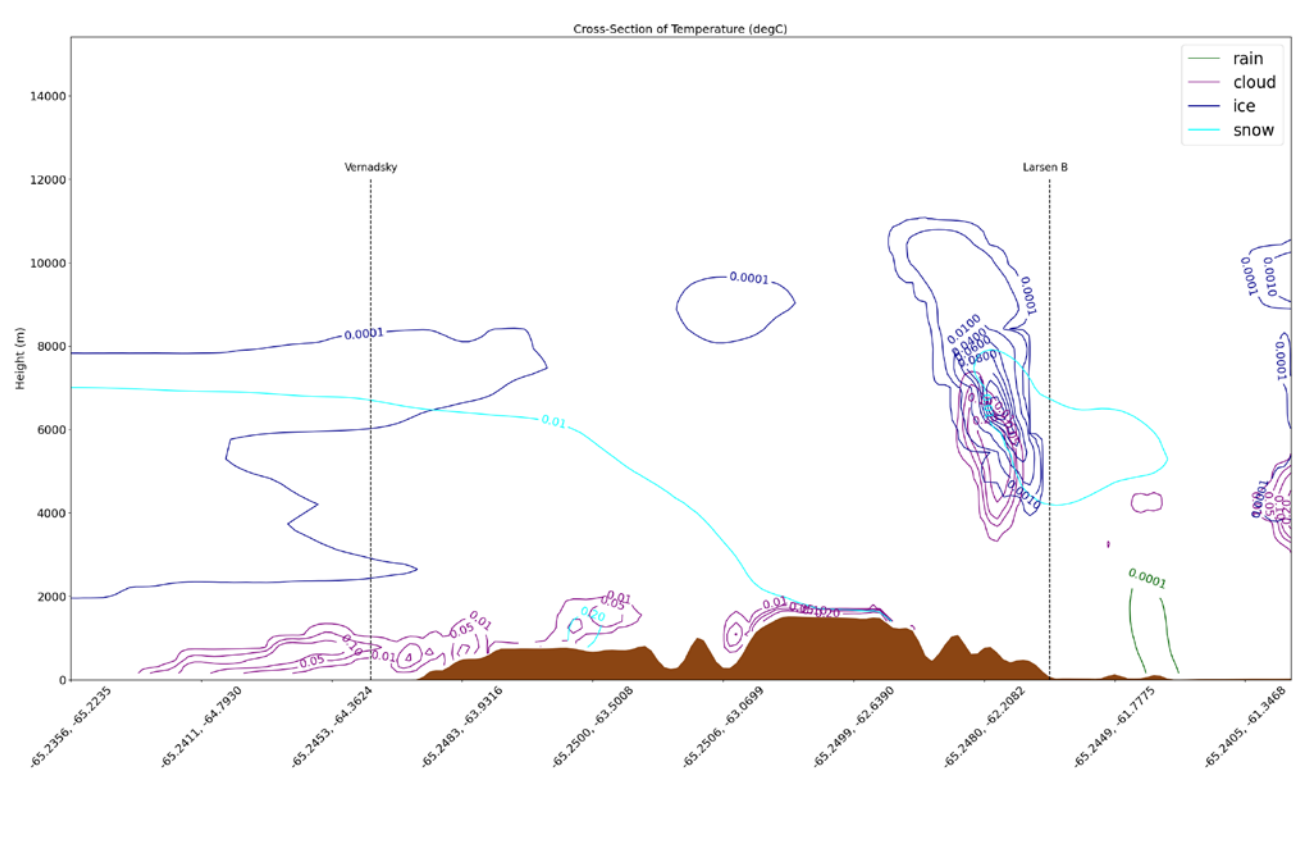
б) 31 березня 18:00



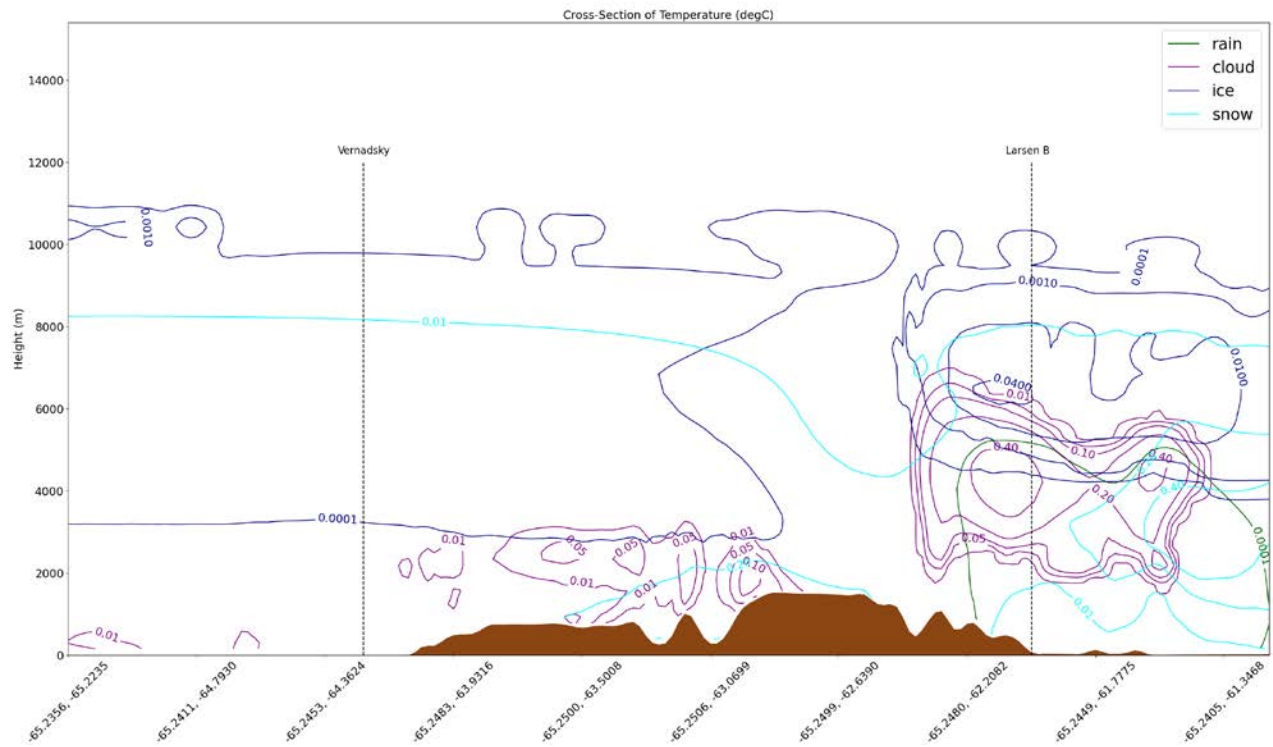
с) 1 квітня 00:00



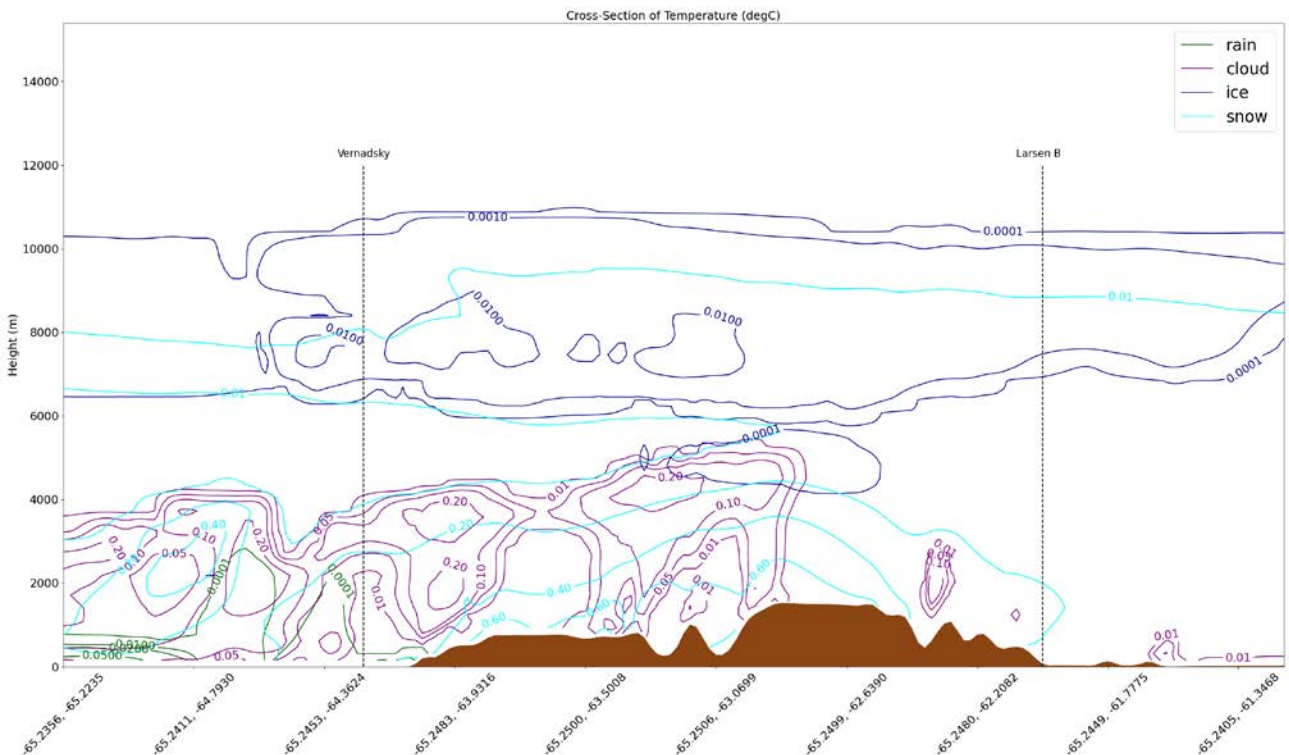
d) 1 квітня 06:00



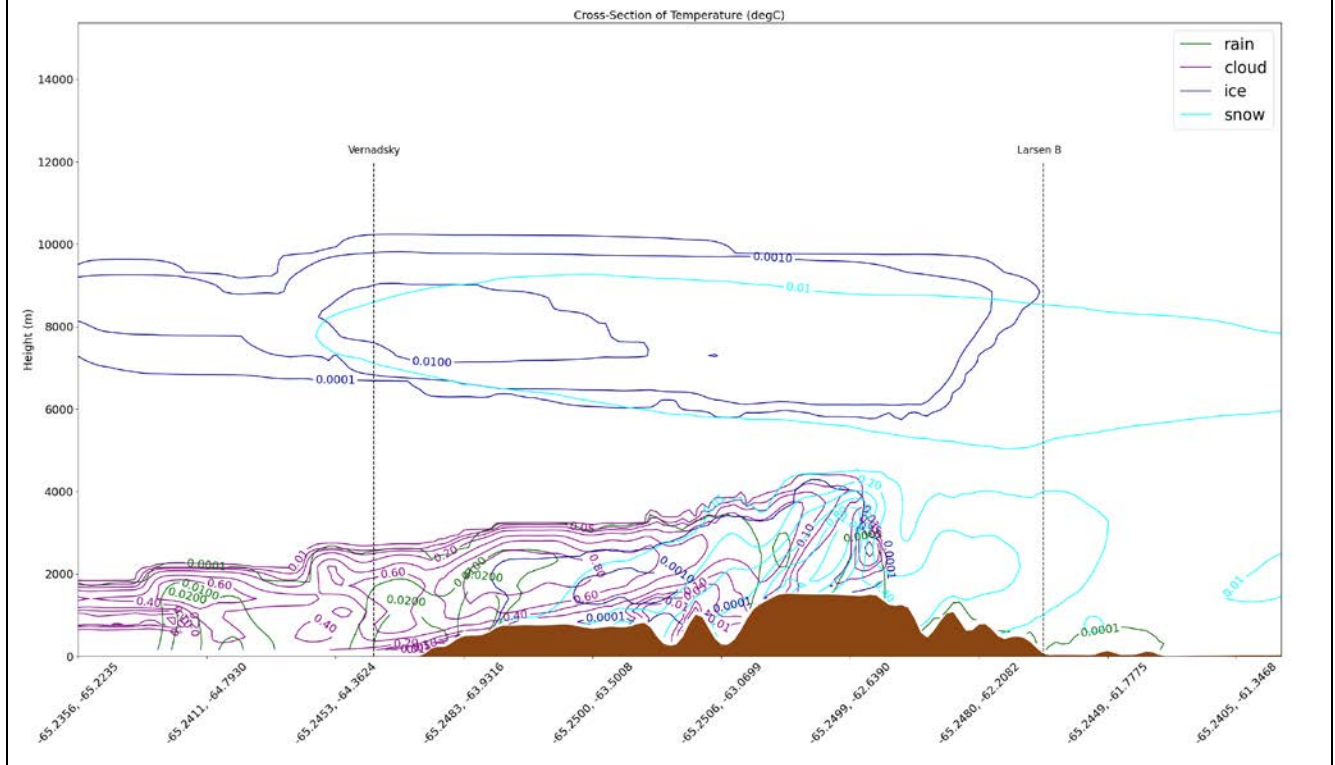
е) 1 квітня 12:00



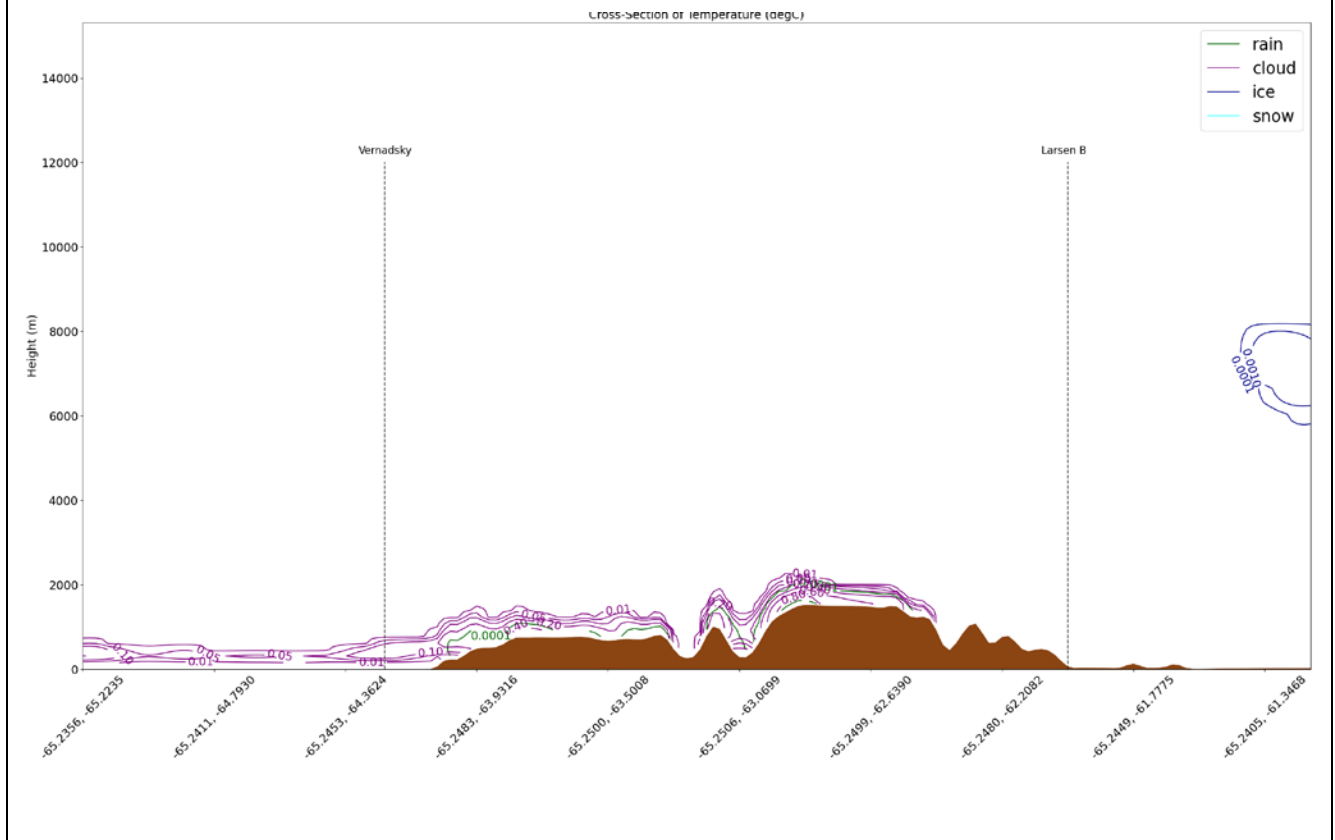
ф) 1 квітня 18:00



g) 2 квітня 00:00

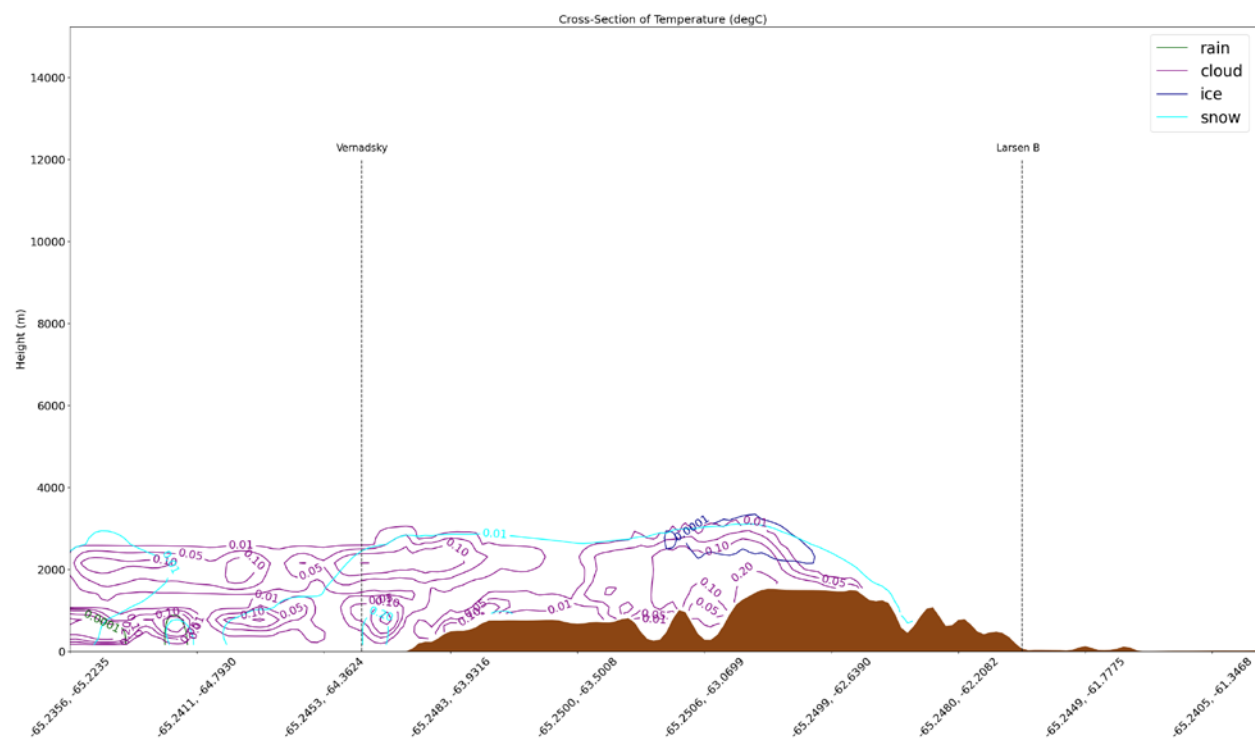


h) 2 квітня 06:00

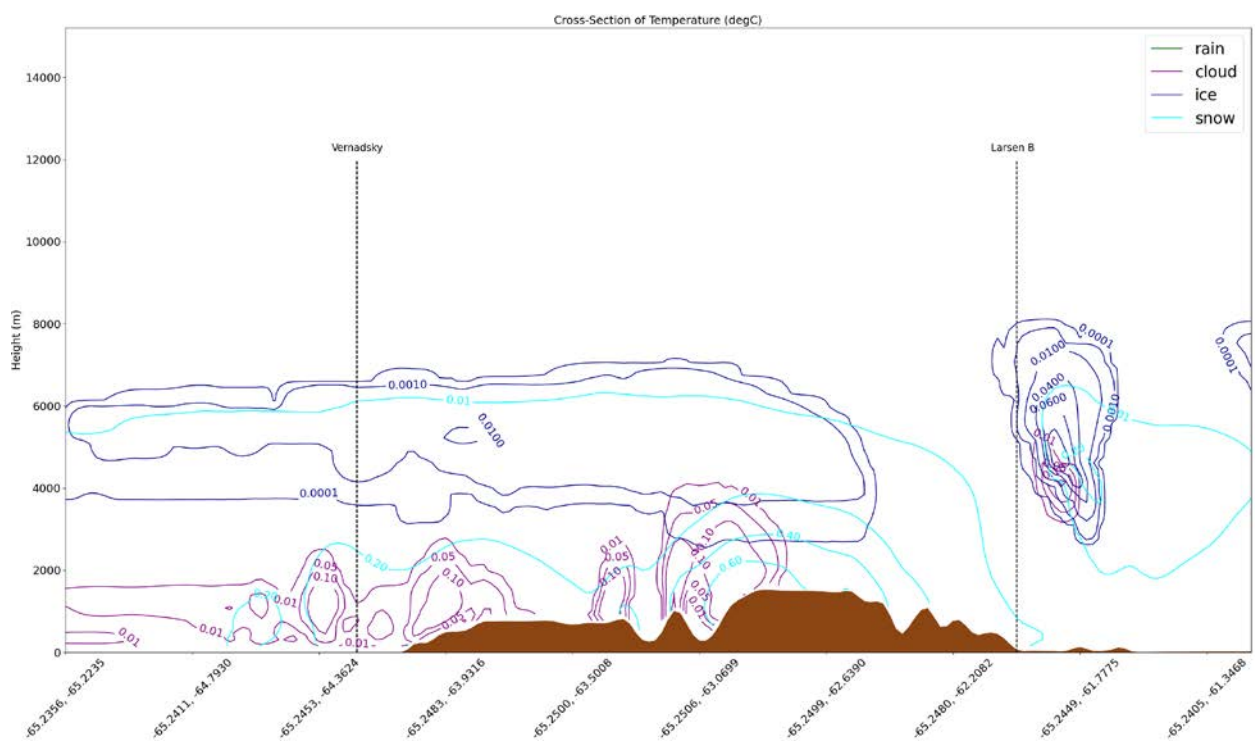




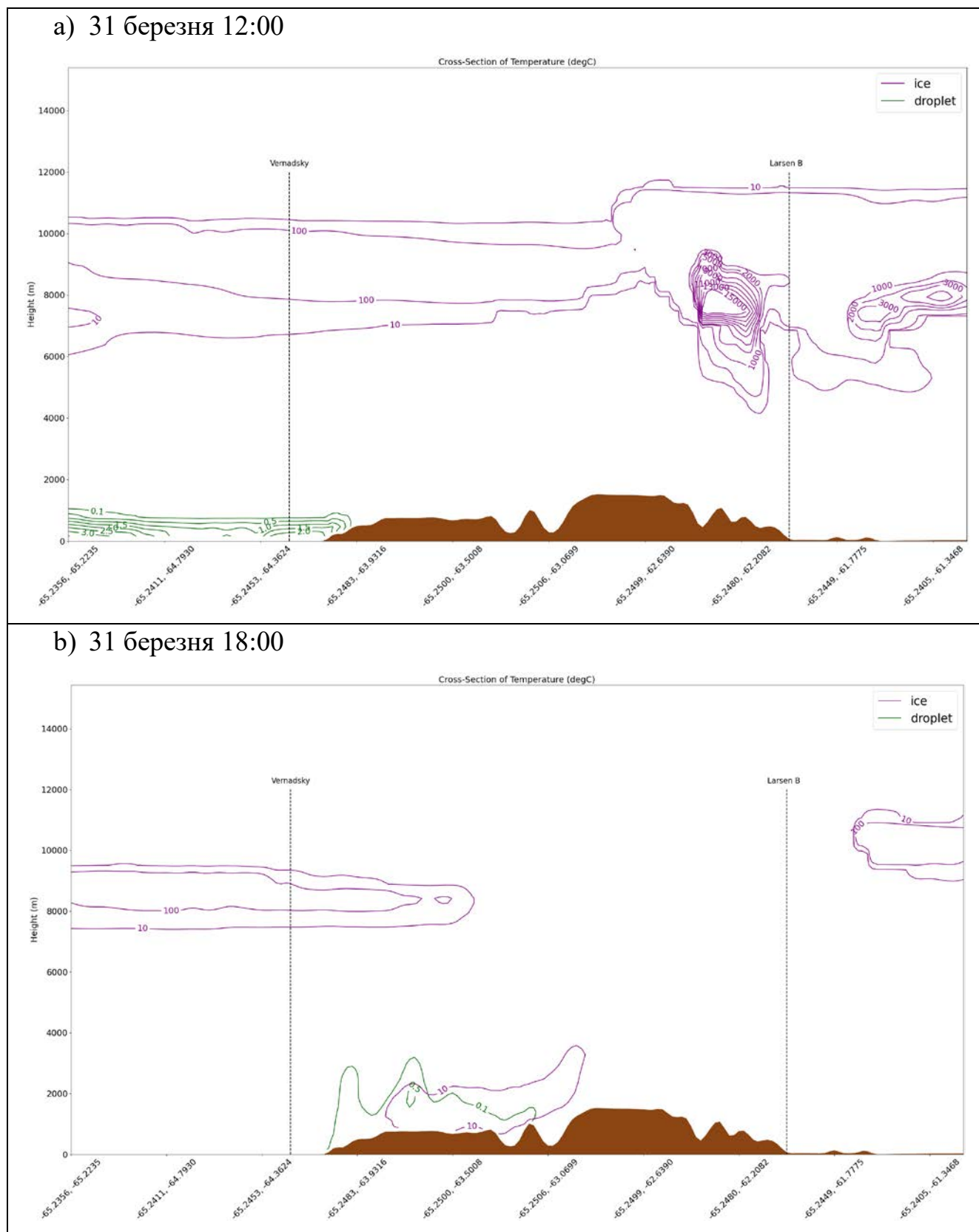
i) 2 квітня 12:00



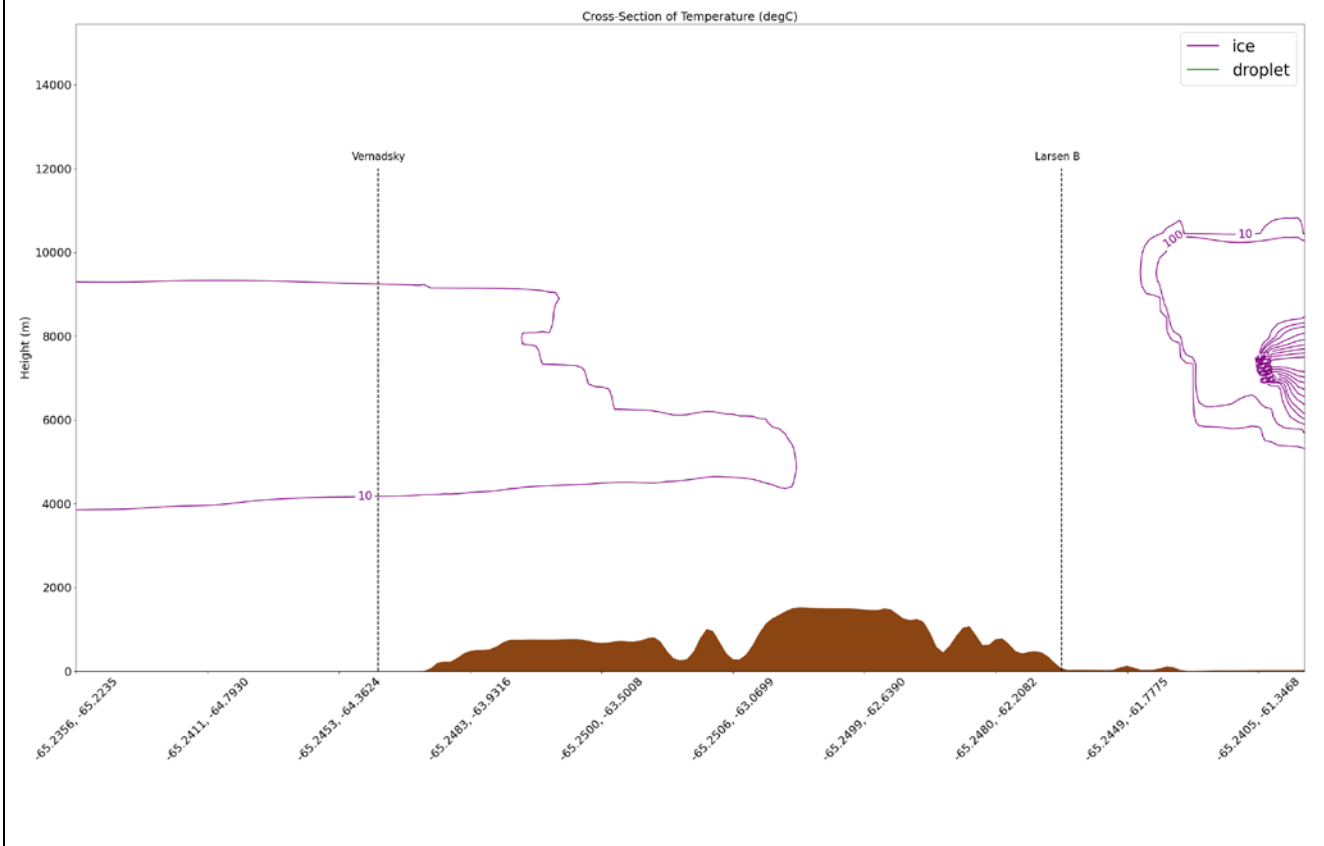
j) 2 квітня 18:00



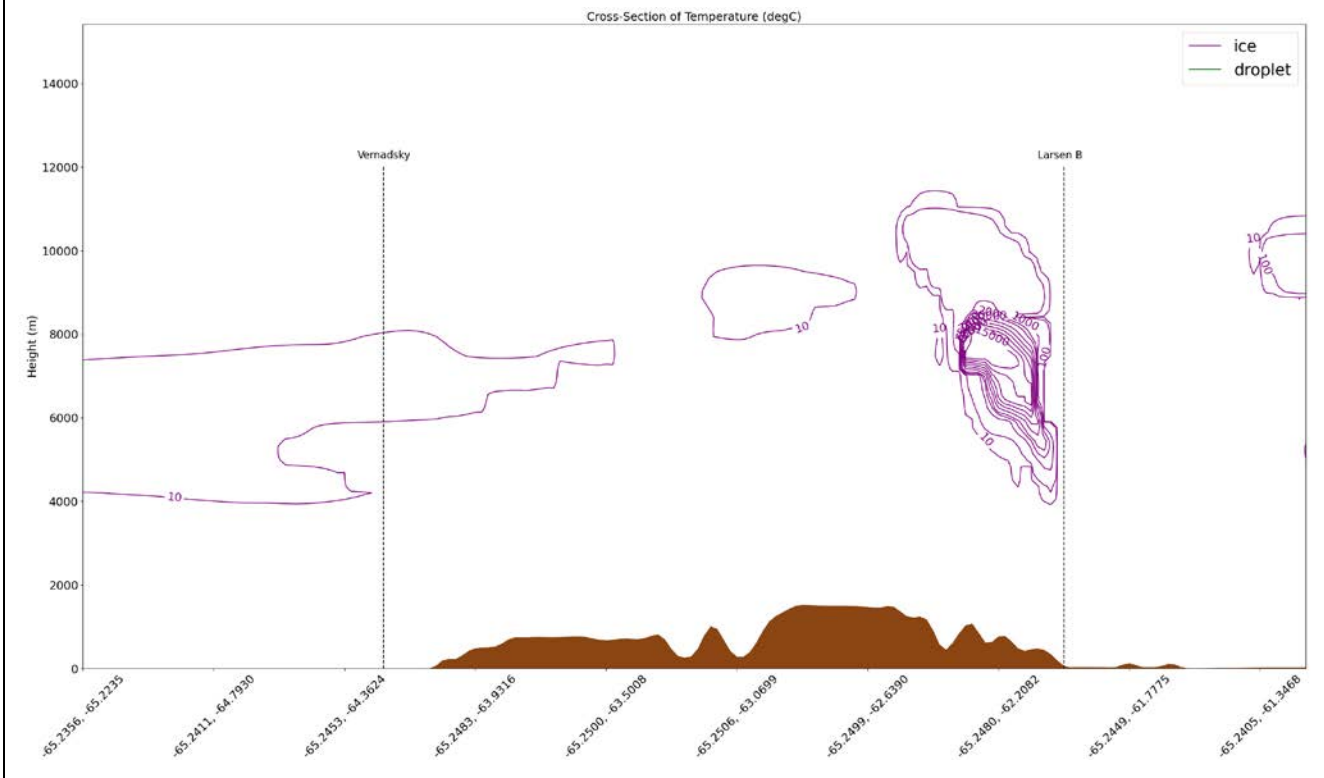
#### Б4. Кількісні концентрації льоду та крапель води у вертикальному перерізі (од/г)



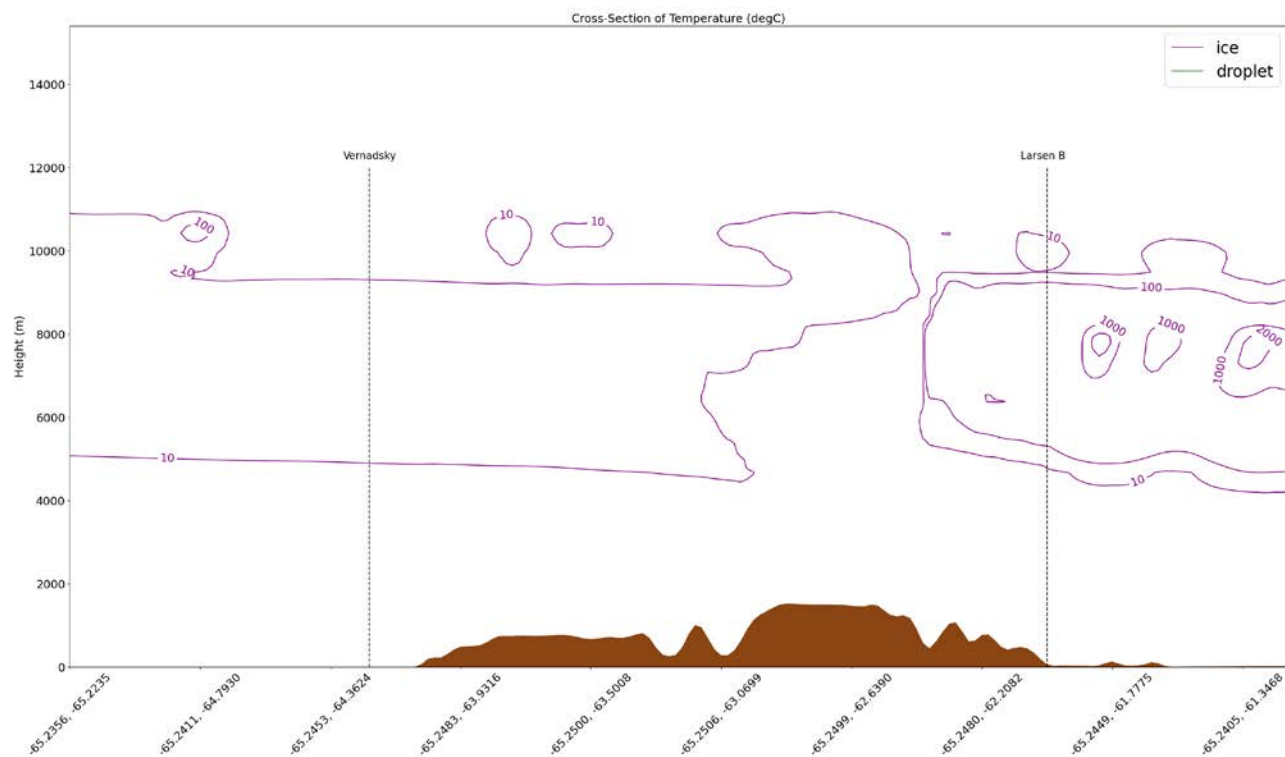
с) 1 квітня 00:00



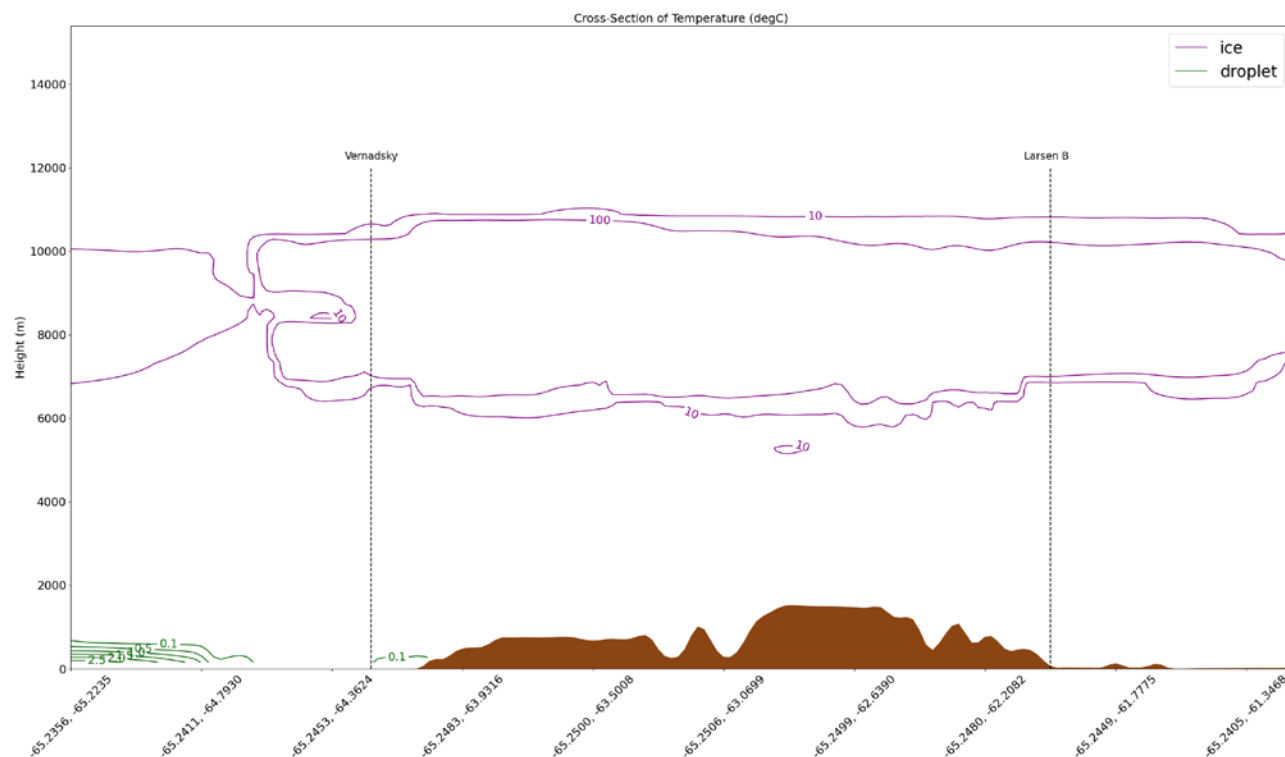
д) 1 квітня 06:00



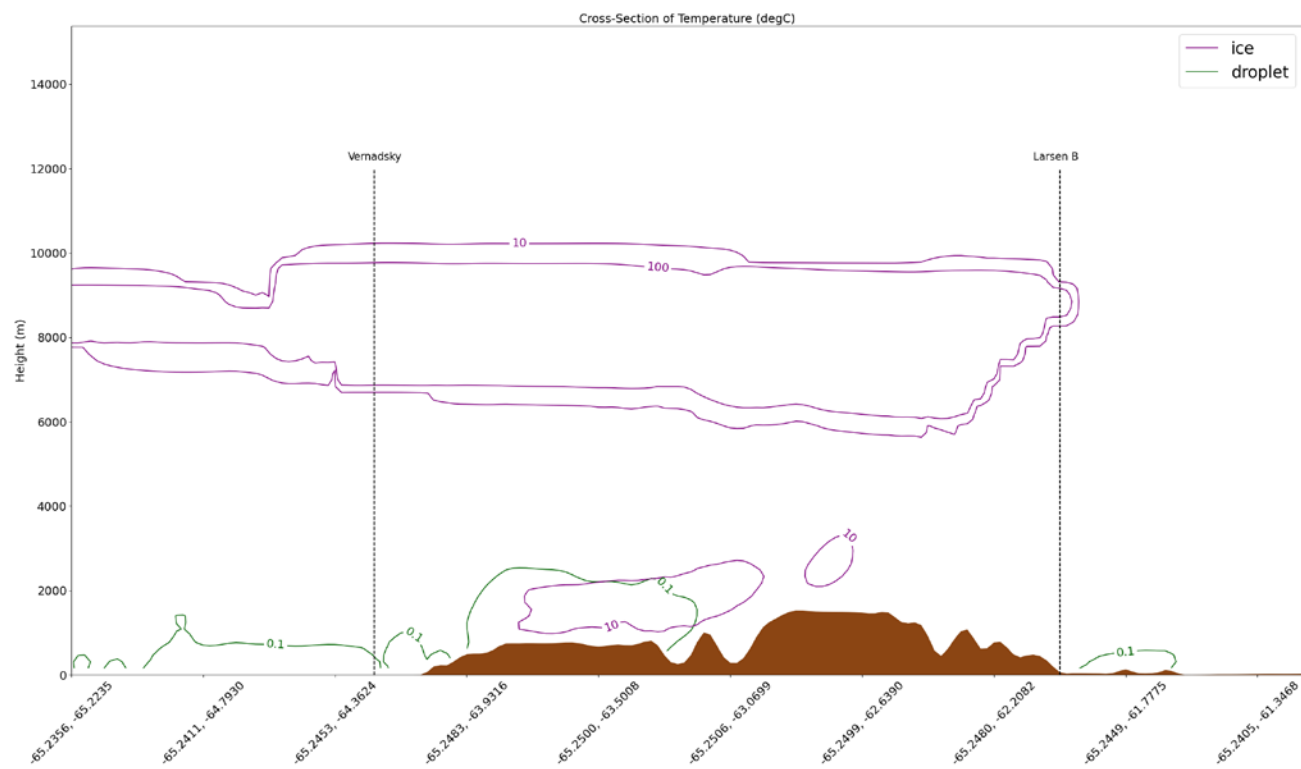
е) 1 квітня 12:00



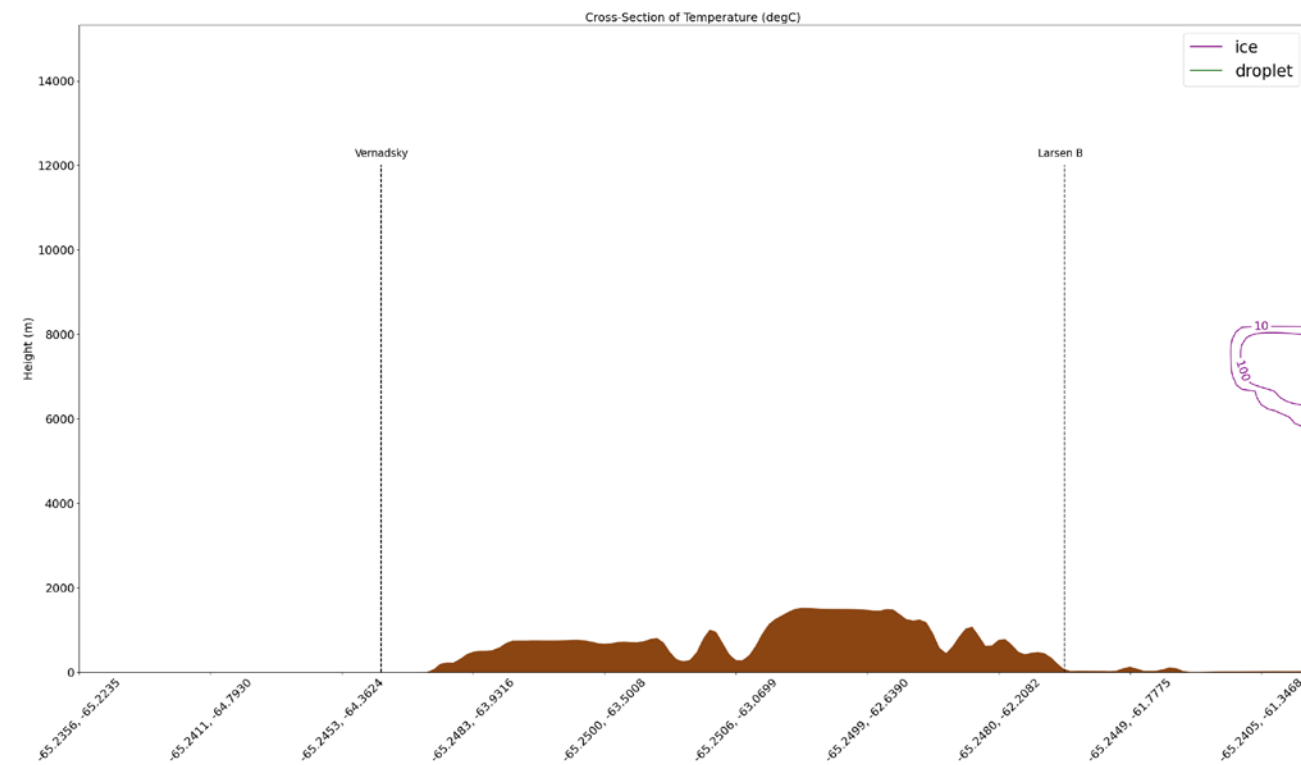
ф) 1 квітня 18:00



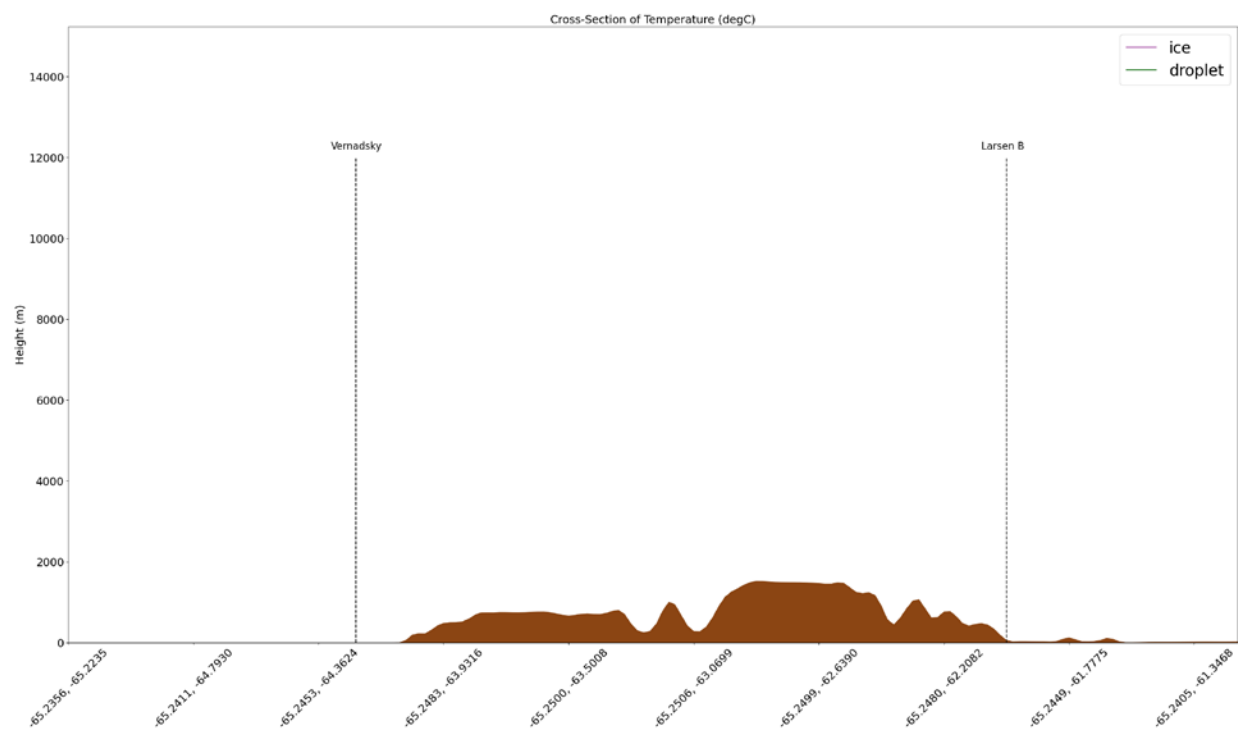
g) 2 квітня 00:00



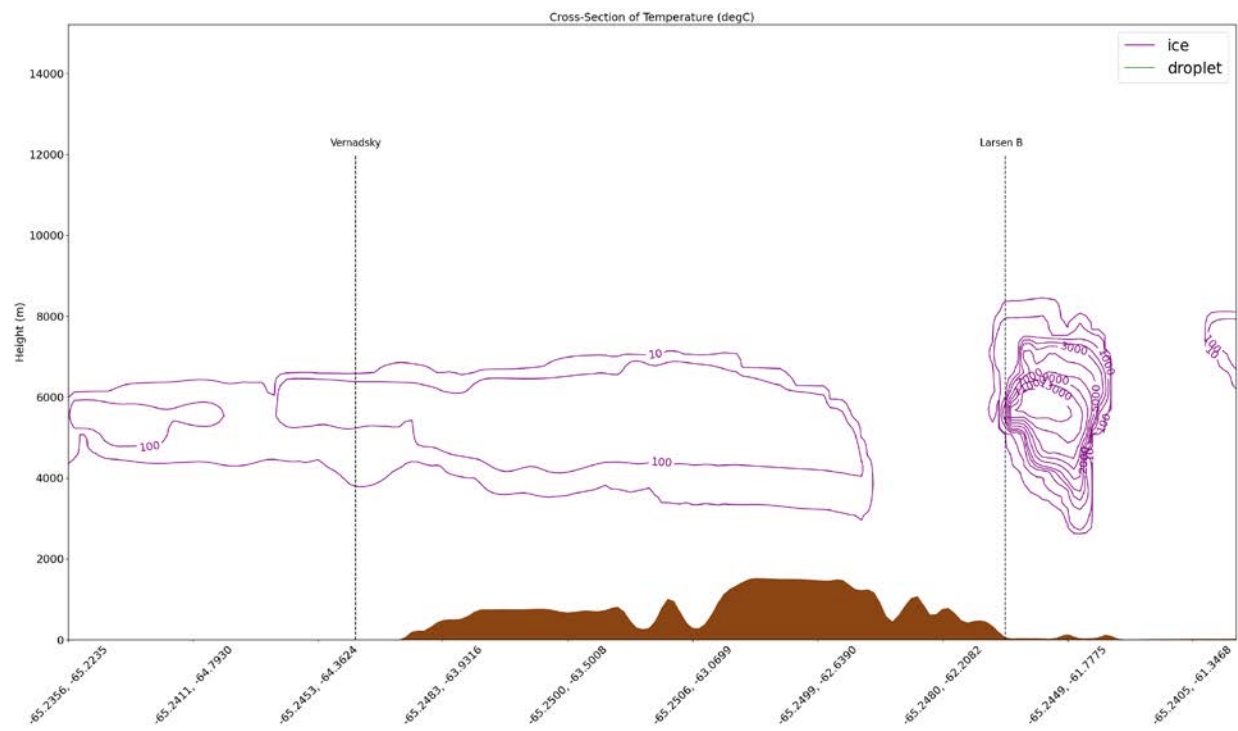
h) 2 квітня 06:00



i) 2 квітня 12:00



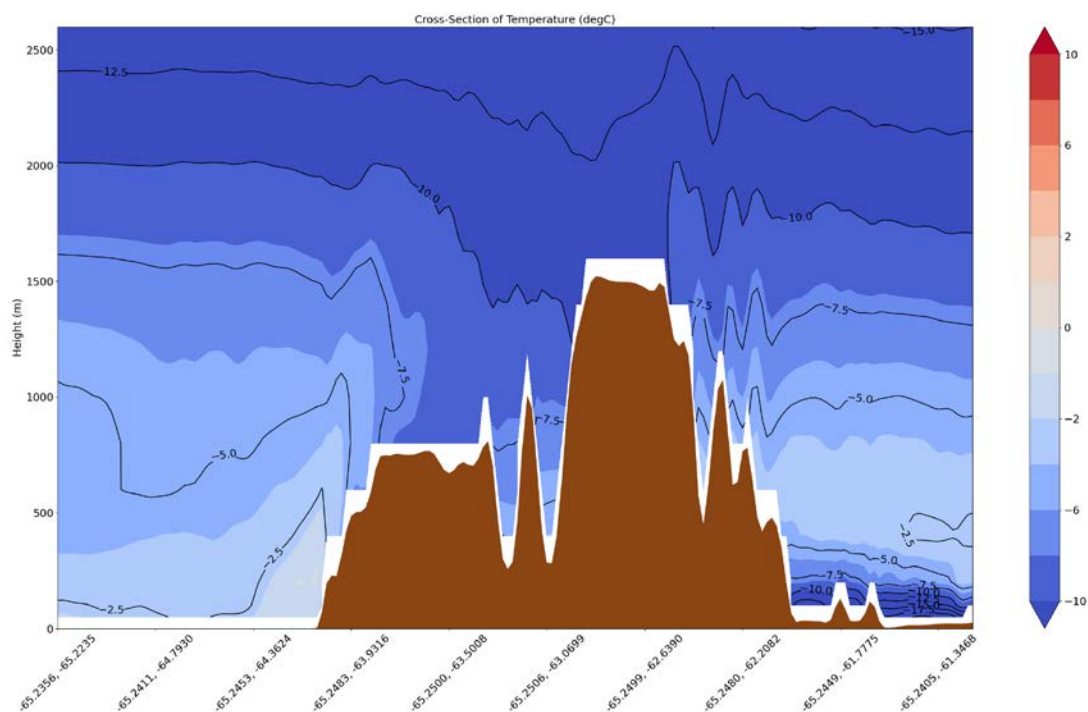
j) 2 квітня 18:00



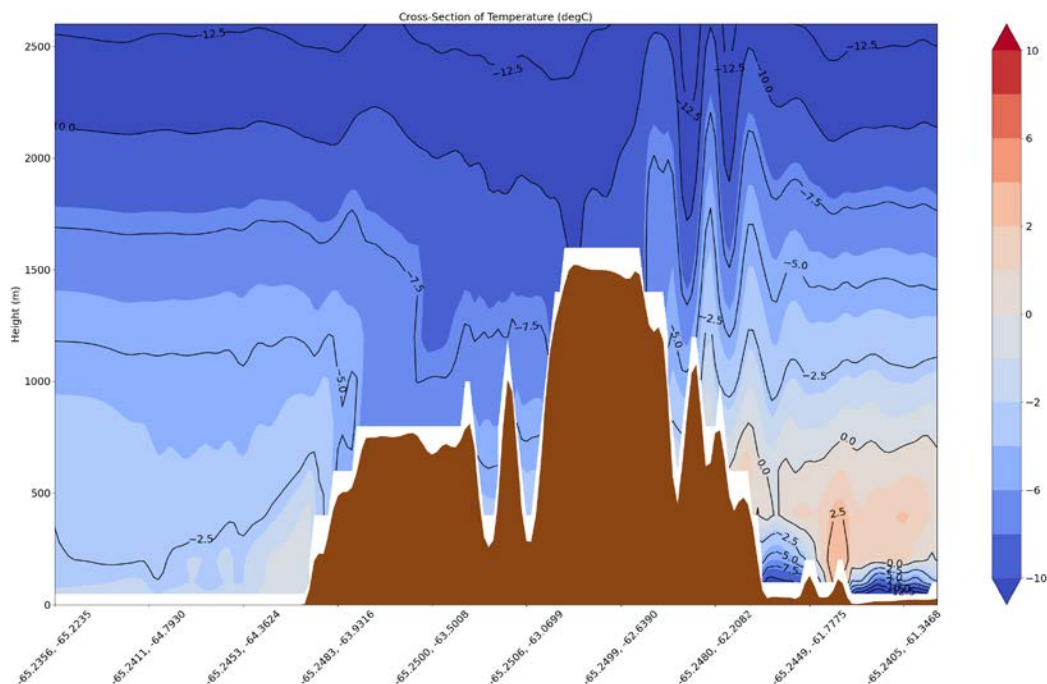
Додаток В. Вертикальний переріз через станцію «Академік Вернадський», гори Антарктичного півострова та бухту льодовика Ларсен В 21–22 серпня 2022 року

В1. Профіль температури повітря у шарі до 2,5 км

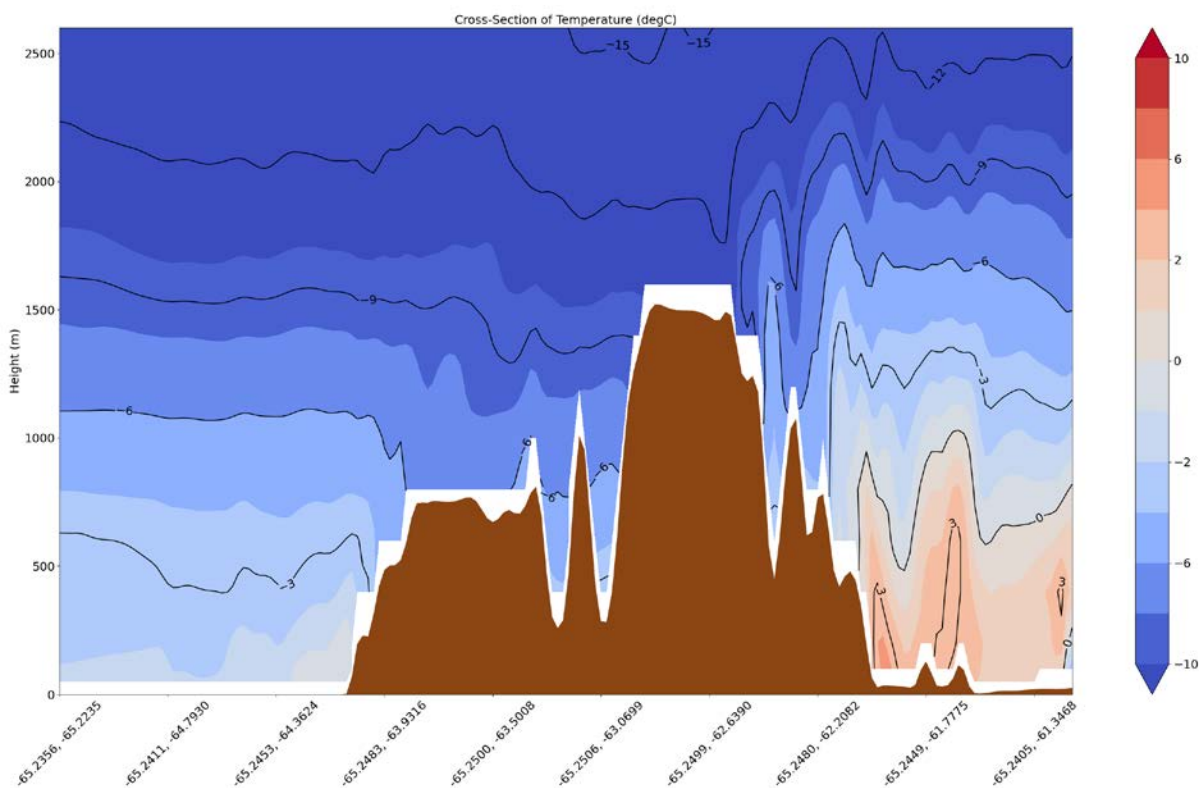
а) 21 серпня 00:00UTC



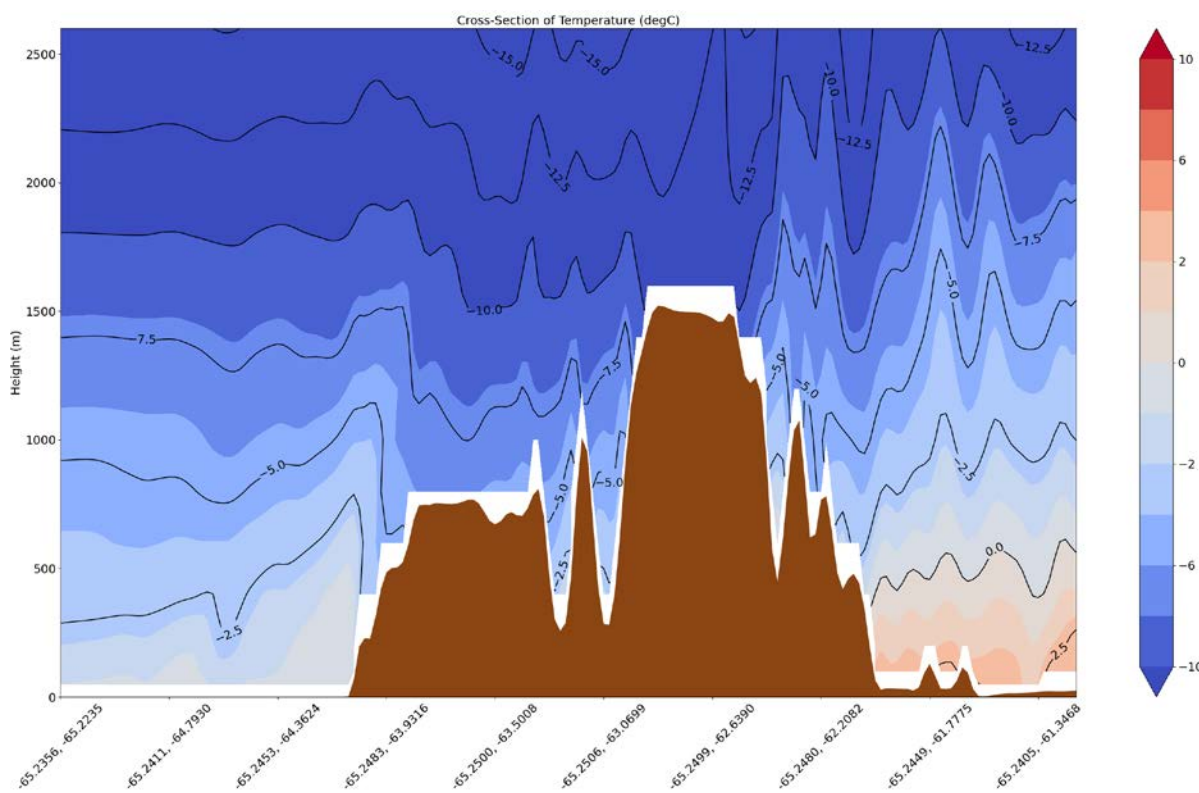
б) 21 серпня 06:00UTC



c) 21 серпня 12:00UTC

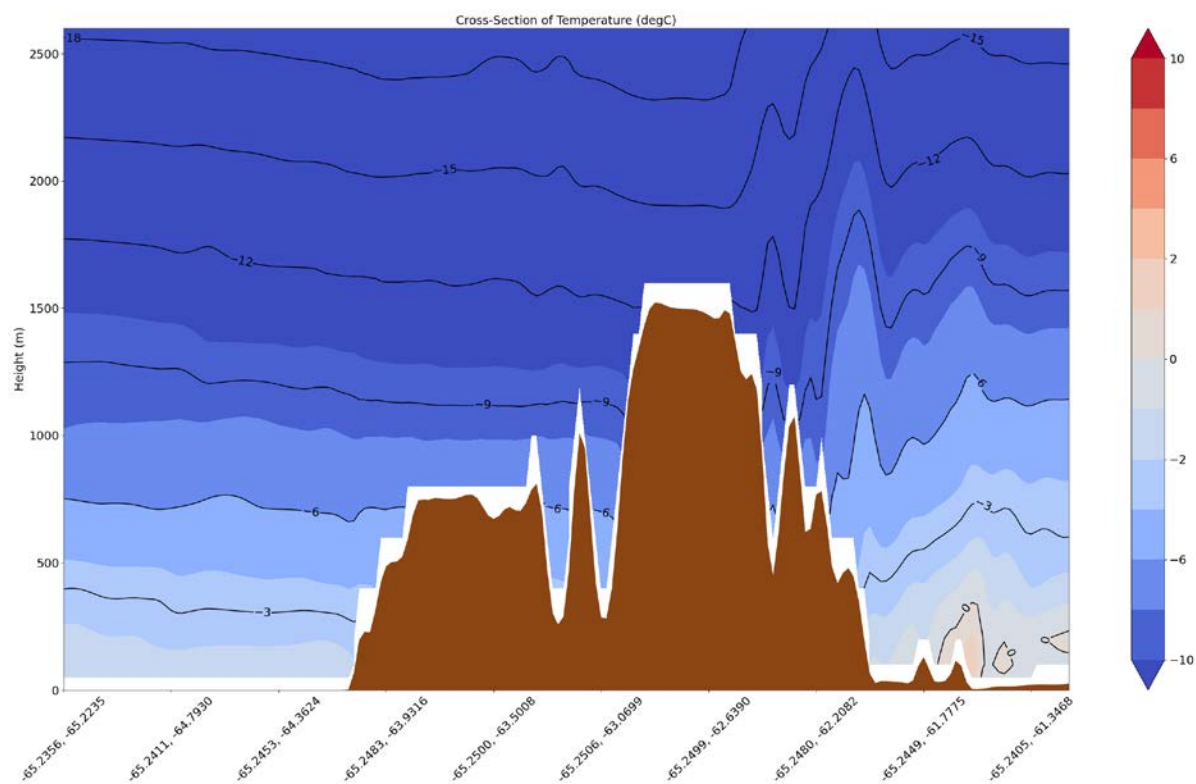


d) 21 серпня 18:00UTC

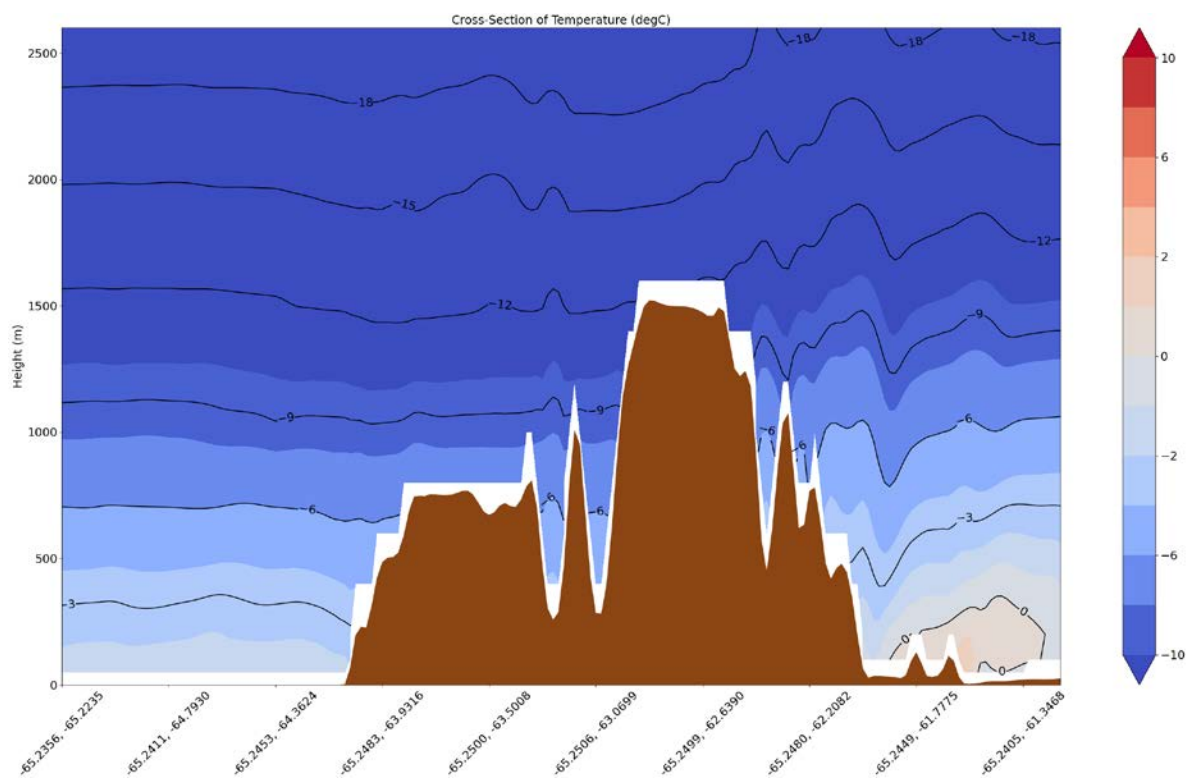




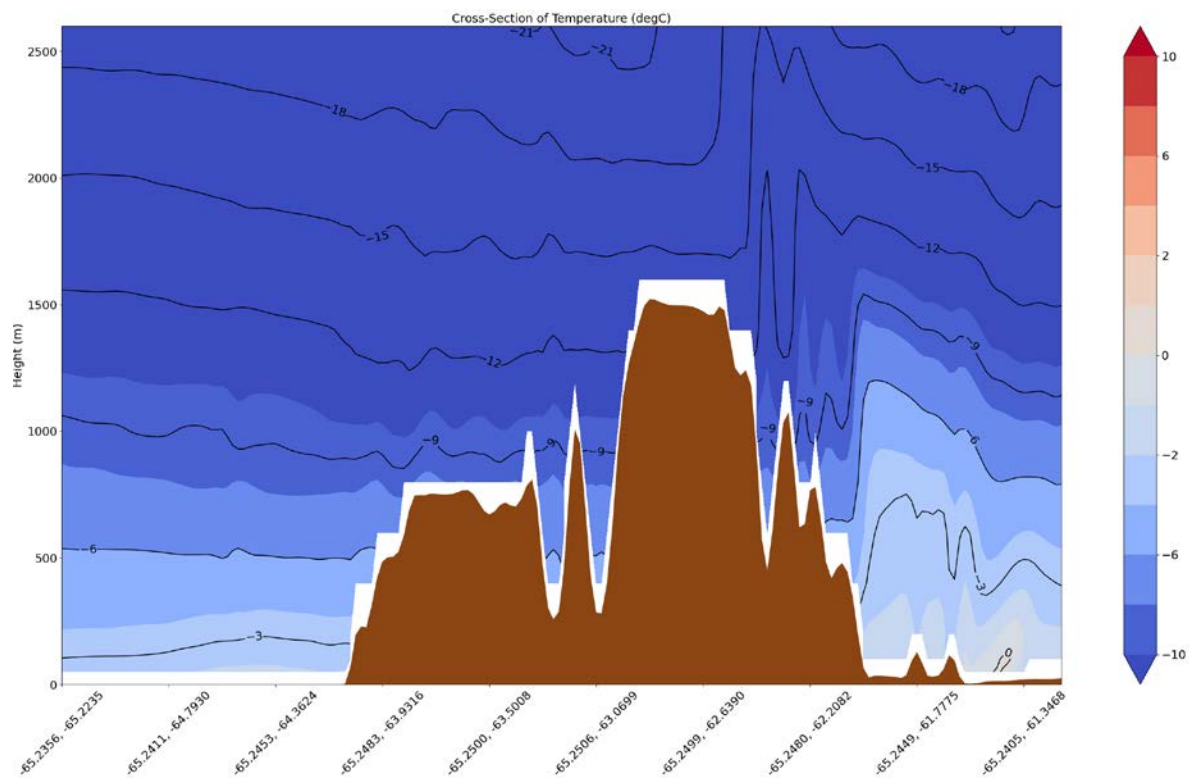
e) 22 серпня 00:00UTC



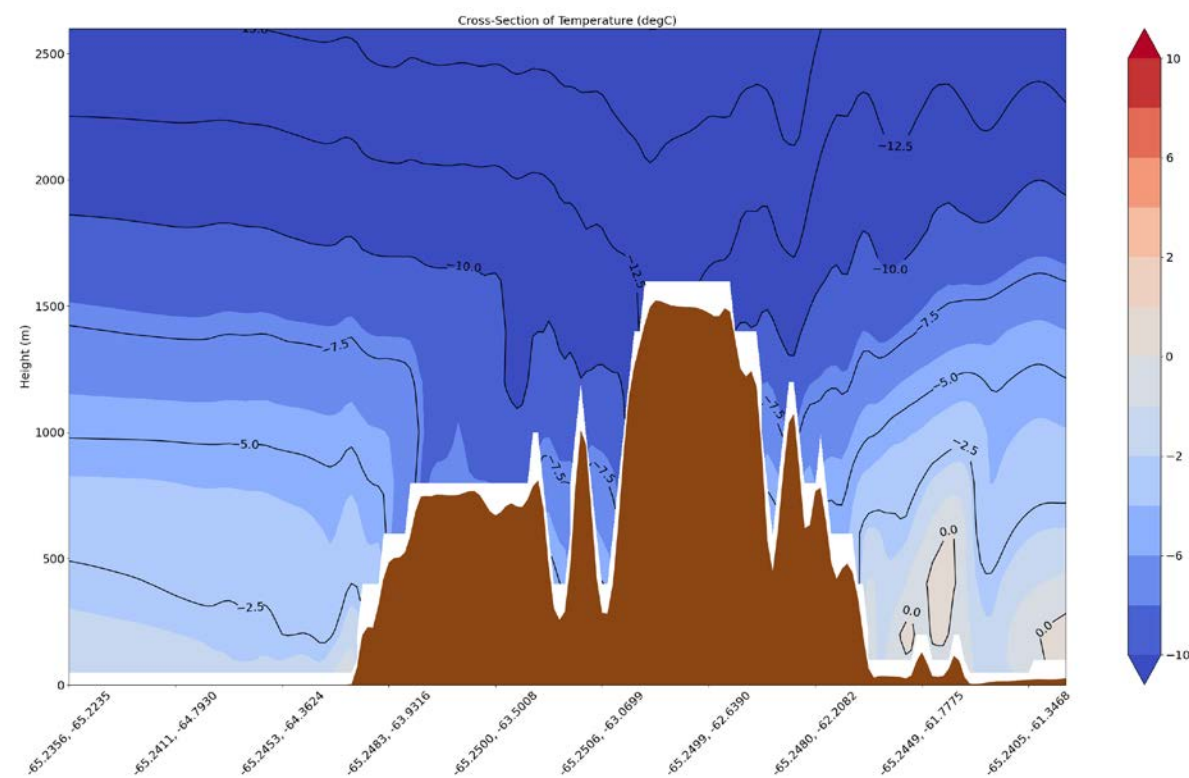
f) 22 серпня 06:00UTC



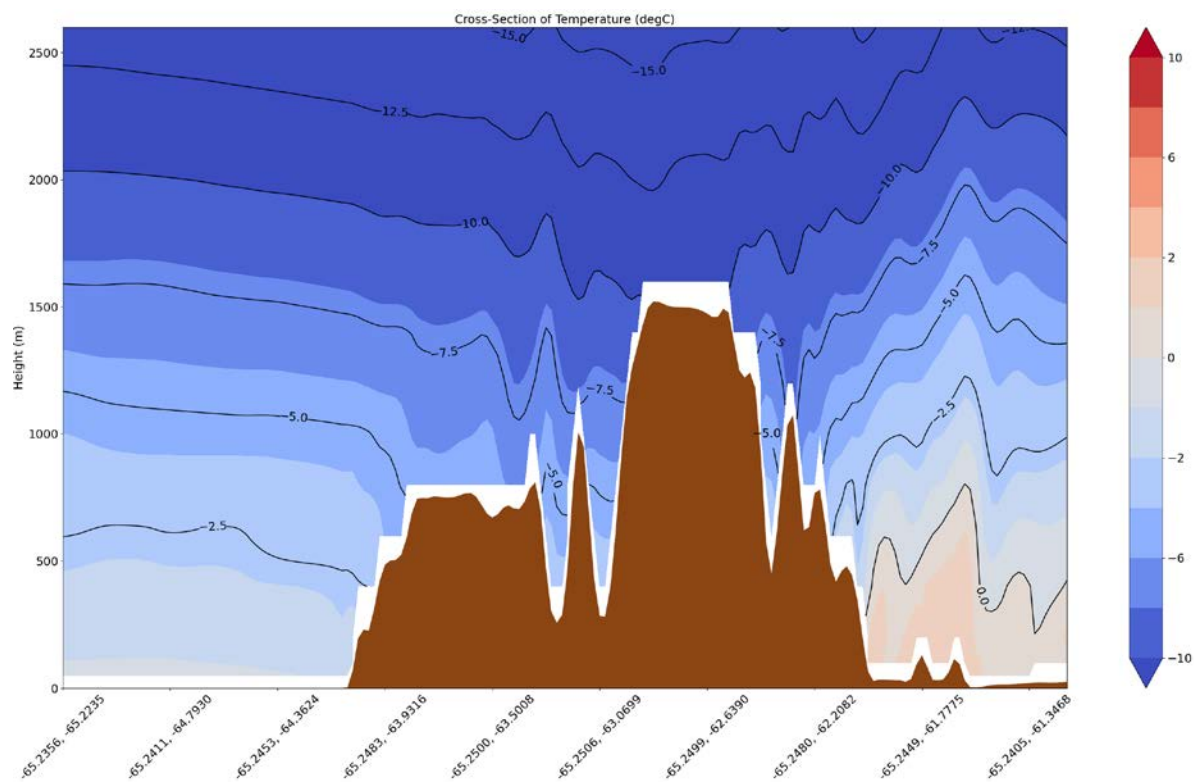
g) 22 серпня 12:00UTC



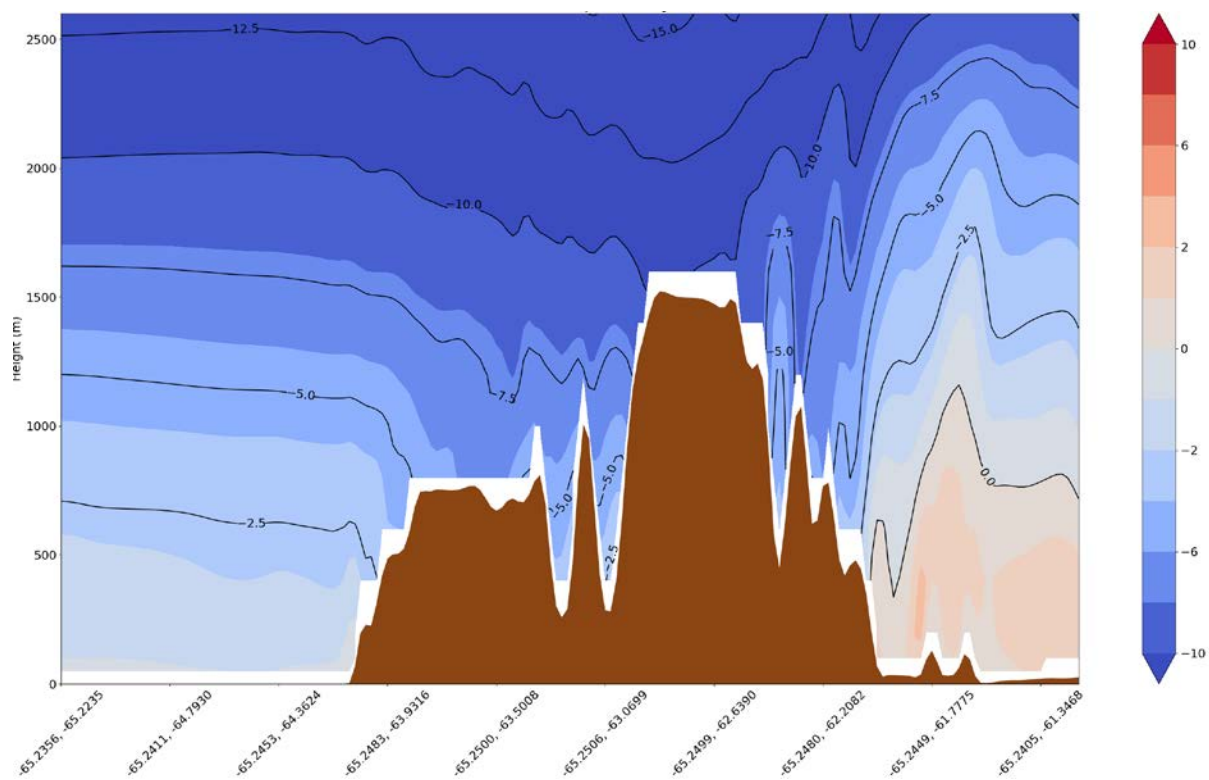
h) 22 серпня 18:00UTC



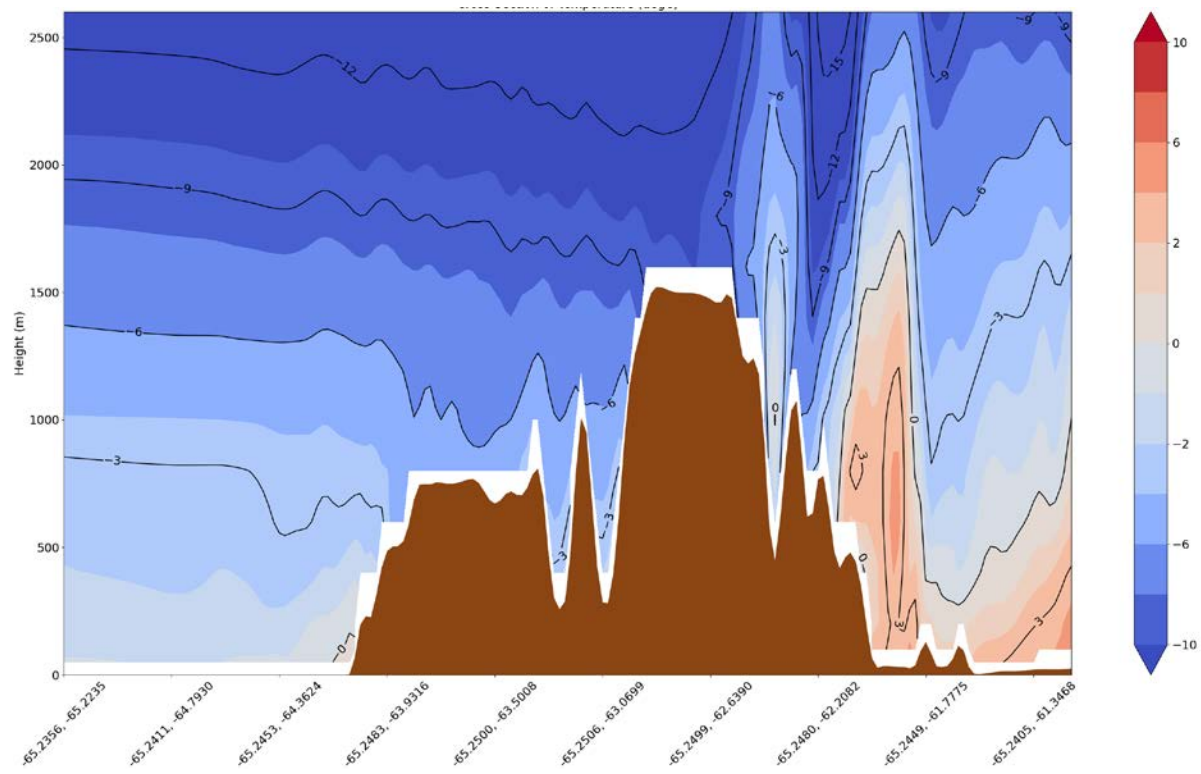
i) 23 серпня 00:00UTC



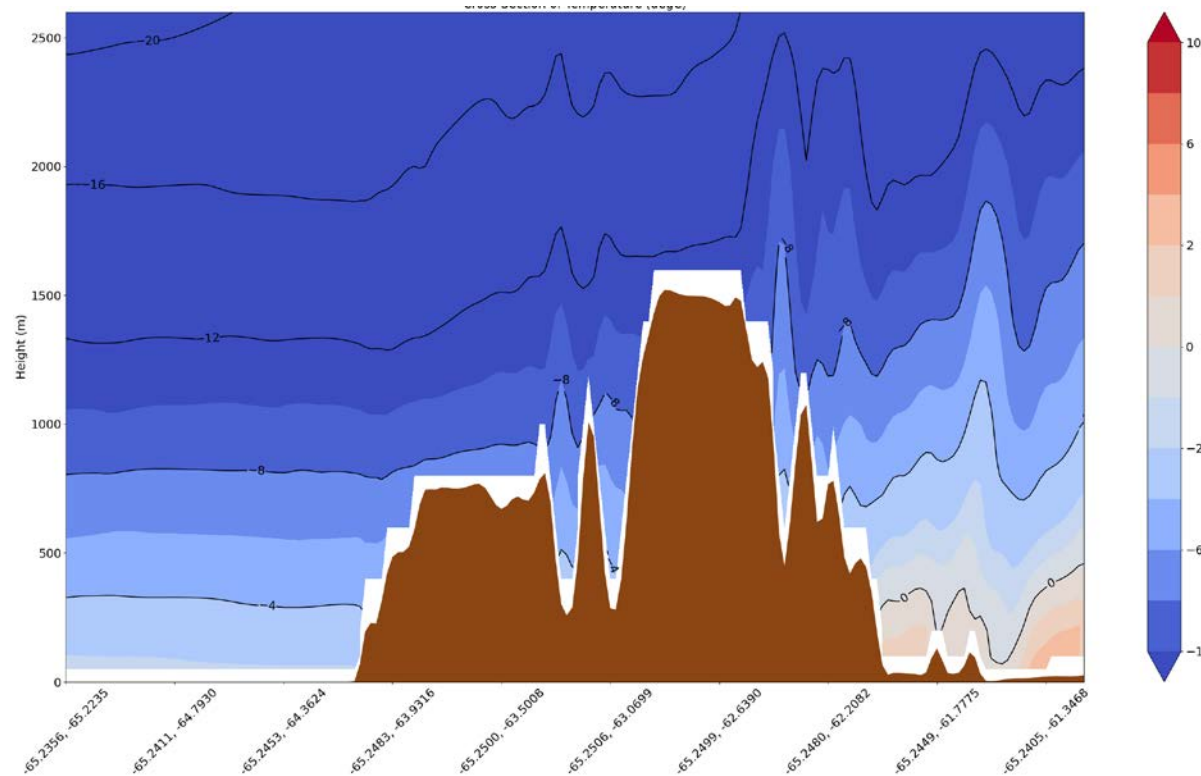
j) 23 серпня 06:00UTC



к) 23 серпня 12:00UTC

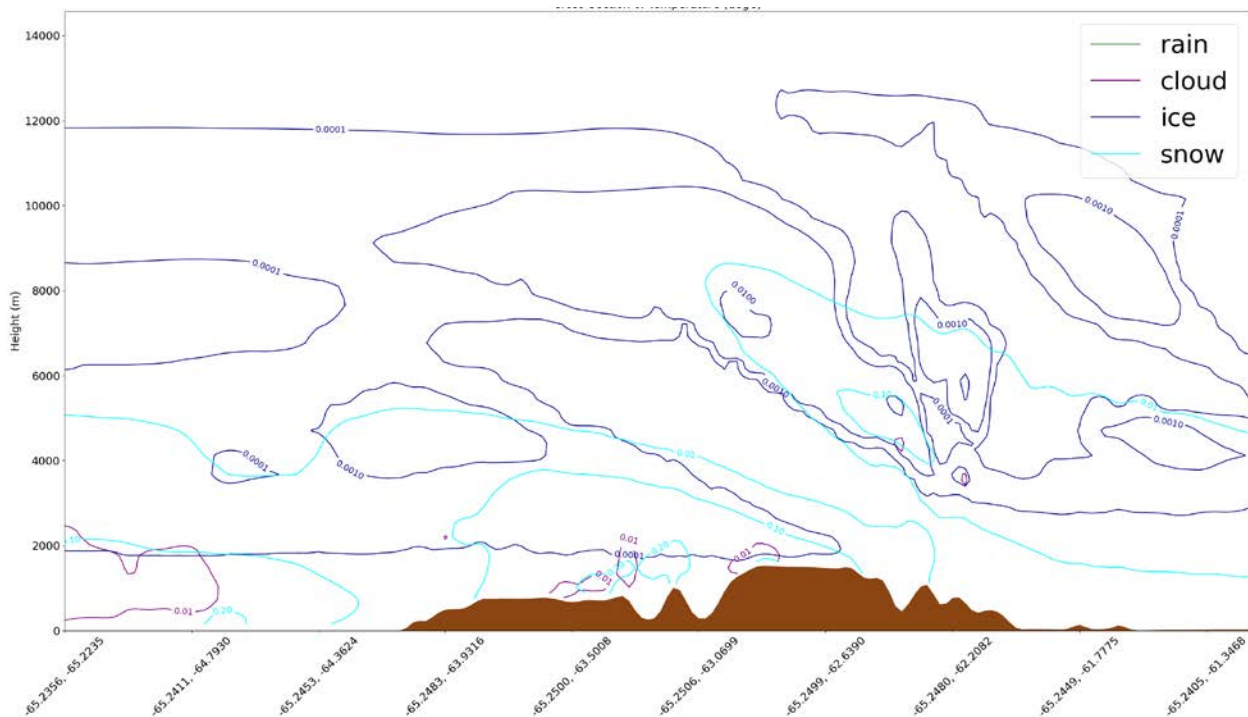


л) 23 серпня 18:00UTC

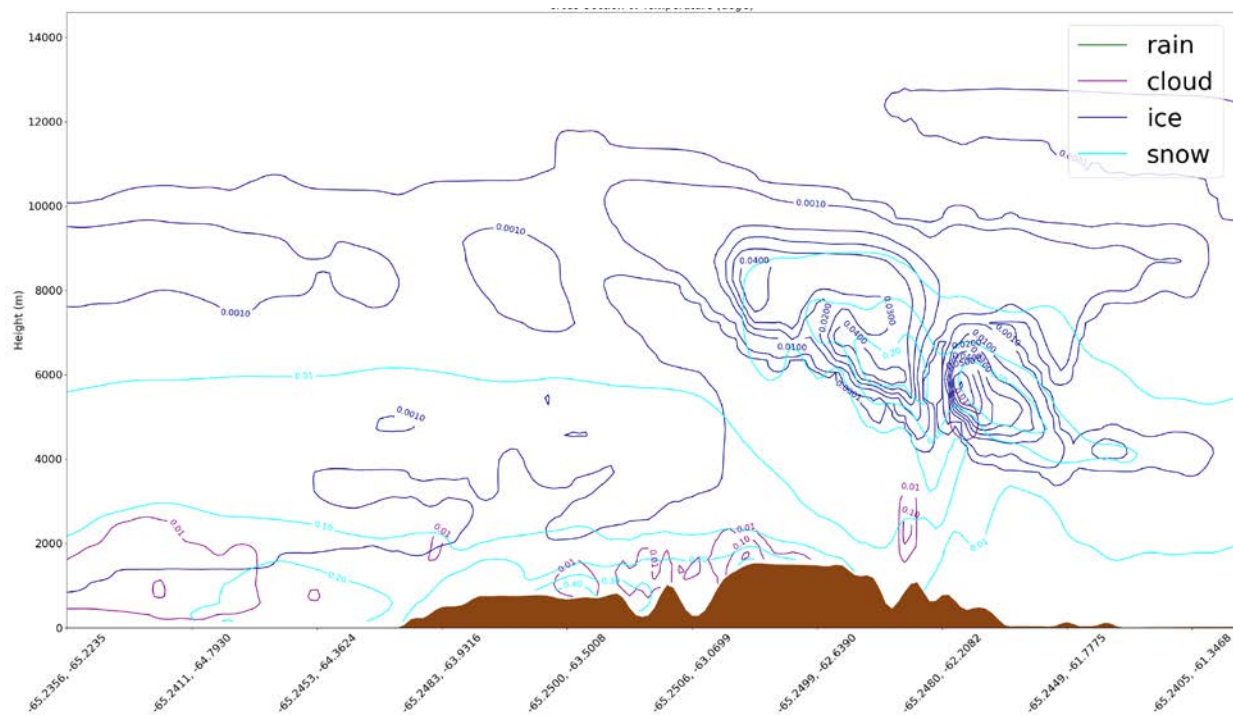


## В2. Масові концентрації крапель дощу (rain) і хмар (cloud), кристалів льоду (ice) та снігу (snow)

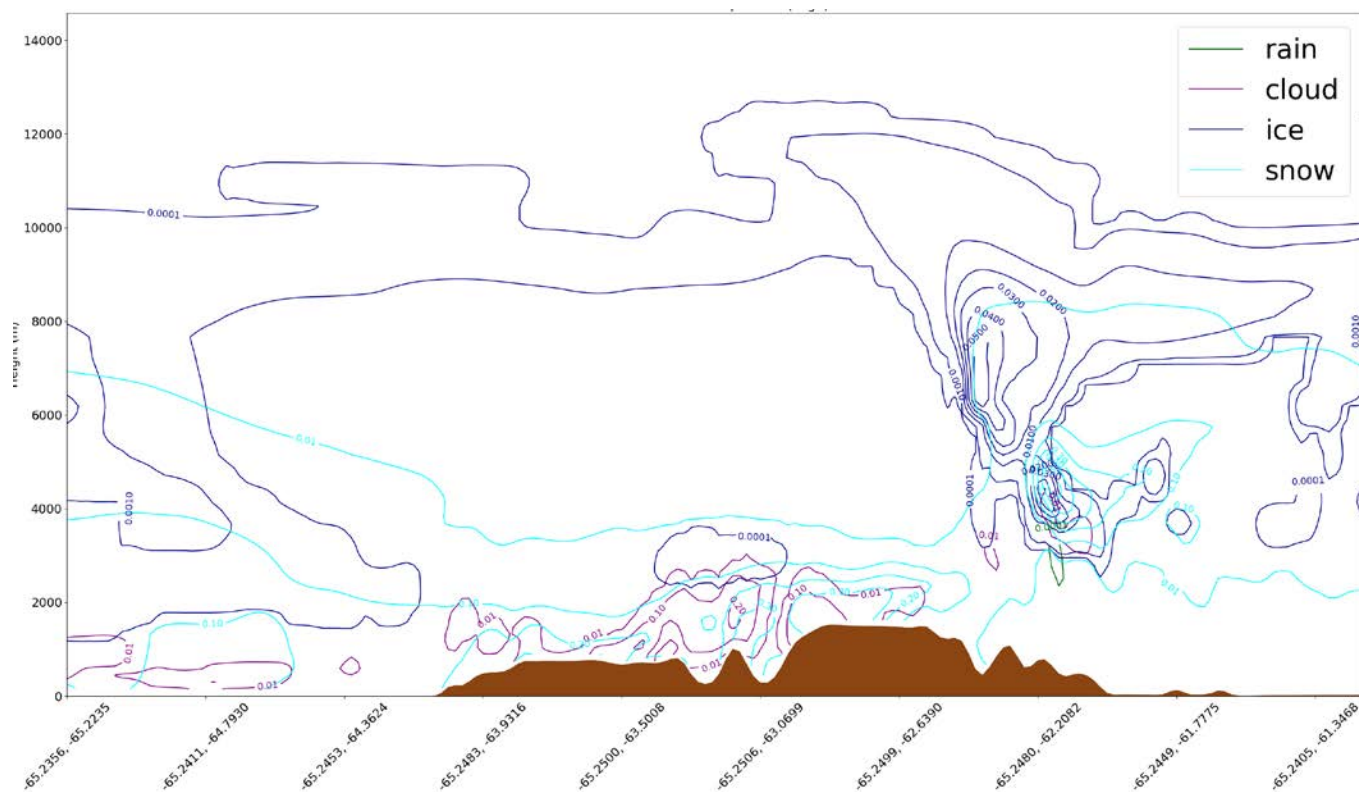
а) 21 серпня 00:00UTC



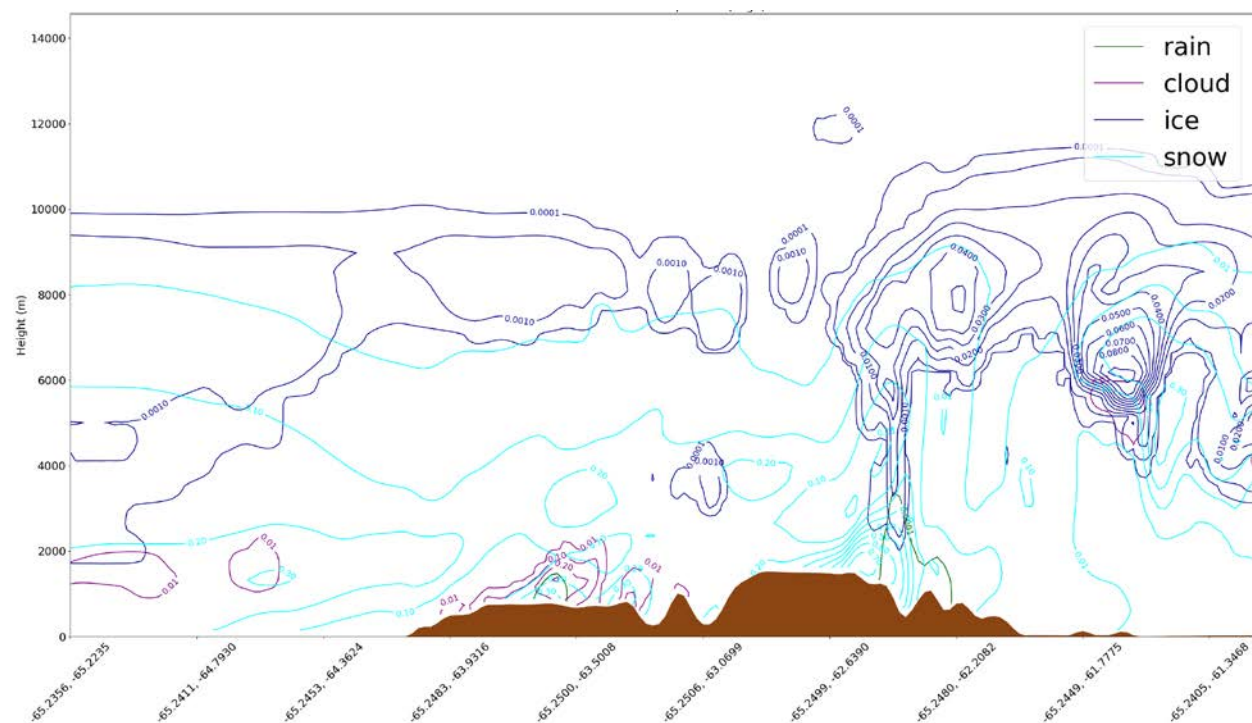
б) 21 серпня 06:00UTC



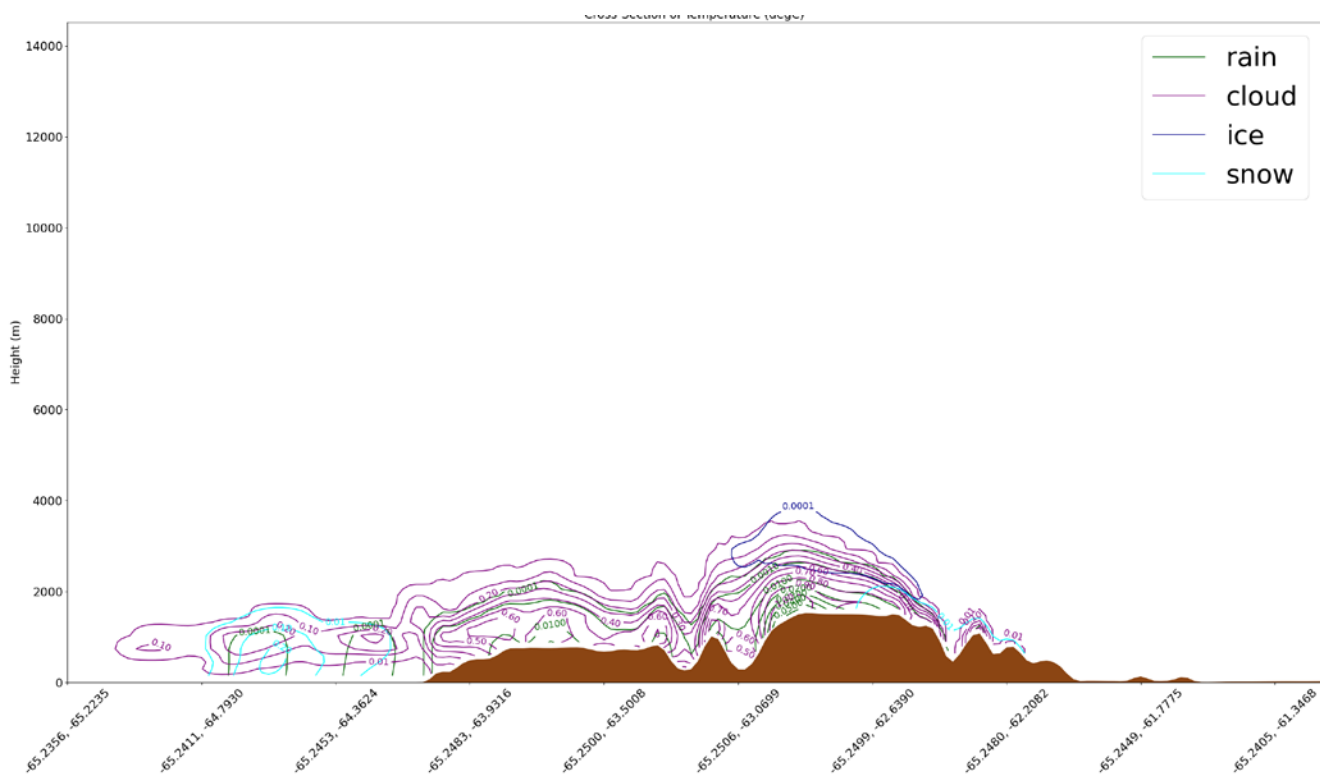
c) 21 серпня 12:00UTC



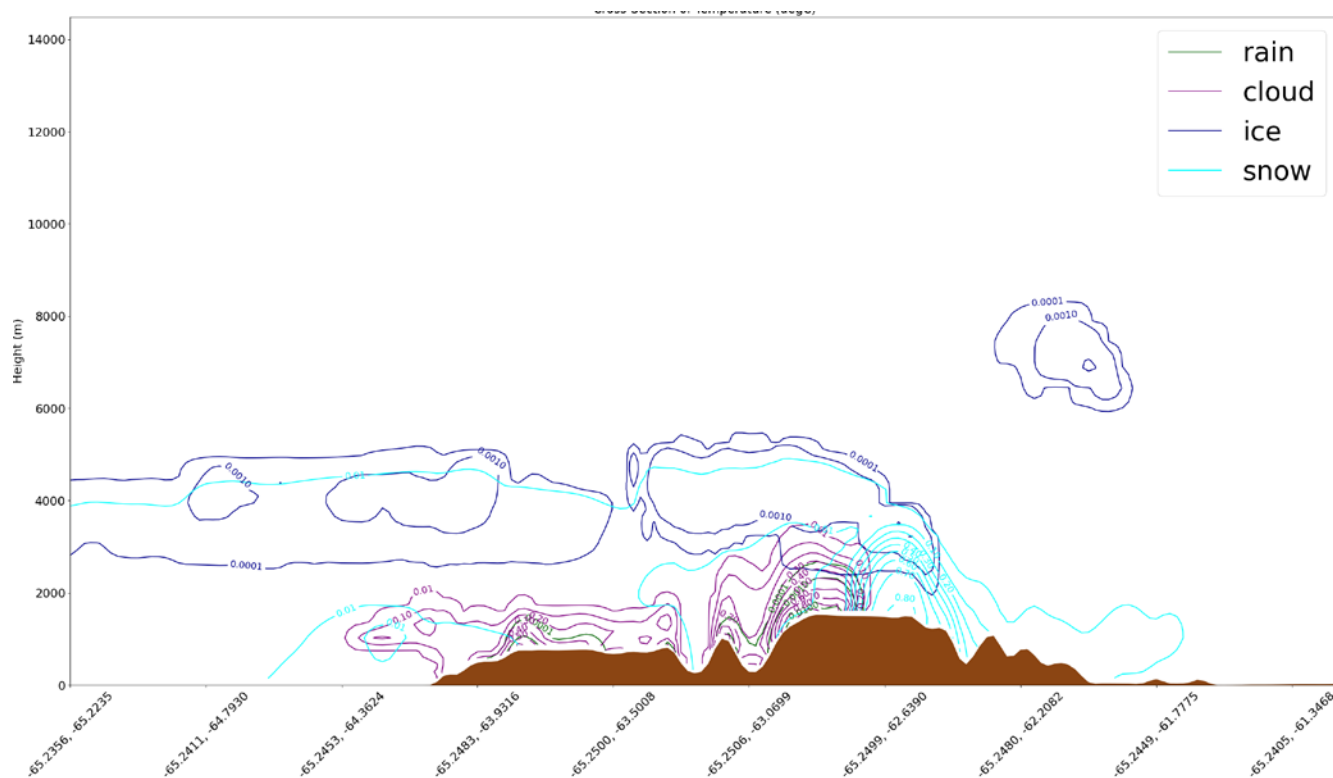
d) 21 серпня 18:00UTC



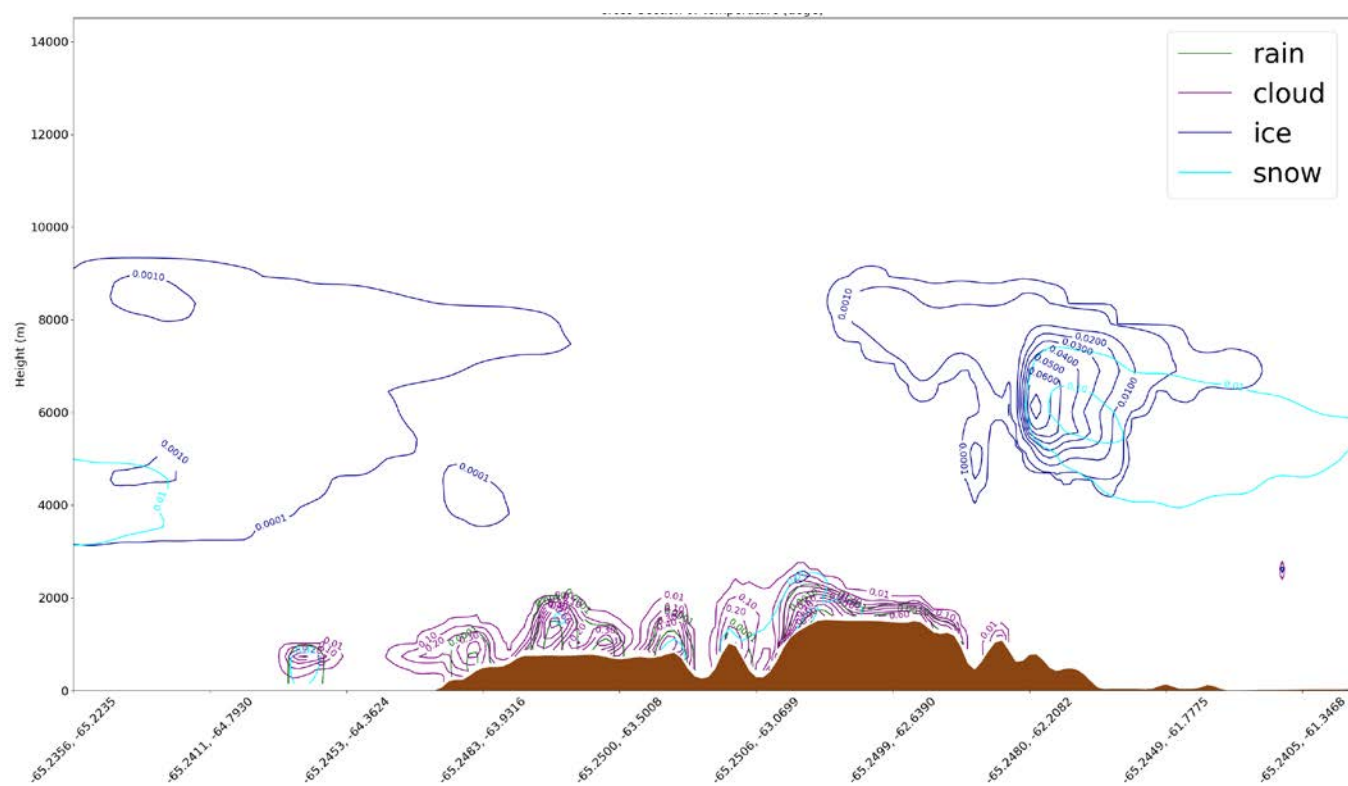
e) 22 серпня 00:00UTC



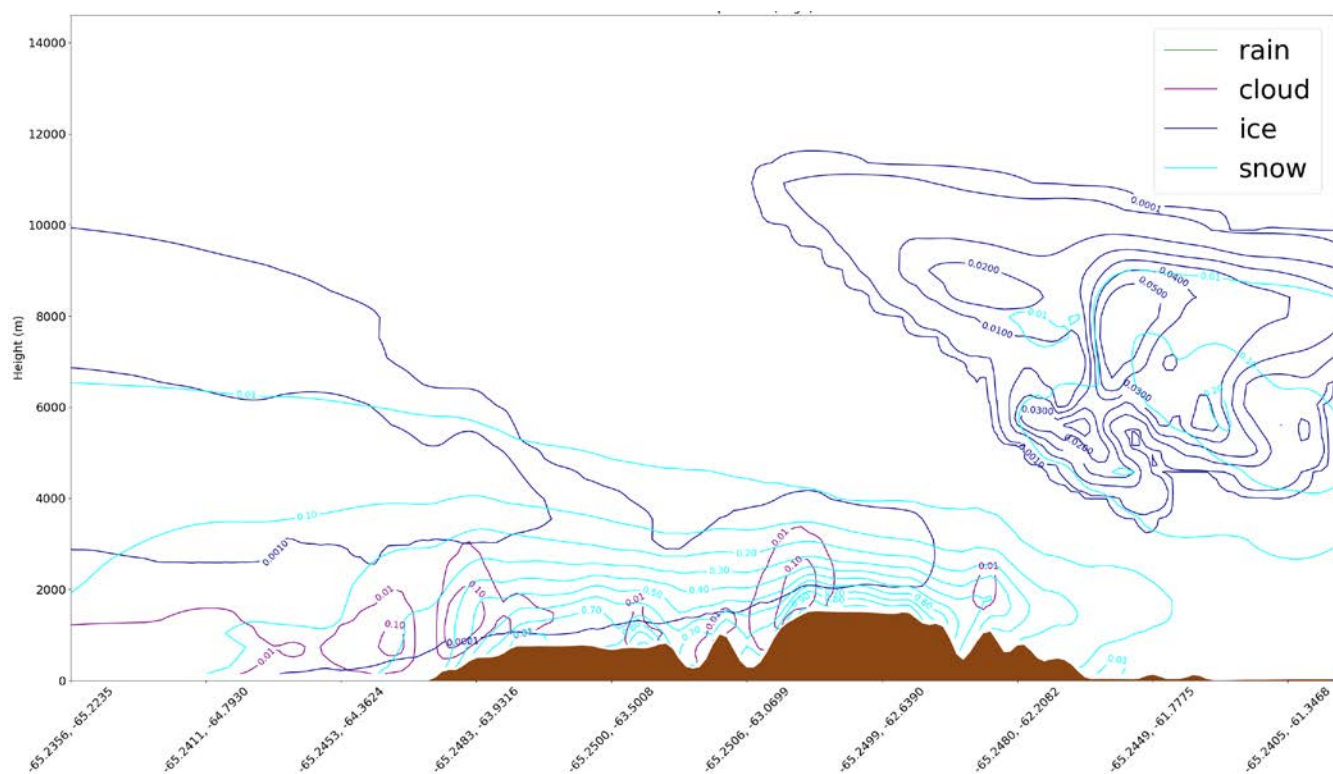
f) 22 серпня 06:00UTC



g) 22 серпня 12:00UTC

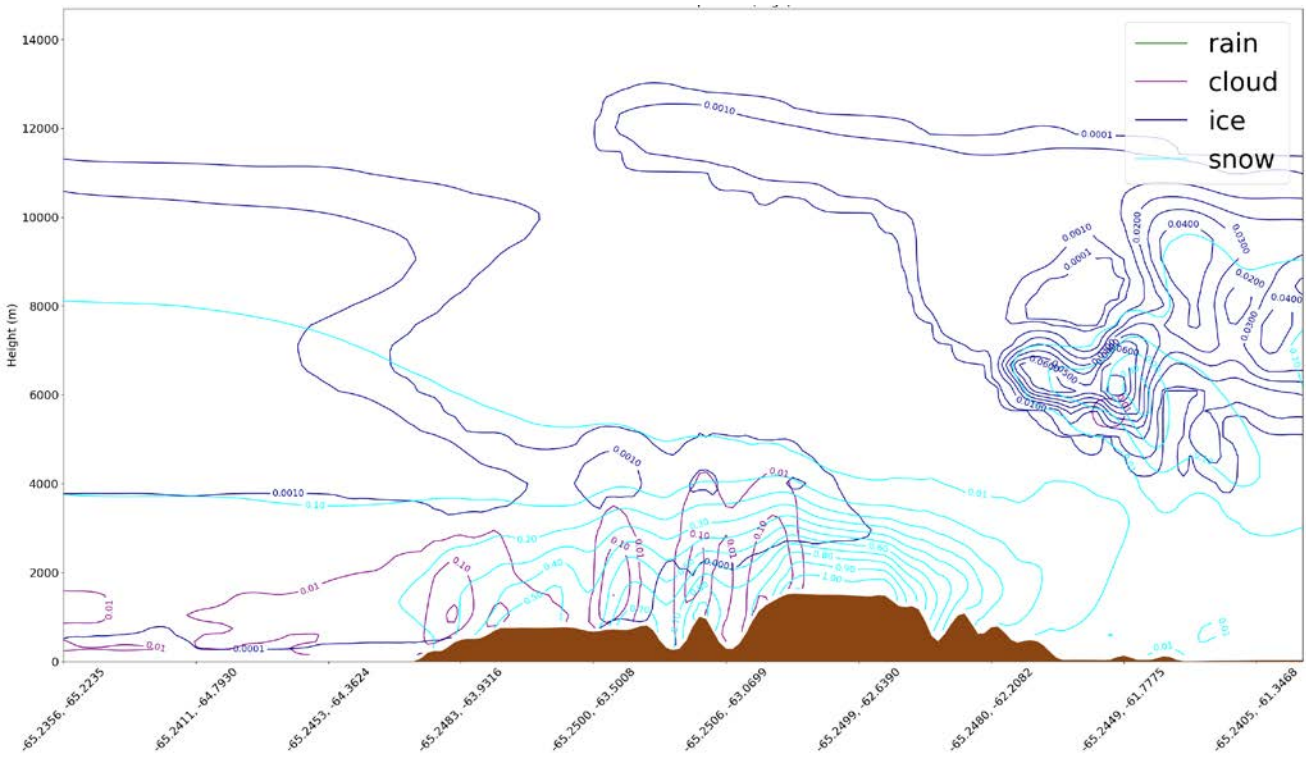


h) 22 серпня 18:00UTC

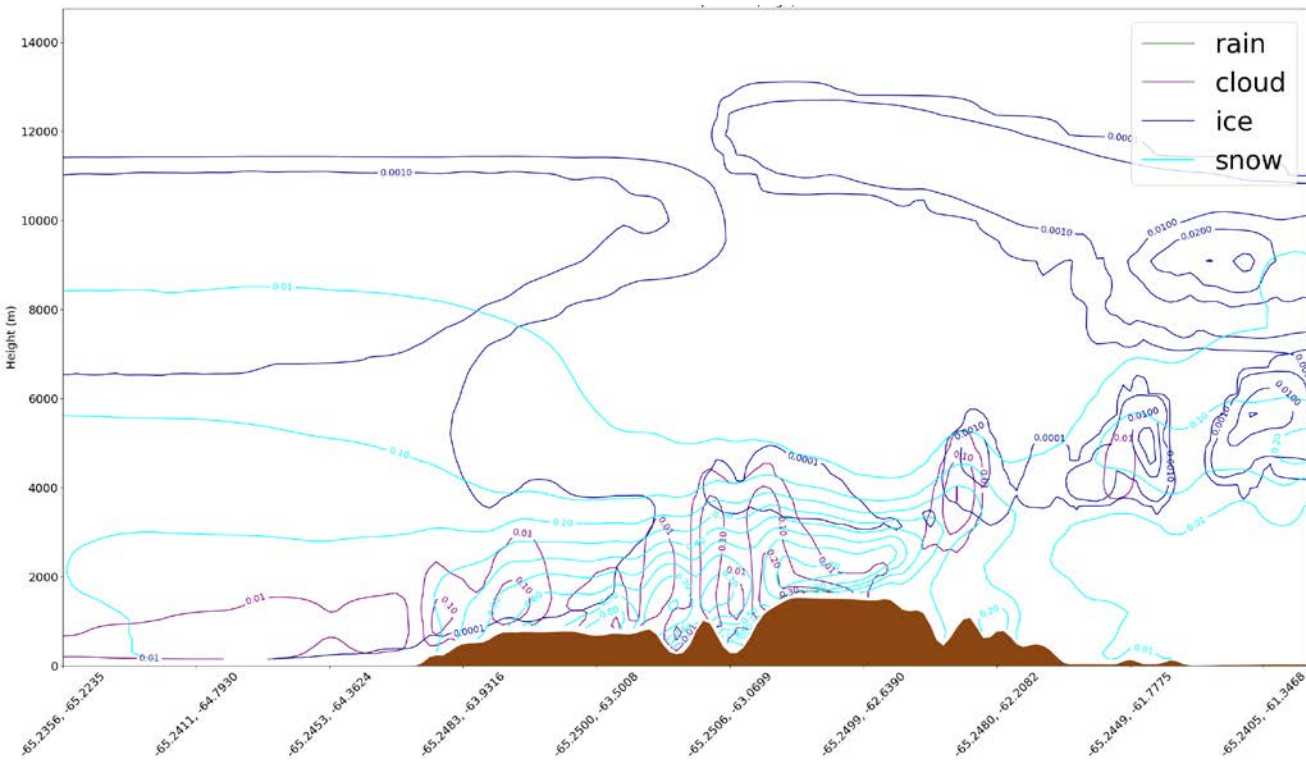




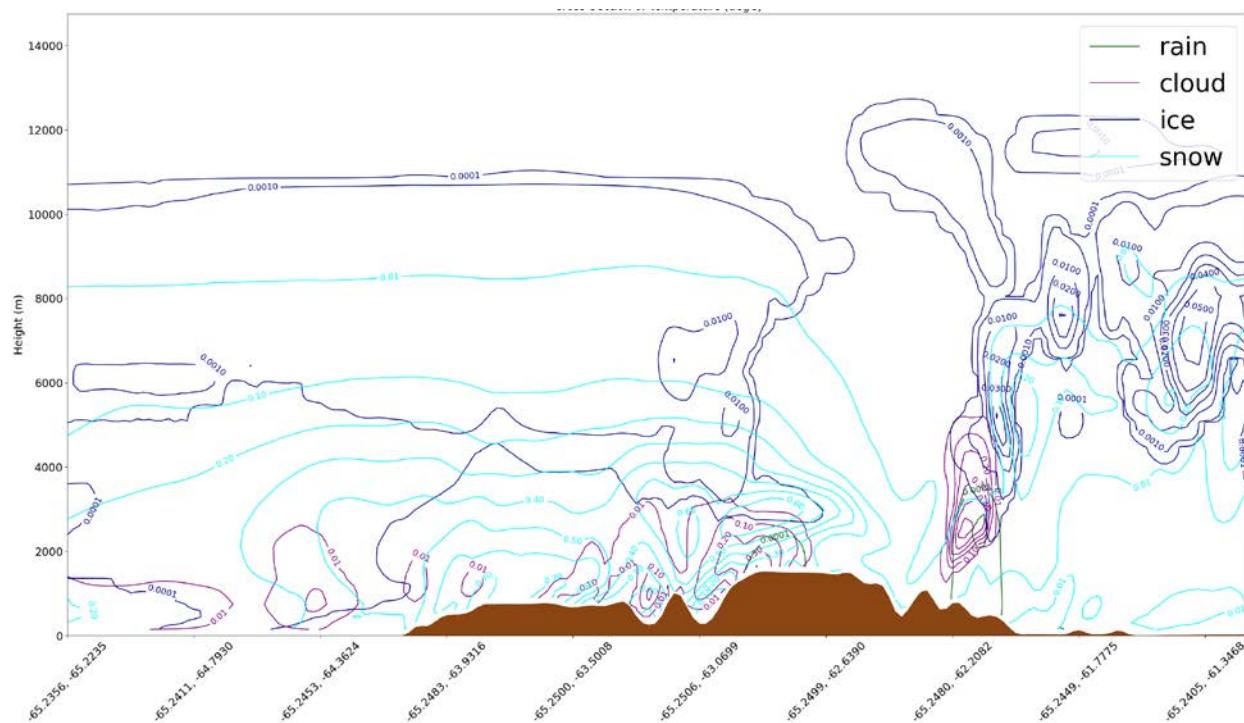
i) 23 серпня 00:00UTC



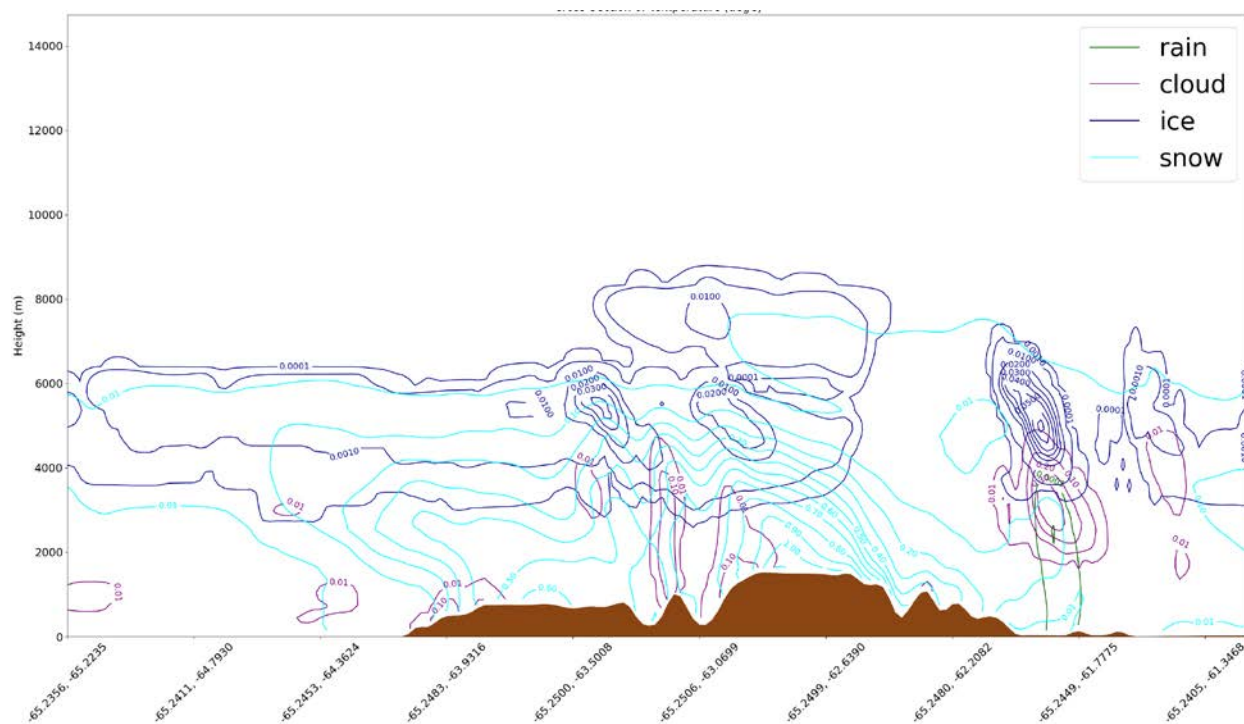
j) 23 серпня 06:00UTC



к) 23 серпня 12:00UTC

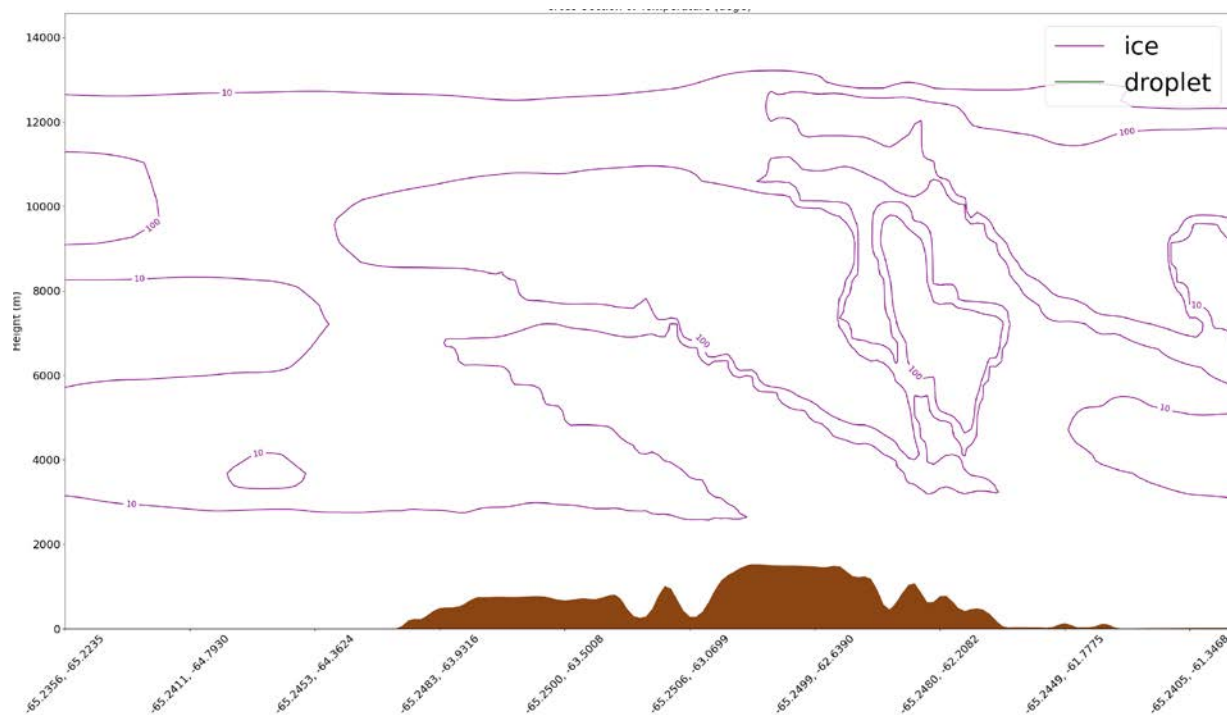


л) 23 серпня 18:00UTC

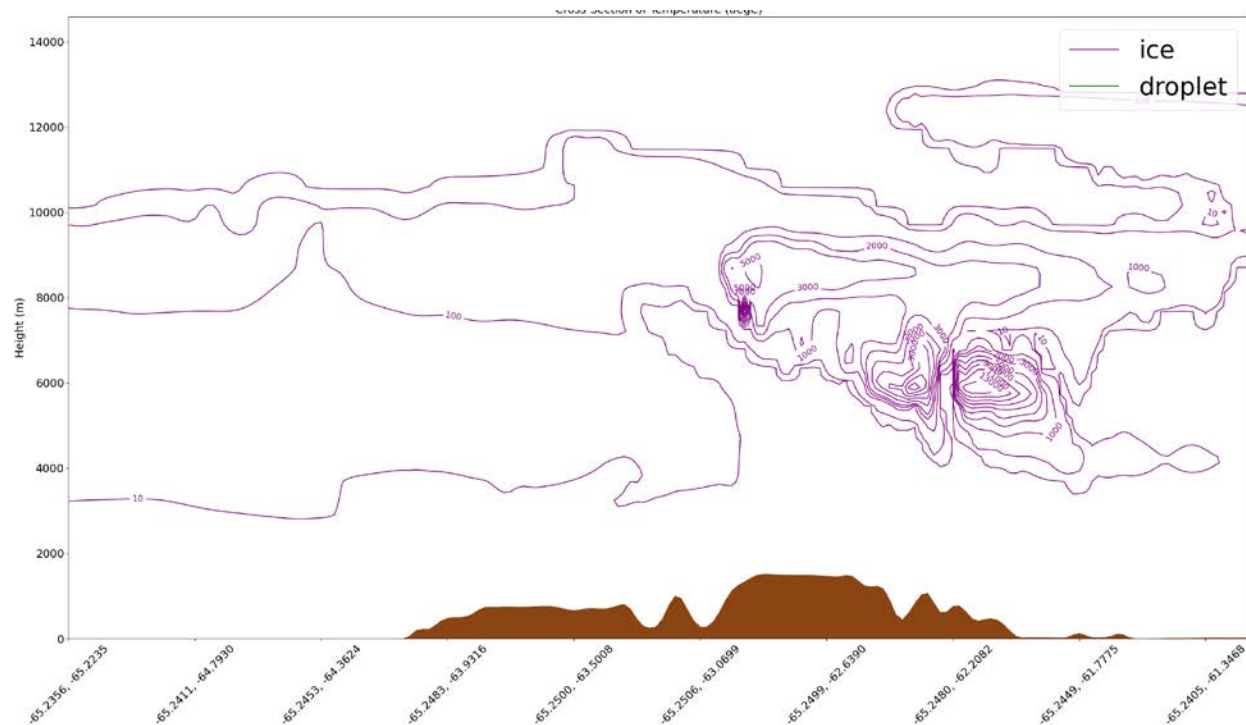


### ВЗ. Кількісні концентрації льоду (ice) та рідких опадів (droplet) у вертикальному перерізі

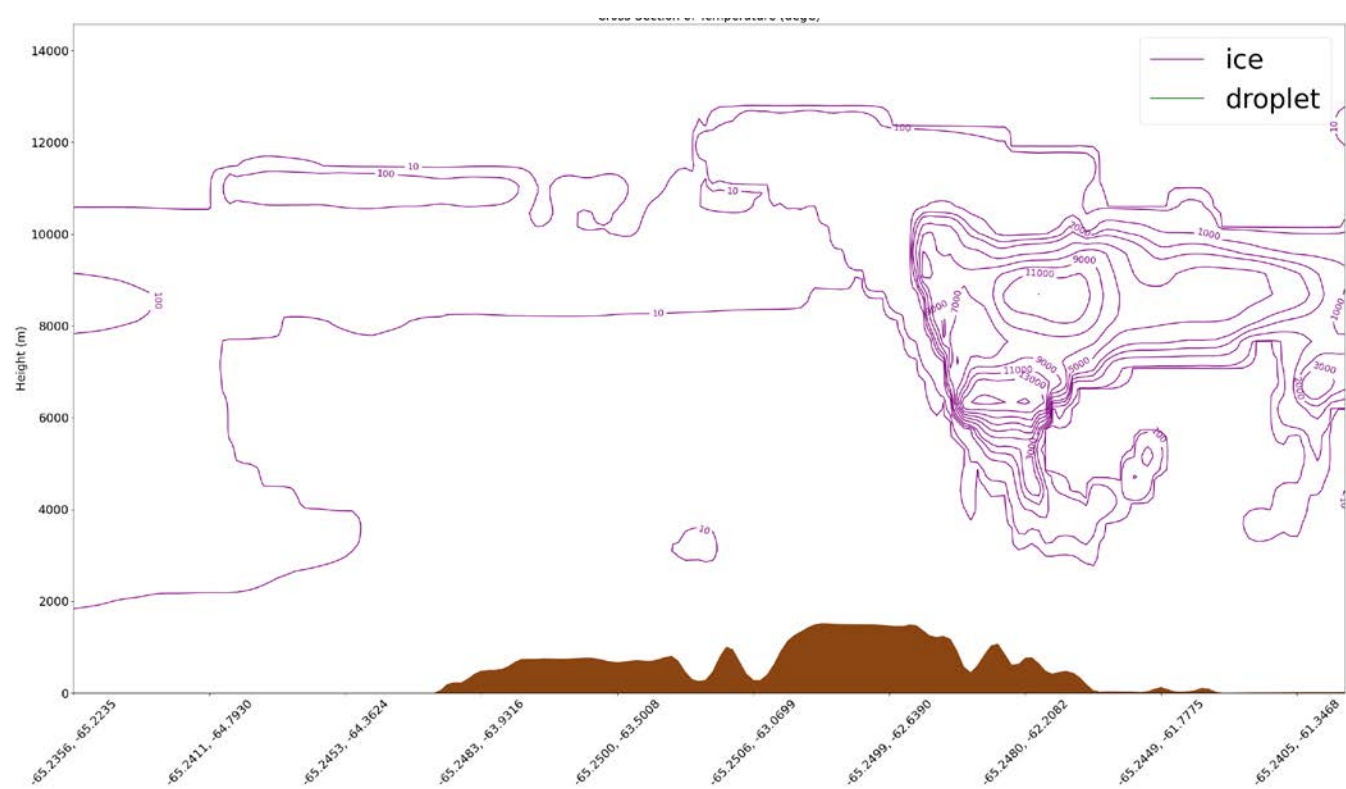
21 серпня 00:00UTC



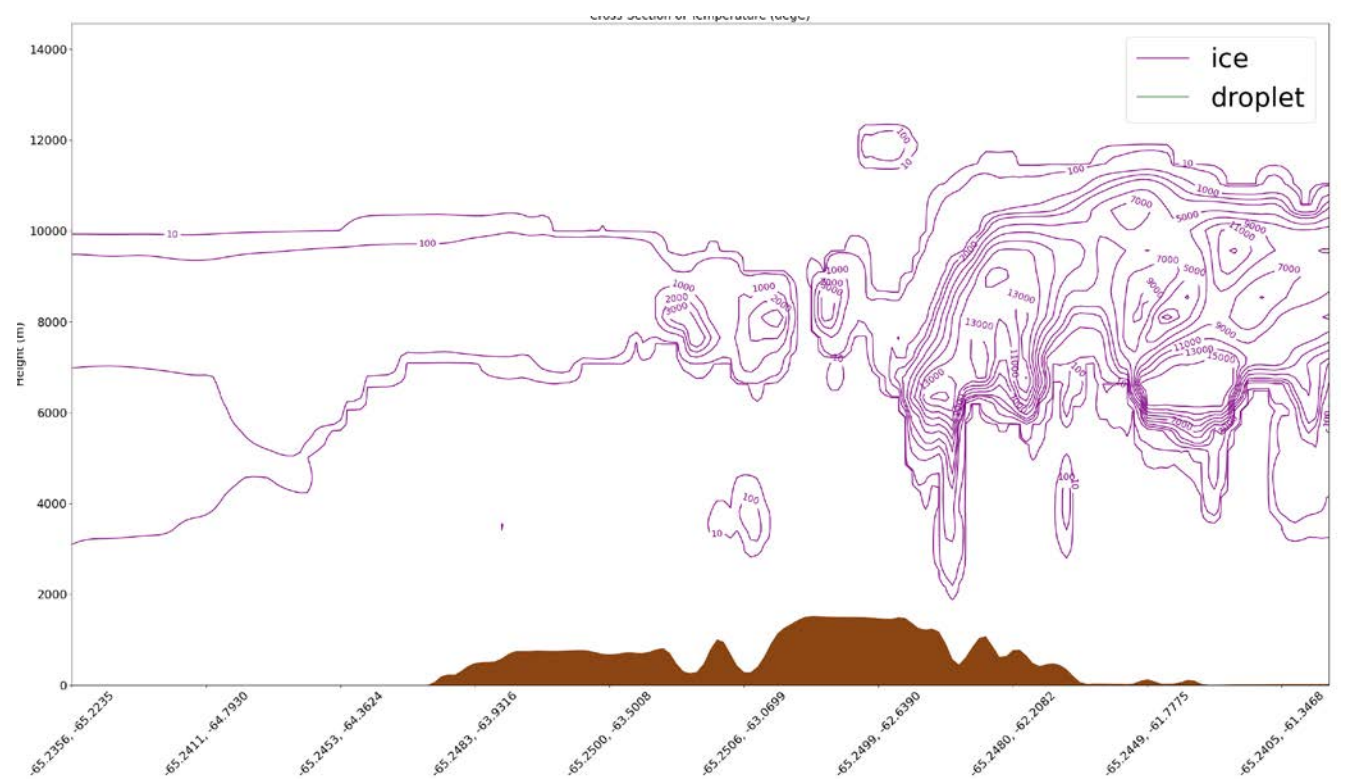
21 серпня 06:00UTC



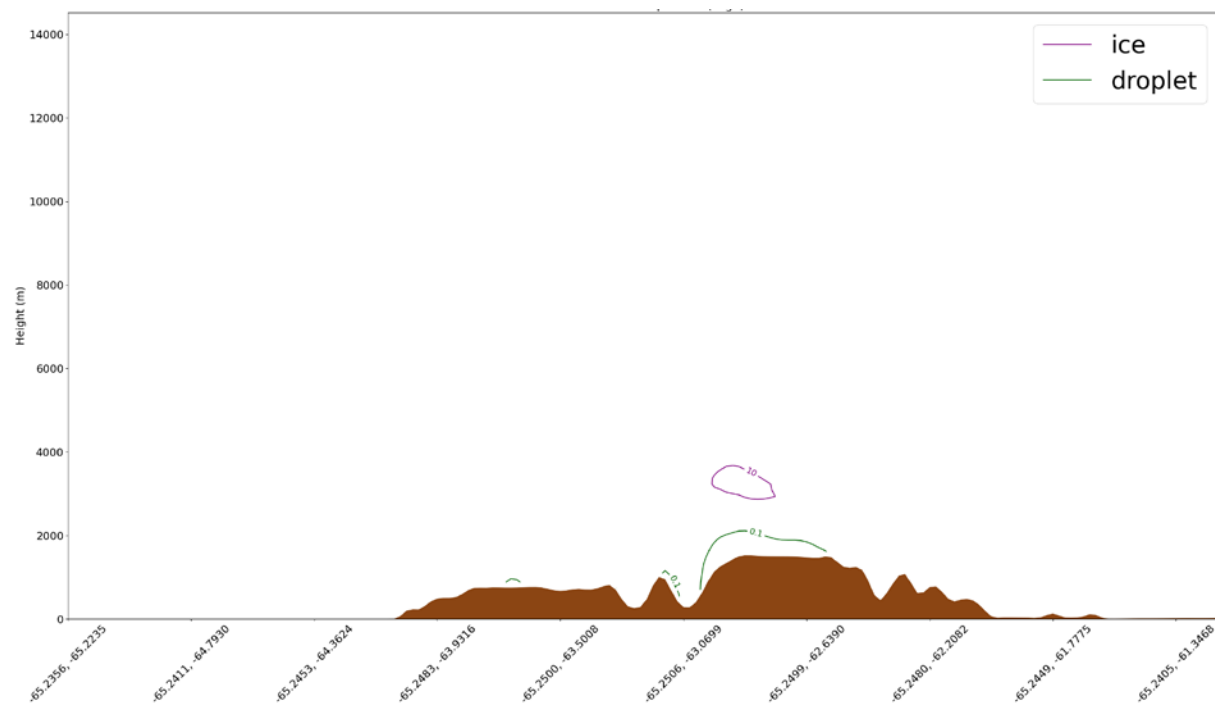
21 серпня 12:00UTC



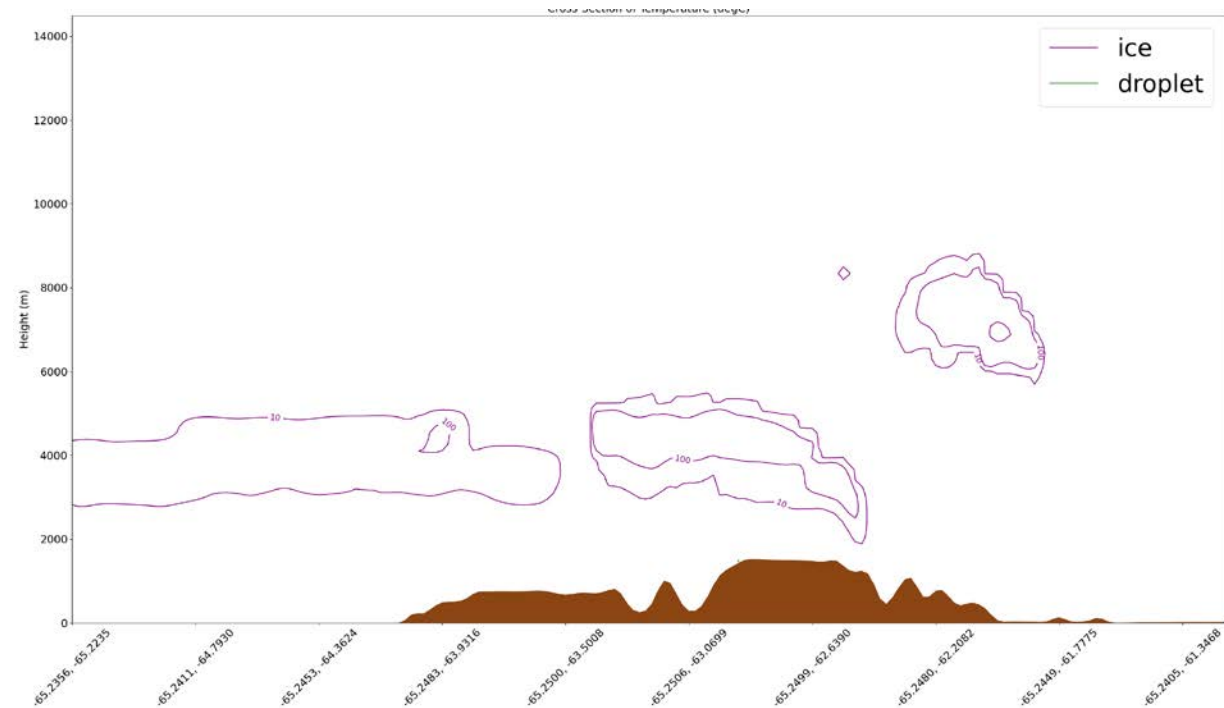
21 серпня 18:00UTC



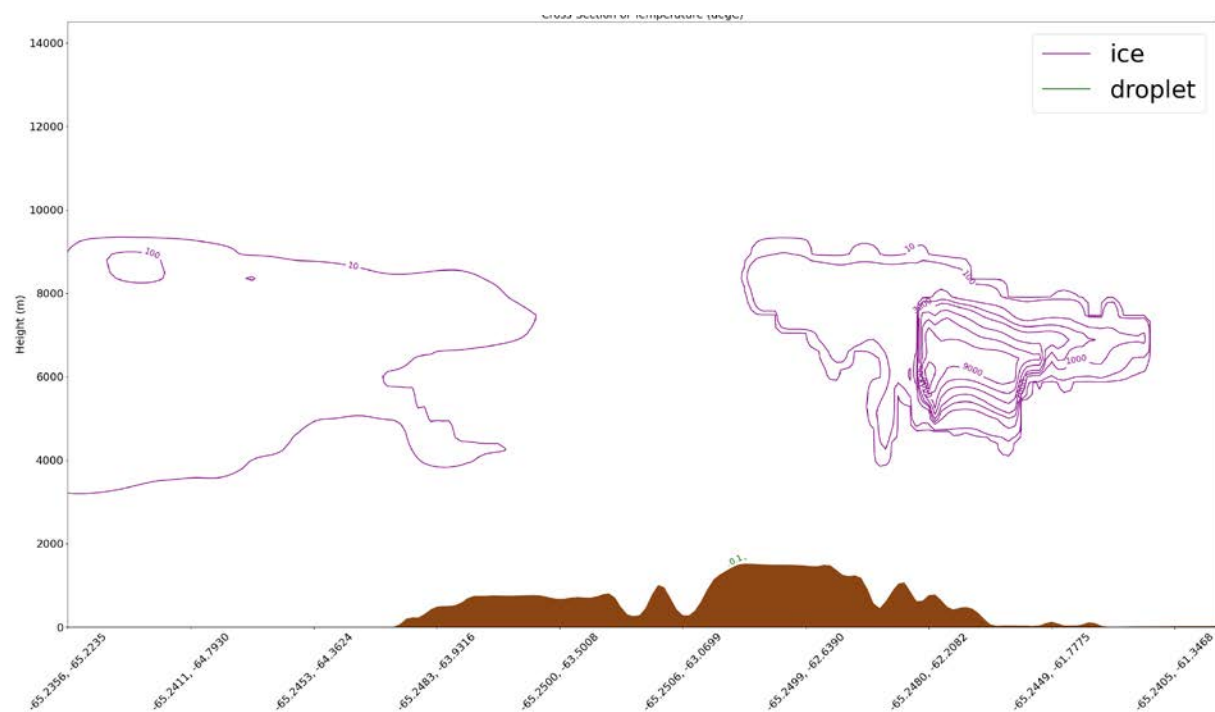
22 серпня 00:00UTC



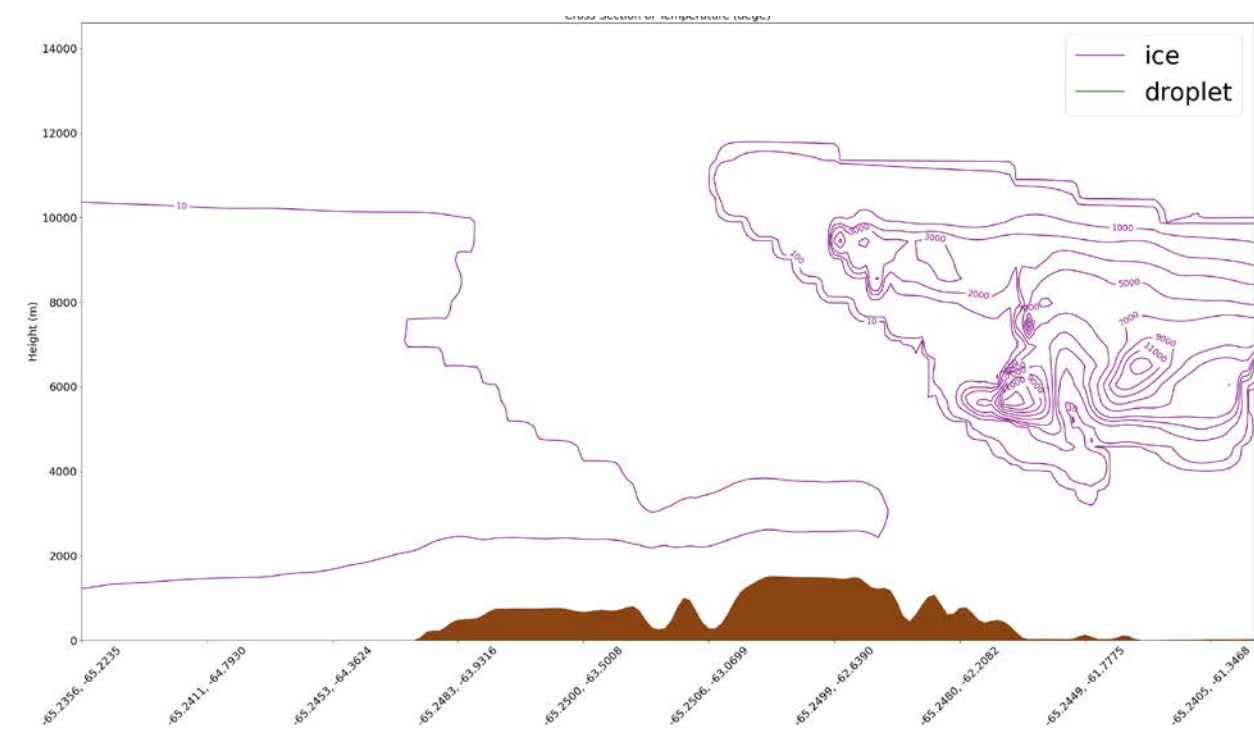
22 серпня 06:00UTC



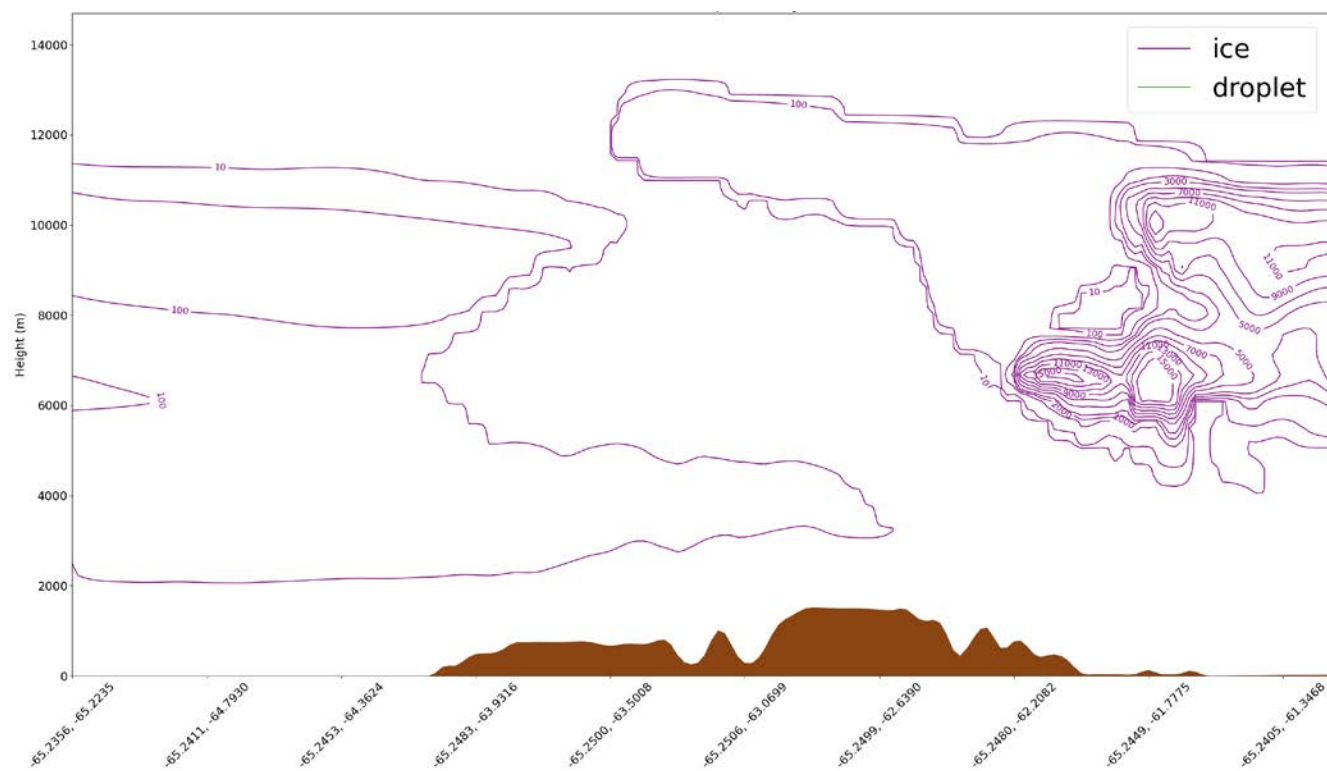
22 серпня 12:00UTC



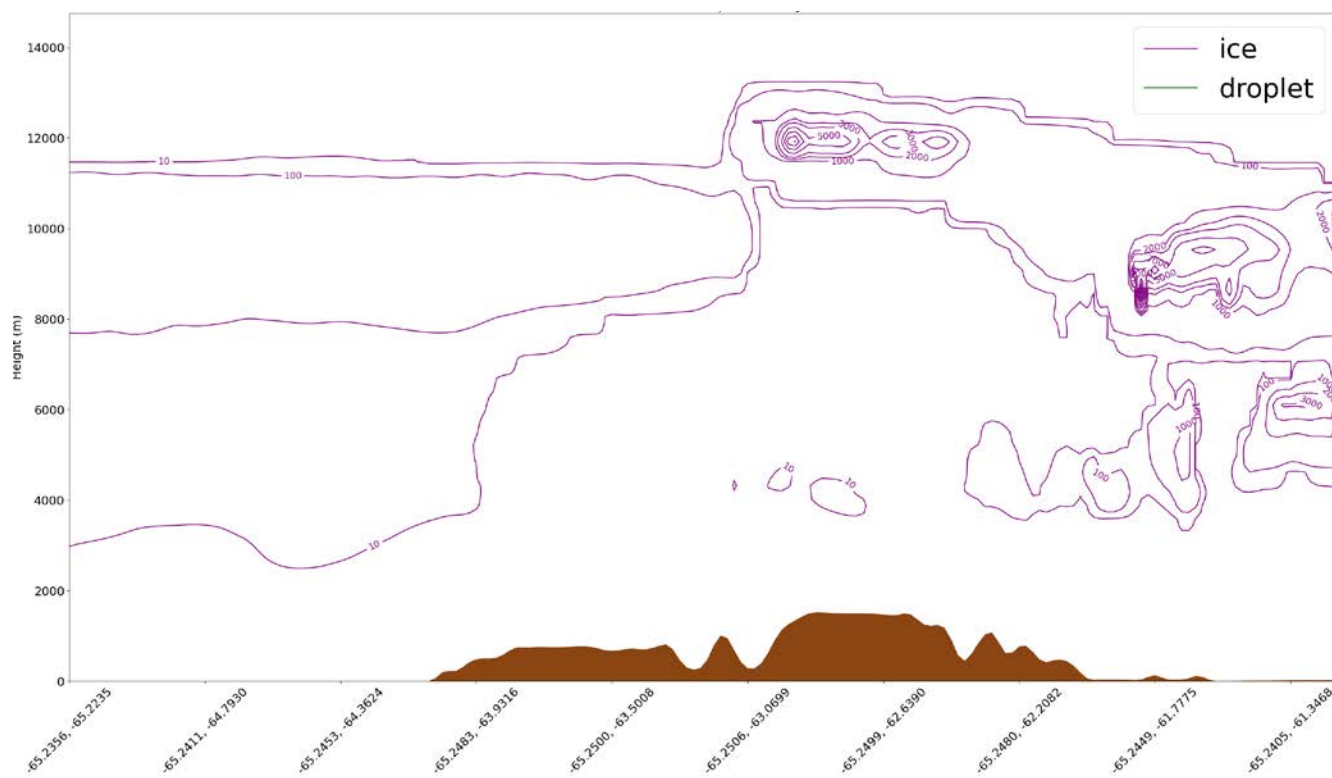
22 серпня 18:00UTC



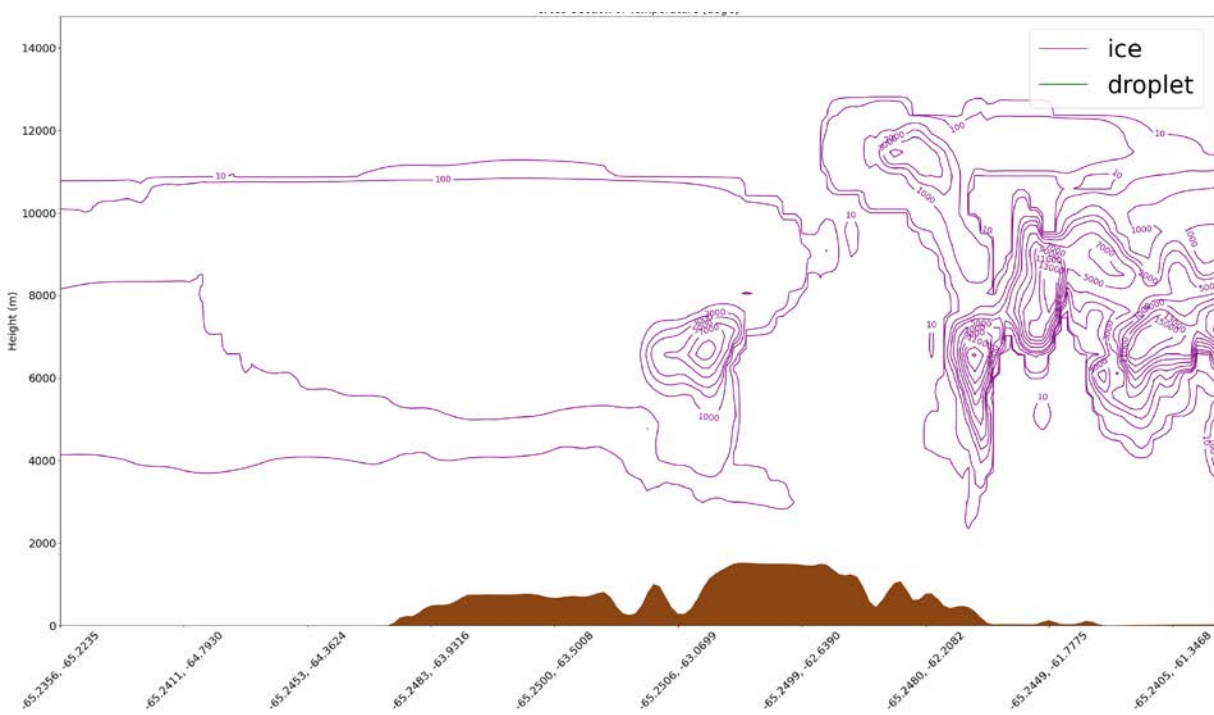
23 серпня 00:00UTC



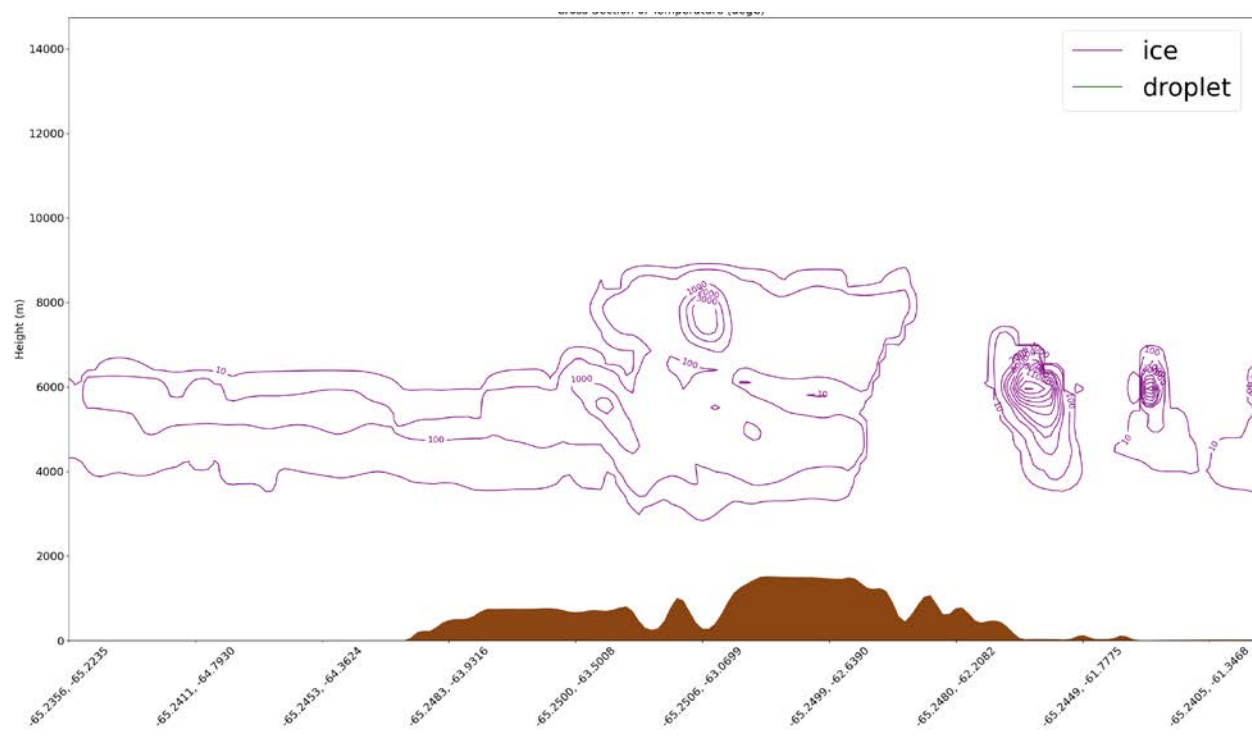
23 серпня 06:00UTC



23 серпня 12:00UTC

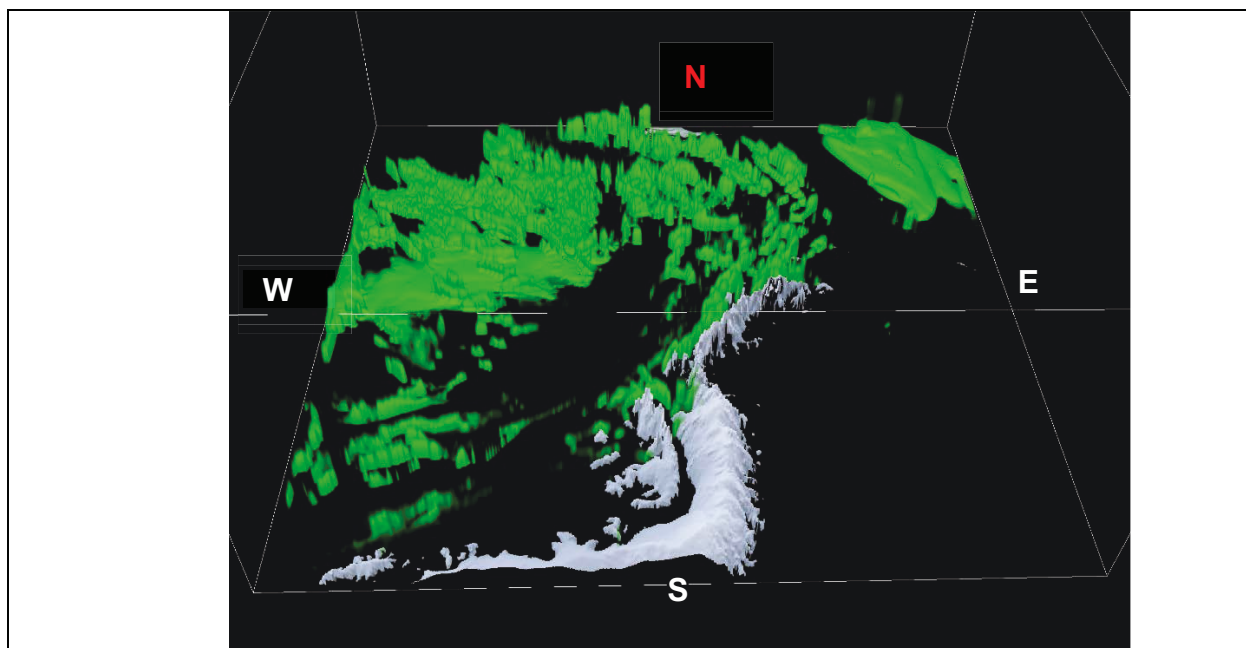


23 серпня 18:00UTC

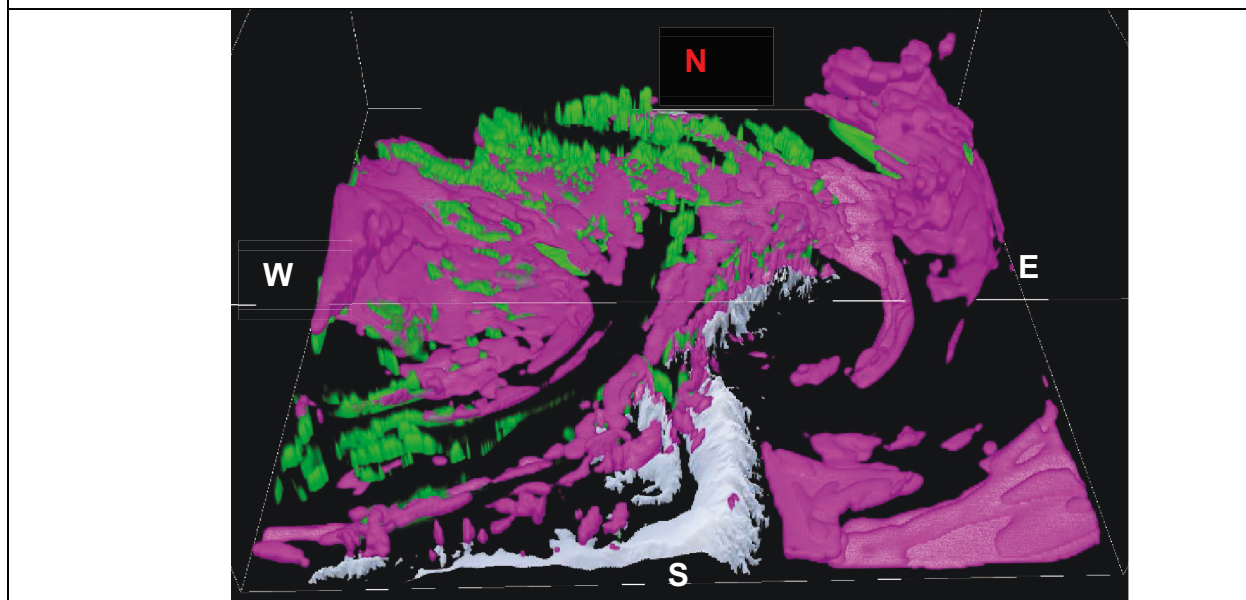




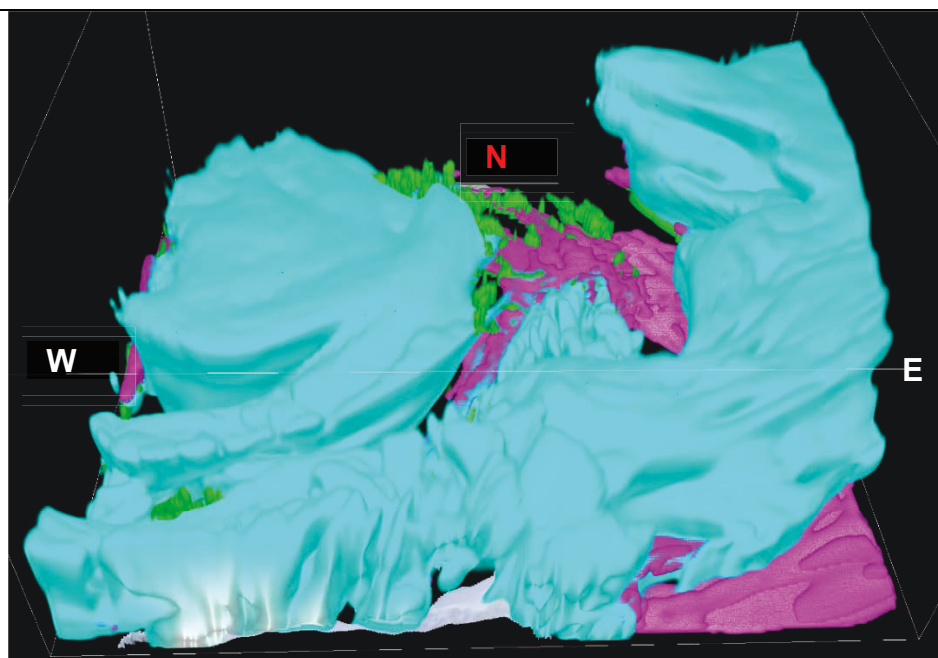
**В4. 3D візуалізація масових концентрацій крапель дощу, хмар, кристалів льоду та снігу для регіону Антарктичного півострова (г/кг) 21 серпня 2022 08:00 UTC**



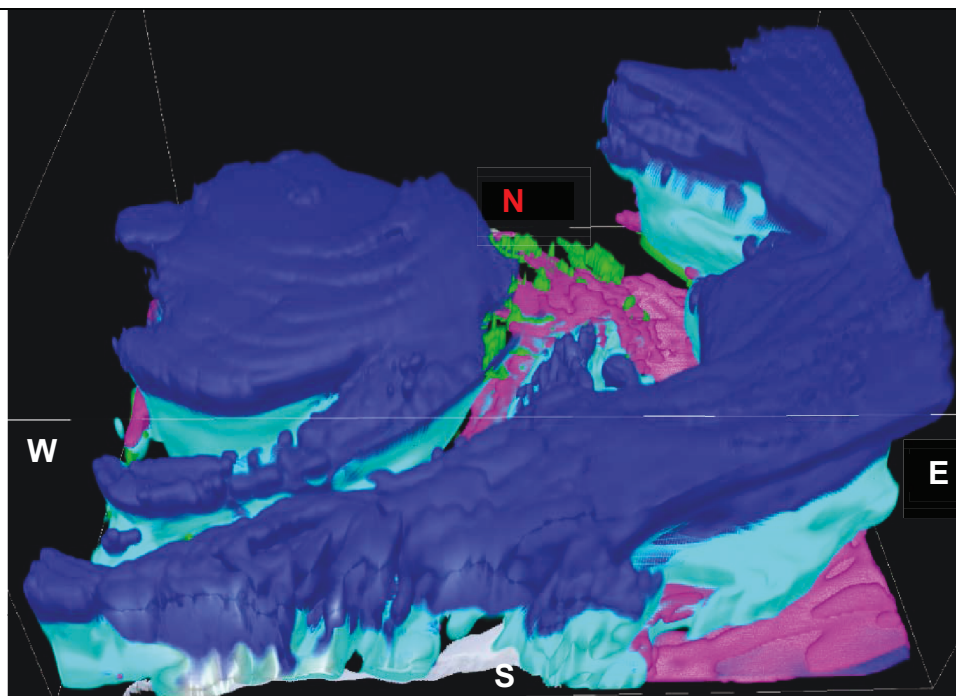
a) Просторовий розподіл крапель дощу. Домен з кроком 9км



b) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений) та хмарних крапель (фіолетовий). Домен з кроком 9км

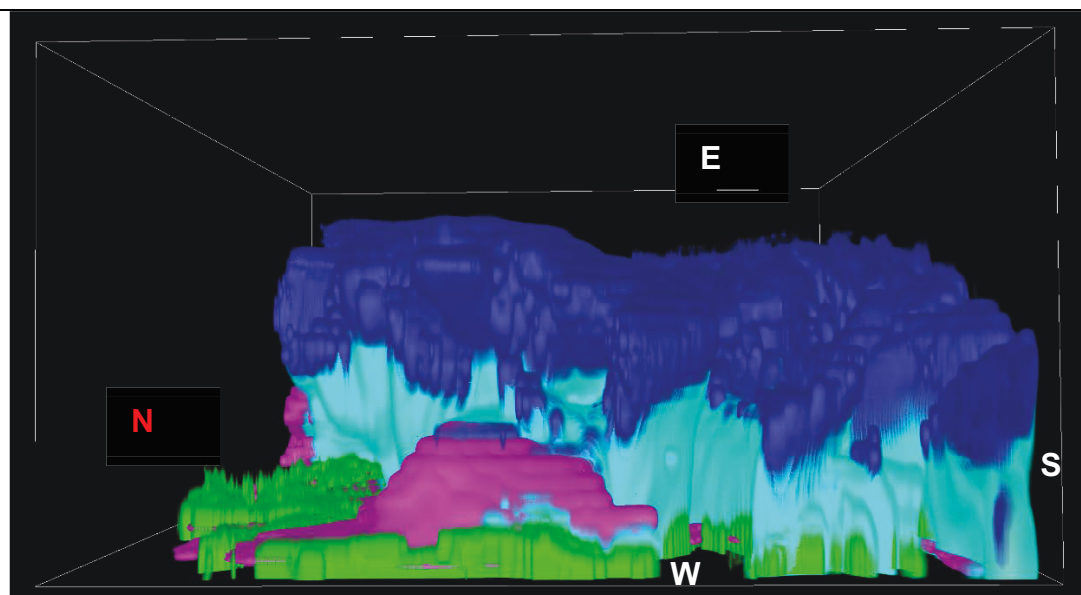


с) Просторовий розподіл розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий) та кристалів снігу (блакитний). Домен з кроком 9км

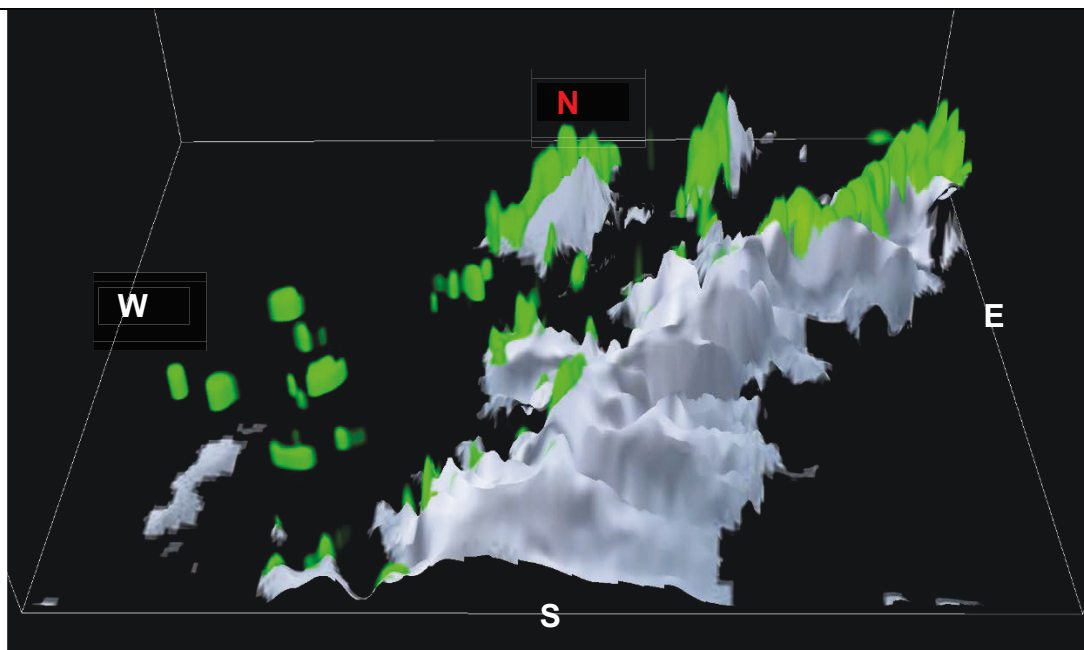


d) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий), кристалів снігу (блакитний) та кристалів льоду (синій).

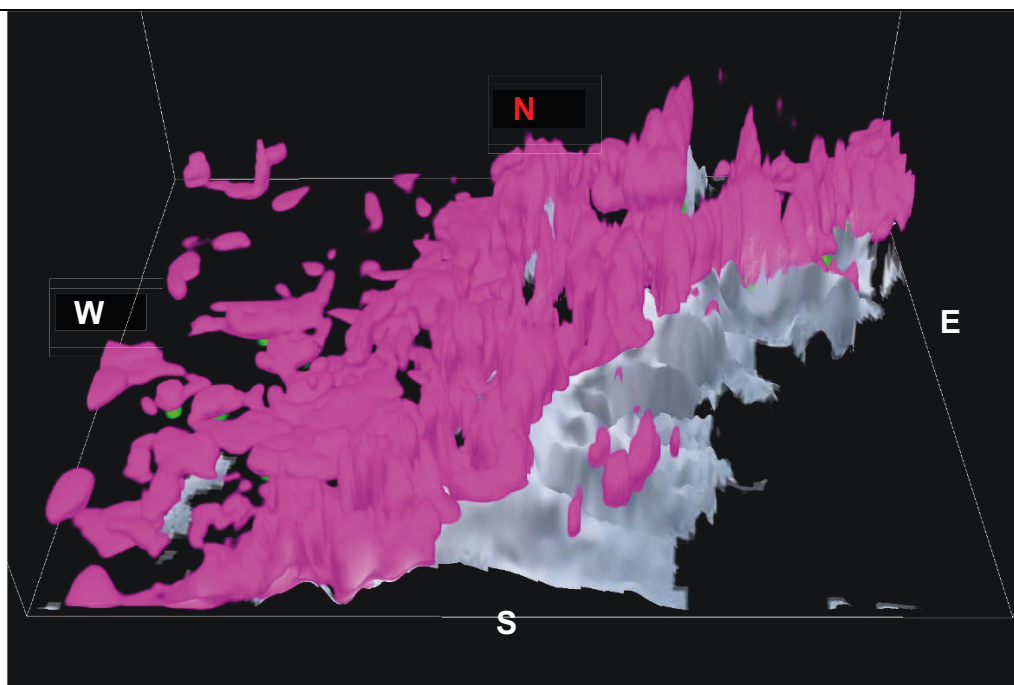
Домен з кроком 9км



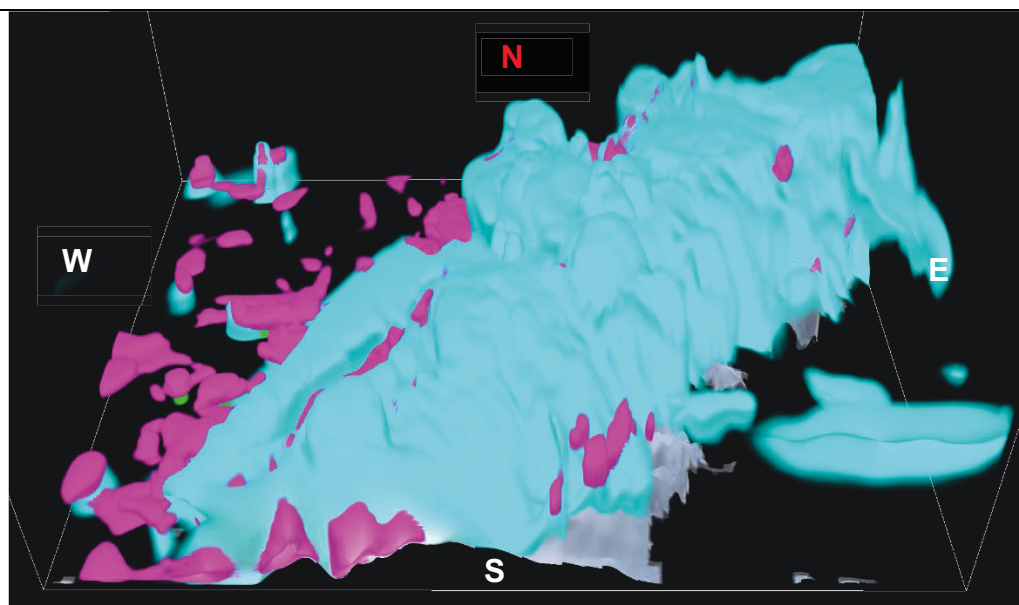
е) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий), кристалів снігу (блакитний) та кристалів льоду (синій)– вертикальний переріз. Домен з кроком 9км



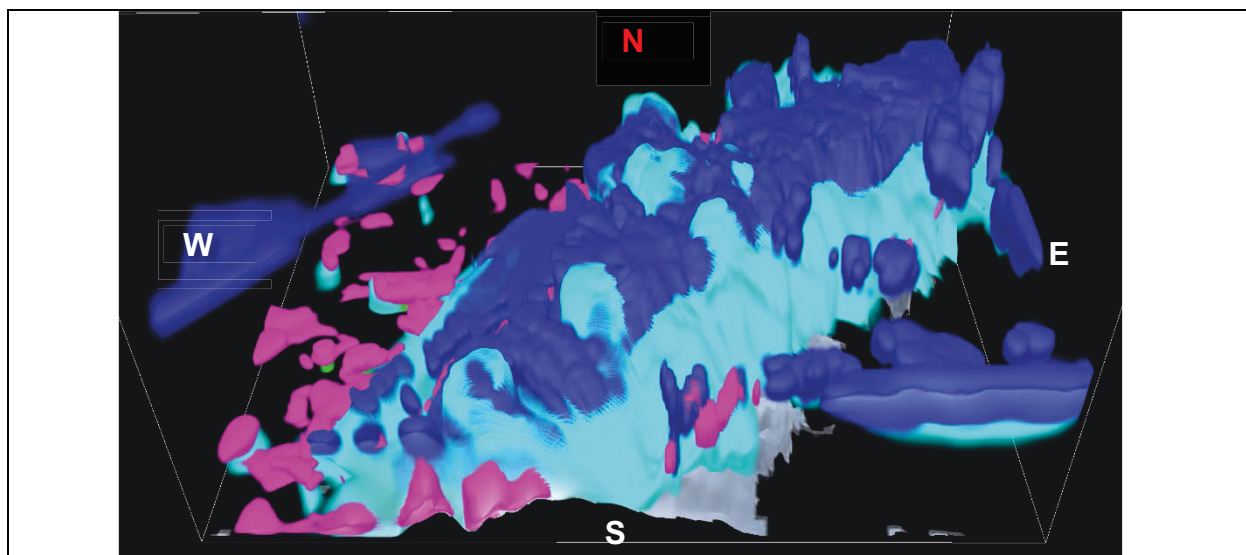
ф) Просторовий розподіл крапель дощу. Домен з кроком 1км – районі станції Академік Вернадський – льодовика Ларсен В



g) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений) та хмарних крапель (фіолетовий). Домен з кроком 1 км – районі станції Академік Вернадський – льодовика Ларсен В



h) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий) та кристалів снігу (блакитний). Домен з кроком 1 км – районі станції Академік Вернадський – льодовика Ларсен В



i) Просторовий розподіл крапель дощу (зелений), хмарних крапель (фіолетовий), кристалів снігу (блакитний) та кристалів льоду (синій). Домен з кроком 1км – районі станції Академік Вернадський – льодовика Ларсен В

## Додаток Г. Часовий хід зміни індексів режиму зволоження для Антарктичного півострова та для району станції «Академік Вернадський»

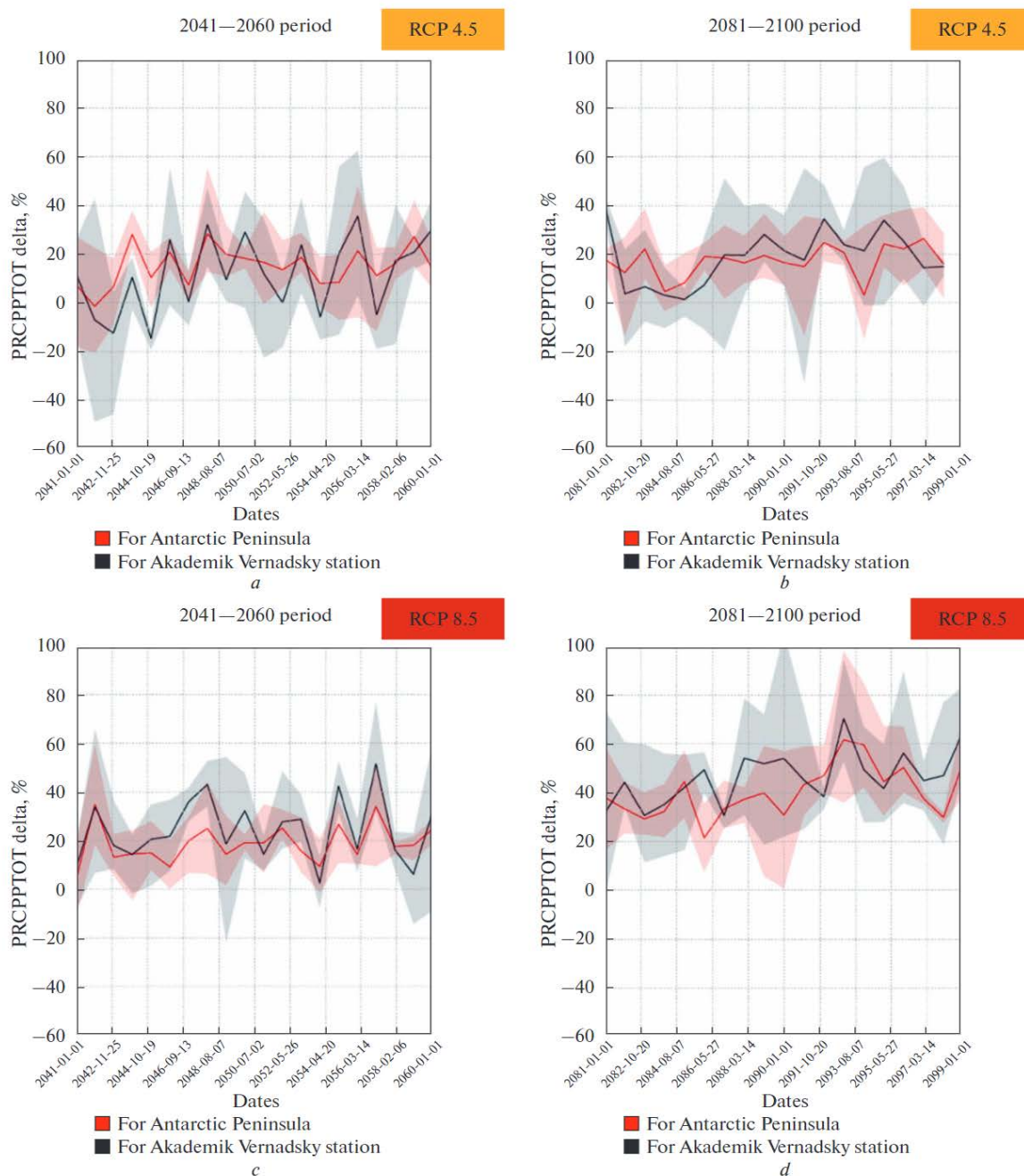


Рисунок Г.1 Часовий хід зміни кількості PRCPTOT для Антарктичного півострова (червоне) та для району станції «Академік Вернадський» (сіре)



Рисунок Г.2 Часовий хід зміни індексу SDII для Антарктичного півострова (червоне) та для району станції «Академік Вернадський» (сіре)

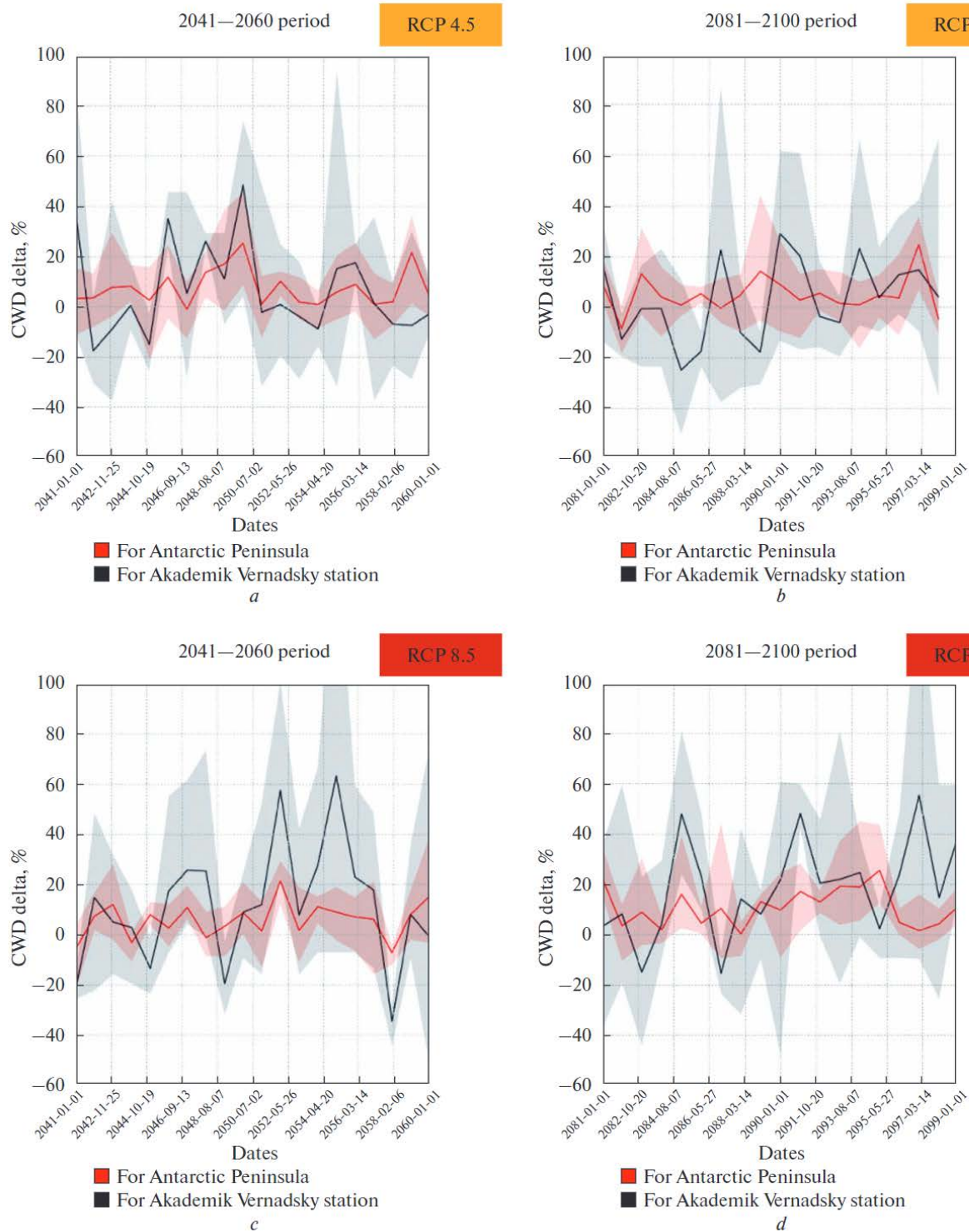


Рисунок Г.3 Часовий хід зміни індексу CWD для Антарктичного півострова (червоне) та для району станції «Академік Вернадський» (сіре)



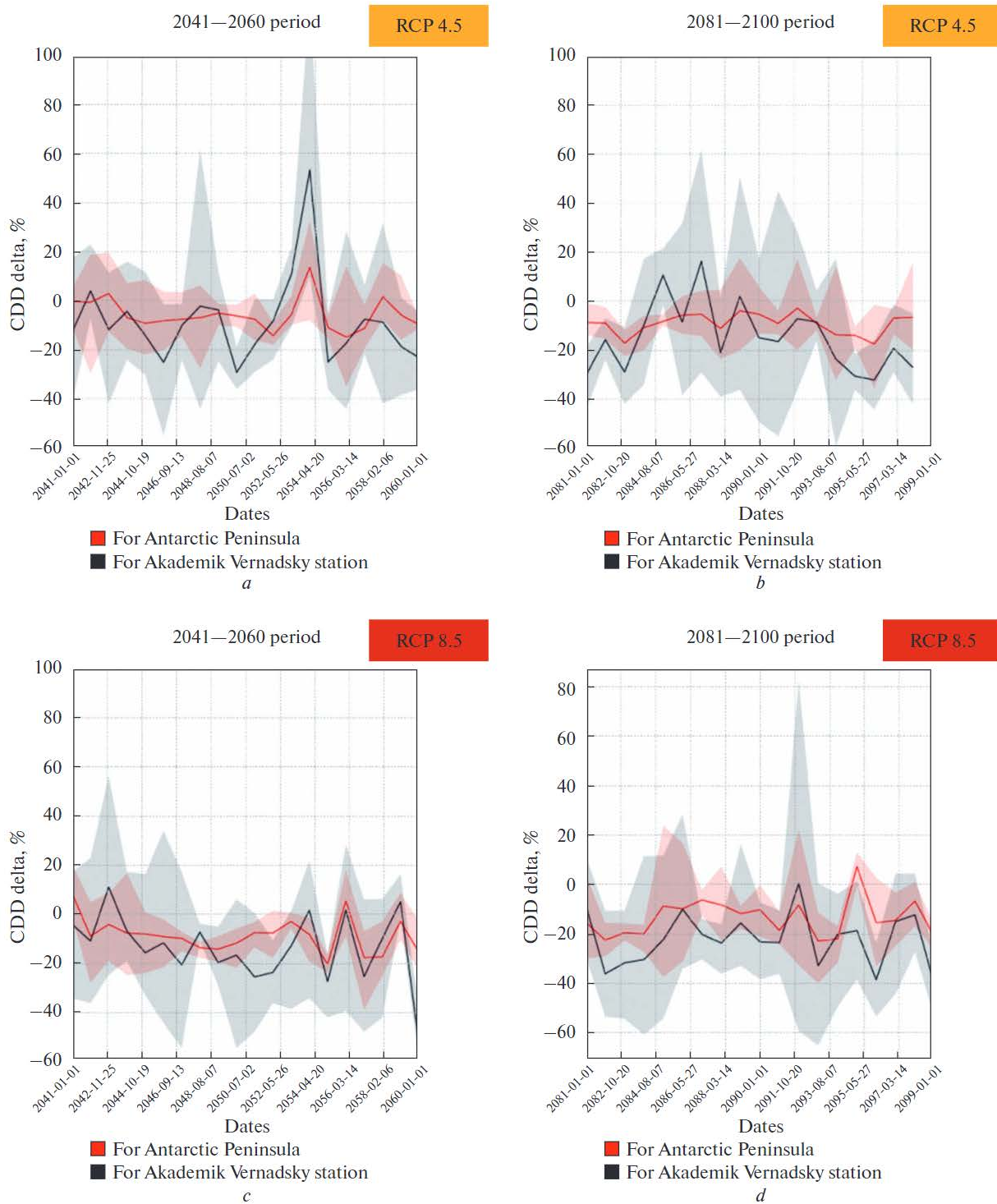


Рисунок Г.4 Часовий хід зміни індексу CDD для Антарктичного півострова (червоне) та для району станції «Академік Вернадський» (сіре)

## Додаток Д. Список публікацій за темою дисертації

### Статті у наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та /або Scopus

1. Chyhareva A., Krakovska S., Pishniak D. Climate projections over the Antarctic Peninsula region to the end of the 21st century. Part I: cold temperature indices. Ukrainian Antarctic Journal, 2019. № 1(18), p. 45—57, DOI: [https://doi.org/10.33275/1727-7485.1\(18\).2019.131](https://doi.org/10.33275/1727-7485.1(18).2019.131). (Q4 Scopus). *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій, розрахунки, візуалізація результатів, узагальнення та опис отриманих результатів)*
2. Chyhareva A., Krakovska S., Pishniak D. Climate projections over the Antarctic Peninsula region to the end of the 21st century. Part II: wet/dry indices. Ukrainian Antarctic Journal 2019. № 2 (19), p. 47 – 63, DOI: [https://doi.org/10.33275/1727-7485.2\(19\).2019.151](https://doi.org/10.33275/1727-7485.2(19).2019.151). (Q4 Scopus). *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій, розрахунки, візуалізація результатів, узагальнення та опис отриманих результатів)*
3. Chyhareva, A., I. V. Gorodetskaya, S. Krakovska, D. Pishniak, P. Rowe. Precipitation phase transition in austral summer over the Antarctic Peninsula Ukrainian Antarctic Journal, 2021. № 1(2021), DOI: <https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2021.664> ст. 32-46 (Q4 Scopus). *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень, реаналізу, моделювання за допомогою чисельної моделі Polar WRF, обробка та візуалізація результатів, узагальнення та опис отриманих результатів)*
4. Chyhareva, A., & Krakovska, S. (2022). Climate projections over the Antarctic Peninsula region to the end of the 21st century. Part III: clouds and extreme precipitation. Ukrainian Antarctic Journal, 20(2), 188–202. DOI: <https://doi.org/10.33275/1727-7485.2.2022.699> (Q4 Scopus). *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних*

*проєкцій, розрахунки, візуалізація результатів, узагальнення та опис отриманих результатів)*

### **Інші публікації пов'язані з темою дисертації**

*Статті у фахових наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та /або Scopus:*

5. Osypov, V., Speka, O., **Chyhareva, A.**, Osadcha, N., Krakovska, S., Osadchyi, V. (2021) Water resources of the Desna river basin under future climate. Journal of Water and Climate Change ; 12 (7): 3355–3372. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.034> (Q2 Web of Science) *(Особистий внесок автора – аналіз літературних джерел, збір та обробка даних кліматичних проєкцій за методикою, описаною в дисертації, розрахунки кліматичних змін метеорологічних параметрів, узагальнення результатів)*
6. Krakovska S., Palamarchuk, L., Azarov Y., **Chyhareva A.**, & Shpytal T. (2023). The least squares method in estimating the accuracy of surface air temperature projections based on ensembles of regional climate models. Geofizicheskiy Zhurnal, 44(5), 34–53. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i5.272326> (Q4 Web of Science) *(Особистий внесок автора – аналіз літературних джерел, збір та обробка даних кліматичних проєкцій за методикою, описаною в дисертації)*

### **Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

7. **Chyhareva A.**, Gorodetskaya I., Luis D., Wille J., Passalacqua G., Krakovska S., Cloud and precipitation microphysics during atmospheric river events at the Antarctic Peninsula». Virtual Symposium by the International Atmospheric Rivers Conference (IARC) Community (5-9 жовтня 2020), Book of Abstracts [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2020/IARC\\_Book\\_of\\_Abstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2020/IARC_Book_of_Abstracts.pdf) *(Особистий внесок*

- автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення )*
8. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Gorodetskaya, I., Pishniak, D., Wille, J., and Rowe, P.: Cloud and precipitation microphysics evaluated with ERA-5 and Polar WRF over the northern Antarctic Peninsula, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13058, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13058>, 2021 (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення )*)
  9. Pishniak, D., Krakovska, S., **Chyhareva, A.**, and Razumnyi, S.: Preliminary analysis and main problems of instrumental measurement complex at the Vernadsky Antarctic Station, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13591, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13591> , 2021. (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень, аналіз результатів*)
  10. Krakovska, S., Balabukh, V., **Chyhareva, A.**, Pysarenko, L., Trofimova, I., and Shpytal, T.: Projections of regional climate change in Ukraine based on multi-model ensembles of Euro-CORDEX, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-13821, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13821> , 2021. (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів*)
  11. **Chyhareva A.**, S. Krakovska, I. Gorodetskaya, D. Pishniak. Preliminary results of PolarWRF application for cloud and precipitation study at Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station». X International Antarctic Conference (Kyiv, Ukraine, May 11-13, 2021). Book of Abstracts <http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Abstracts-X-IAC-2021.pdf> (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення )*)

12. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Palamarchuk, L., and Gorodetskaya, I.: Mixed cloud properties during high-intensity precipitation events over Northern Antarctic Peninsula, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10388, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10388> , 2022. *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення)*
13. Krakovska, S., Shpytal, T., **Chyhareva, A.**, Pysarenko, L., Trofimova, I., and Kryshchuk, L.: Ensembles of Euro-CORDEX RCMs for assessment of specialized climate indices in Ukraine, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10724, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10724> , 2022. *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів)*
14. Rowe P., Zou X., Gorodetskaya I., Cordero R., Wille J., **Chyhareva A.**, Ralph F.M., Bromwich D., Kawzenuk B., and Zhang Z.: Foehn Warming over the Antarctic Peninsula Amplified by Strong Atmospheric Rivers. International Atmospheric River Conference 2022, [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf) *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський)*
15. Durán-Alarcón C., Gorodetskaya I., **Chyhareva A.**, Rowe P., Zou X., Dutrievoz N., Krakovska S., Afteniuk O., Favier V., Campos D, Cordero R., Cabello F., Jiménez-Sánchez G., Chicaeme K.: Rainfall and snowfall during two strong atmospheric river events in the Antarctic Peninsula in summer 2022: characterization and evaluation of impact on surface mass balance. International Atmospheric River Conference 2022 [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf) *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський)*

16. Dutrievoz N, Gorodetskaya I., Durán-Alarcón C., Santos C. L.-D., **Chyhareva A.**, Krakovska S, Agosta C., Fourre E., Landais A., Wille J., Favier V., Dethinne. T., Kittel C.: Summer atmospheric rivers during February 2022 at the Antarctic Peninsula: large-scale circulation, moisture sources and precipitation. International Atmospheric River Conference 2022. [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf) (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський*)
17. Gorodetskaya I., Zou X., Durán-Alarcón C., Rowe P., González-Herrero S., Dutrievoz1 N., Imazio P., Wille J., Park S., Campos D., Cordero R., Carrasco J., Colwell S., Gulisano A., **Chyhareva A.**, Krakovska S., Ralph F.M.: Summer 2022 temperature extremes at the Antarctic Peninsula triggered by a strong atmospheric river and foehn. International Atmospheric River Conference 2022 [https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC\\_2022\\_BookofAbstracts.pdf](https://cw3e.ucsd.edu/wp-content/uploads/IARC2022/IARC_2022_BookofAbstracts.pdf) (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський*)
18. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Gorodetskaya, I., and Palamarchuk, L.: Cloud and precipitation profiles from observations and Polar-WRF simulations over Vernadsky station (western Antarctic Peninsula) during austral winter 2022, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-667, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-667> , 2023. (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних, моделювання за допомогою чисельної моделі PolarWRF, обробка результатів, узагальнення* )
19. Pysarenko, L., Krakovska, S., Shpytal, T., **Chyhareva, A.**, Trofimova, I., and Kryshopt, L.: Projections of continentality and cold season indices in Ukraine based on the ensembles of Euro-CORDEX RCMs, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-727, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-727>, 2023. (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів*)

20. Krakovska, S., Balabukh, V., **Chyhareva, A.**, Shpytal, T., Pysarenko, L., Trofimova, I., and Kryshpoto, L.: Assessment of climatic season changes in Ukraine during 21st century based on an ensemble of 34 RCM projections of Euro-CORDEX, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-835, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-835> , 2023. *(Особистий внесок автора – збір та обробка даних проєкцій за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів)*
21. Mottram, R., Mooney, P., and Torres, J. A. and the PolarRES Consortium: A first look at the new PolarRES ensemble of polar regional climate model storylines to 2100, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-14470, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-14470> , 2023. *(Особистий внесок автора – збір, обробка та аналіз даних в межах виконання завдань у Work Packages 3, 4 та 5 проекту PolarRES, за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів)*
22. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S. Year of Polar Prediction in the Southern Hemisphere at Vernadsky station: Preliminary results on cloud characteristics from the radiosounding measurements and modelling. XI International Antarctic Conference (Kyiv, Ukraine, May 10-12, 2023) Book of Abstracts [http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts\\_IAC-11\\_2023\\_.pdf](http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts_IAC-11_2023_.pdf) *(Особистий внесок автора – збір, обробка та аналіз даних спостережень на станції Академік Вернадський, моделювання з чисельною моделлю PolarWRF)*
23. Krakovska, S., **Chyhareva, A.** Rain fraction of precipitation during the 21st century as an indicator of climate change in the Antarctic peninsula region. XI International Antarctic Conference (Kyiv, Ukraine, May 10-12, 2023) Book of Abstracts [http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts\\_IAC-11\\_2023\\_.pdf](http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Book-of-Abstracts_IAC-11_2023_.pdf) *(Особистий внесок автора – збір, обробка аналіз та візуалізація даних проєкцій змін клімату)*

24. **Chyhareva, A.**, Krakovska, S. (2023): PolarWRF microphysics' schemes sensitivity to cloud droplets concentration in the Antarctic Peninsula region, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4618>. (*Особистий внесок автора – збір та обробка вхідних даних, моделювання з чисельною моделлю PolarWRF, аналіз та візуалізація отриманих результатів*)
25. Dutrievoz, N., Agosta, C., Nguyen, S., Risi, C., Vignon, E., Landais, A., Leroy-Dos Santos, C., Fourné, E., Cauquoin, A., Werner, M., Gorodetskaya, I., **Chyhareva, A.**, Krakovska, S., Minster, B., Prié, F. (2023): An observational benchmark for water isotope-enabled atmospheric general circulation models in Antarctica, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4358>. (*Особистий внесок автора – збір та обробка даних спостережень на станції Академік Вернадський*).
26. Mottram, R., Mooney, P., PolarRES Consortium. (2023): A new ensemble of Arctic and Antarctic regional climate models with storylines to 2100, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-3080> (*Особистий внесок автора – збір, обробка та аналіз даних в межах виконання завдань у Work Packages 3, 4 та 5 проекту PolarRES, за методологією, що описана в дисертації, аналіз результатів*)