

УДК 551.501.81: 502.5: 508.85 : 509.34.2

КП XXXXXX

№ держреєстрації 0113U000332

Інв.№

Міністерство освіти і науки України
Одеський державний екологічний університет
(ОДЕКУ)

65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15

тел. (0482) 63-62-09

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор ОДЕКУ з НР
д-р геогр. наук, проф.
Ю.С. Тучковенко
2015.12.30



ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

РОЛЬ МЕЗОМАСШТАБНИХ І КОНВЕКТИВНИХ ПРОЦЕСІВ В
ЦИРКУЛЯЦІЇ АТМОСФЕРИ: ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ І
МОДЕЛЮВАННЯ З ВИСОКИМ ПРОСТОРОВИМ РОЗДІЛЕННЯМ
(заключний)

Керівник НДР
д.геогр.н., с.н.с.,

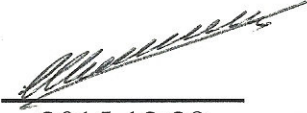
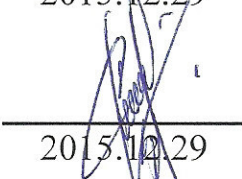
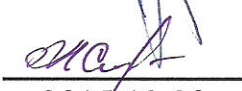
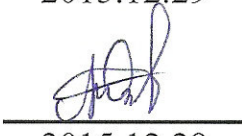
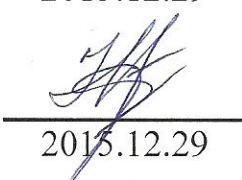
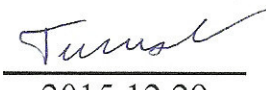
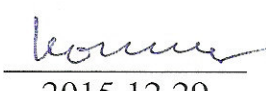
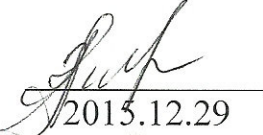


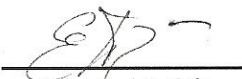
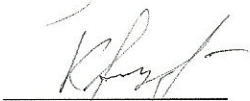
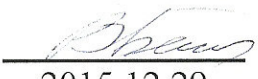
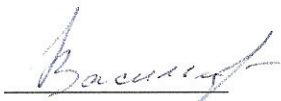
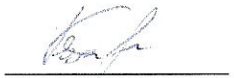
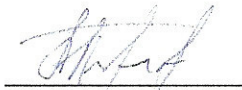
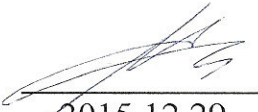
С.В. Іванов

2015

Рукопис закінчено 1 грудня 2015 р.
Затверджено на засіданні науково-технічної ради ОДЕКУ
Протокол №8 від 24.12.2015

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР доктор геогр. наук, ст.наук.співробітник	 2015.12.29	С. Іванов (вступ, висновки, загальне керівництво)
Відповідальний виконавець, ст.наук.співробітник, к. геогр. н.	 2015.12.29	Ю. Паламарчук (розд.2-4, висновки)
Старший науковий співробітник, доктор техн. наук, професор	 2015.12.29	М. Копитчук (ОНПУ, розд.3.1, 3.2)
Старший науковий співробітник, к.фіз.-мат. н, доцент	 2015.12.29	І. Рубан (розд.1, тех.документація)
Старший науковий співробітник, к. геогр. наук, професор	 2015.12.29	Г. Івус (розд. 5)
Старший науковий співробітник, к. геогр. наук	 2015.12.29	О. Грушевський (розд.2-4)
Старший науковий співробітник,	 2015.12.29	М. Смірнова (розд.2)
Старший науковий співробітник,	 2015.12.29	Ю. Котельнікова (розд.5)
Науковий співробітник, к.геогр.н., асистент	 2015.12.29	І.Хоменко (розд.3)
Старший науковий співробітник, к.фіз.-мат.н, доцент	 2015.12.29	П.Тішин (ОНПУ, розд.2-3)
Науковий співробітник	 2015.12.29	І. Копитчук (ОНПУ, розд. 2-3)
Науковий співробітник, к.геогр.н., асистент	 2015.12.29	Е.Агайар (розд.2-6)

Інженер	 2015.12.29	О. Піжун (розд.2-5)
Технік	 2015.12.29	О. Крукова (розд.1)
Технік	 2015.12.29	В. Бейгул (розд.2)
Технік	 2015.12.29	О. Васильєва (розд.2)
Технік	 2015.12.29	О. Голінка (розд.2)
Технік	 2015.12.29	Т. Чолак (розд.2)
Технік	 2015.12.29	І. Ковальков (розд.2-3, тех.оформлення)
Технік	 2015.12.29	Г. Павлова (розд.3-4)
Нормоконтролер	 2015.12.29	С. Малацковська

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 140 с., 33 рис., 44 табл., 30 джерел.

Об'єкт дослідження – мезомасштабні та конвективні процеси в атмосфері і їх взаємодія з великомасштабним потоком.

Мета роботи – розробка програмного комплексу обробки матеріалів дистанційного зондування атмосфери для кількісної оцінки полів опадів та вдосконалення моделюючої прогностичної системи стану атмосфери HARMONIE.

Методи дослідження – кількісний аналіз полів опадів та чисельне моделювання з асиміляцією даних спостережень метеорологічних радарів.

Розроблено алгоритм відновлення мезомасштабної структури опадів за результатами радарного зондування європейської метеорологічної мережі в ході польового експерименту BaltRad. Інстальована мезомасштабна атмосферна модель HARMONIE-38h1.2 на локальній платформі та комп'ютерній платформі HPCF ECMWF. Вдосконалено метод асиміляції відбивних характеристик атмосфери за результатами радарних вимірювань. Імплементовано алгоритм препроцесінга вихідних даних і фільтрації шумів на основі міжнародних форматів BUFR, HDF і OBSTAT. Проведено чисельні експерименти з мезомасштабної динаміки атмосфери. Встановлено вплив аерозолів на фізичні характеристики атмосфери.

**ЧИСЕЛЬНИЙ ПРОГНОЗ, МОДЕЛЬ HARMONIE, АСИМІЛЯЦІЯ,
МЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ РАДАР, ФОРМАТИ ДАНИХ, ОБРОБКА
СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

Умови одержання звіту: за договором. Адреса ОДЕКУ: Одеса, 65016, Одеса, вул. Львівська, 15.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУ ОПАДІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОНВЕКТИВНИХ ПОЛІВ.....	8
1.1 Основні принципи створення кількісного прогнозу опадів	8
1.2 Стійкість по Лагранжу	9
1.3 Відстеження області опадів	11
2 ЗАСТОСУВАННЯ РАДАРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ КІЛЬКІСНОГО ПРОГНОЗУ ОПАДІВ.....	18
2.1 Формат ієрархічних даних для обробки радарних вимірювань.....	18
2.2 Особливості радарних даних.....	35
2.3 Обробка метеорологічних радарів з використанням програми Rack.....	38
2.3.1 Загальна характеристика Rack.....	38
2.3.2 Інсталяція і основи використання Rack.....	39
2.3.3 Виявлення і видалення аномалій.....	40
2.3.4 Основні продукти.....	42
2.3.5 Композиційне зображення.....	47
2.3.6 Інші функціональні можливості Rack.....	51
3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕЗОМАСШТАБНИХ АТМОСФЕРНИХ ПРОЦЕСІВ.....	52
4 ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ ДЛЯ МОДЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ.....	75
4.1 Використані обчислювальні засоби.....	75
4.2 Асиміляція радарних даних в чисельних моделях прогнозу погоди	81
4.3 Загальні алгоритми функціонування системи.....	86
4.4 Розробка алгоритмів обробки аномалій.....	100
4.2 Розробка алгоритму усереднення даних в одному наборі даних.....	105
5 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	111
5.1 Методологія.....	112
5.2 Аналіз отриманих результатів.....	117
5.3 Вплив вуглецевих аерозолів.....	121
5.4 Вплив морських аерозолів.....	126
ВИСНОВКИ.....	130
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	133

ВСТУП

Успішне функціонування суспільства сьогодні дедалі більше залежить від стану навколишнього середовища, і погодних умов зокрема. Якщо прогнозування температури, атмосферного тиску, вітру зазнало суттєвого покращення, то передбачення опадів все ще залишається одним з невирішених питань. Дослідження мезомасштабних процесів вийшло на передовий рубіж наук про атмосферу після того, як були відкриті нові можливості спостерігати локальні та регіональні метеорологічні явища за допомогою методів дистанційного зондування з високим розділенням. Перехід на цифрову обробку сигналів, зокрема, відбивної здатності атмосфери за радарними вимірюваннями, дозволив отримувати кількісні оцінки вмісту вологи в атмосфері, енергії фазових переходів, доступної потенціальної енергії, які сприяють формуванню нових уявлень в мезометеорології.

Дослідження останніх років показали важливу роль нелінійних міжмасштабних взаємодій і ефекту від'ємної в'язкості в загальній енергетиці атмосфери. Один із значущих піків енергії у спектрі атмосферних рухів пов'язаний з мезомасштабними й конвективними процесами. У фокусі досліджень знаходяться мезомасштабні і конвективні процеси в атмосфері, інтенсивний розвиток яких відбувається як у фронтальних зонах, так і зонах внутрішньомасової конвекції. З цими рухами пов'язана суттєва частина загального енергетичного балансу атмосфери, потоків тепла і вологи. За рахунок нелінійних взаємодій і передачі енергії вгору по каскаду мезомасштабні рухи сприяють регенерації та інтенсифікації великомасштабних процесів. Проте, через недолік інформації про деталі просторової структури і мінливості короткоживучих атмосферних форм, дати точну кількісну оцінку таких взаємодій складно.

До вищезгаданого слід додати вплив хімічних компонентів в атмосфері, зокрема, аерозолів. Частки аерозолію відіграють важливу роль впливаючи як прямо - внаслідок розсіювання й поглинання короткохвильової й довгохвильової радіації, так і непрямо - змінюючи альbedo і тривалість існування хмар. Непрямий радіаційний вплив аерозолів супроводжується високим рівнем невизначеності, який необхідно обмежити для більш надійного прогнозування погодних умов і кліматичних змін [1]. Аерозолі непрямо впливають на стан атмосфери шляхом зміни мікрофізичних властивостей хмар, які в значній мірі визначаються змінами концентрації аерозольних часток. Цей вплив виявляється настільки значним, що може

активувати створення крапель - хмарних ядер конденсації (*cloud condensation nuclei*, CCN). Усі аерозольні частинки в атмосфері можуть бути класифіковані як первинні і вторинні. Перші включають вуглецеві частки, що виникають внаслідок горіння, частки морської солі з бульбашок океанської води, що лопнули, і частки з мінерального пилу, а другі (вторинні) - утворені ядра сірчаної кислоти і води. Останні результати показали, що значний внесок в кількість хмарних ядер конденсації мають вторинні частинки.

Однією з актуальних задач прогнозу погоди, особливо небезпечних стихійних і екстремальних умов, є засвоєння нових типів даних, до яких відносяться радарні вимірювання. Необхідність використання радарних даних обумовлена їх високим розділенням у просторі та часі. Згідно приблизним оцінкам така інформація дає змогу відображати тривимірні поля опадів з розділенням 1 км кожні 5 хвилин. Досягнення останніх десятиліть в області вимірювальної техніки дозволяють отримувати кількісні характеристики тривимірної структури полів опадів з високим просторовим розділенням до сотні метрів в радіальному напрямку променя радара. На порядку денному стоїть питання цифрової обробки такої інформації та її засвоєння в регіональних атмосферних моделях. Для цього необхідно вирішити ряд складних технологічних проблем, пов'язаних з алгоритмізацією обробки, препроцесінга та уніфікованого представлення даних в стандартних форматах. Прогрес у напрямку засвоєння даних метеорологічних радарів сприятиме скороченню помилок в початкових даних і, відповідно, уповільненню її зростання на періоді чисельного прогнозу.

На шляху до вирішення вже зазначених питань і цілого ряду багатьох інших, було реалізовано трирічний проект (2009 – 2012pp.) BALTRAD, що частково фінансувався програмою «Регіон Балтійського Моря» Європейського Союзу. Партнерами проекту були: Шведський Метеорологічний і Гідрологічний Інститут (www.smhi.se), Фінський Метеорологічний Інститут (www.fmi.fi), Інститут Метеорології і Водного Господарства, Польща (www.imgw.pl), Естонський Метеорологічний і Гідрологічний Інститут (www.emhi.ee), Датський Метеорологічний Інститут (www.dmi.dk), Латвійське Агентство по навколишньому середовищу, геології і метеорології (www.meteo.lv), Республіканський гідрометеорологічний центр, Білорусія (www.pogoda.by), Агентство з Радіаційної і Ядерної Безпеки, Фінляндія (<http://www.stuk.fi>). Нововведення полягає в розробці архітектури комунікаційної мережі, що дозволить здійснювати обмін і обробку даних метеорологічних радарів в режимі реального часу за допомогою загальних алгоритмів відповідно до потреб кожної країни-учасниці. Нова мережа

збільшила покриття діючої мережі і покращила якість інформації за допомогою використання сучасних методів.

На сьогодні система BALTRAD надає точну, своєчасну інформацію про дощ, сніг, град і вітер з високим розділенням, що дозволяє підвищити безпеку життя, інфраструктури і майна. Очікується, що розроблені стандарти будуть уніфіковано впроваджені в мережі метеорологічних радарів для всієї Європи.

В рамках товариського співробітництва офіційних представників BALTRADу з Одеським Державним Екологічним Університетом було отримано доступ до баз радарних даних, які були створені в ході роботи зазначеного проекту.

В представленій роботі поряд з існуючими методами і підходами для обробки даних метеорологічних радарів відображені результати відтворення мезомасштабних систем опадів.

1 ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУ ОПАДІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОНВЕКТИВНИХ ПОЛІВ

1.1 Основні принципи створення кількісного прогнозу опадів

Серед основних проблем створення точного надкороткострокового прогнозу опадів чисельними моделями вважаються наступні фактори. По-перше, недостатнє просторове розділення модельних сіток, тобто масштаб конвективних осередків значно менший масштабів, які розв'язуються в моделі у явному вигляді. По-друге, неповне засвоєння даних в моделі на етапі ініціалізації, тобто недоліки урахування фактичного стану атмосфери, в першу чергу, еволюція потоків вологи, перешкоджають точному відтворенню полів опадів на найближчі 0-6 годин. Зазначені недоліки чисельних моделей вказують на необхідність інших підходів до створення кількісних прогнозів опадів. Саме дані вимірювань метеорологічних радарів виступають сьогодні ідеальною основою для розробки короткострокових прогнозів опадів. Головна ідея використання радарних даних для прогнозу опадів полягає в екстраполяції у просторі та часі областей з опадами. Багато таких екстраполяційних стратегій детально освітлені в публікаціях, однак більшість з них може бути розділена згідно деяких концепцій або принципів свого походження. Переважаючими стратегіями виступають системи, що базуються на відстеженні осередку опадів (*cell tracking*) і системи, в основі яких лежить відстеження області з опадами (*area tracking*). Перша стратегія розглядає осередки опадів як окремі об'єкти, і при прогнозі майбутнього стану концентрується на розвитку та переміщенні таких об'єктів. У разі реалізації другої стратегії зображення з опадами розподіляється на сітки або блоки (*boxes*), і в кожний наступний момент часу відстежується відповідний блок. Таким чином можна визначити швидкість пересування, відповідно передбачити майбутні умови. Системи відстеження осередків, як правило, створюються для визначення місця знаходження небезпечних об'єктів погоди (в більшості випадків конвективних) та завчасного випуску штормового попередження про виникнення і розвиток небезпечних явищ погоди. Однак, принципові підходи, що покладені в основу таких систем не дають змогу отримувати інформацію про облогові (*stratiform*) опади. В такому випадку саме системи відстеження області, а не осередку з опадами, є більш ефективними.

1.2 Стійкість по Лагранжу

Найпростішим, але і менш надійним кількісним прогнозом опадів безумовно є прийняття поточного радарного зображення як передбачення. Такий тип прогнозу являється дубльованою стійкістю по Ейлеру і зазвичай приймається як контрольний прогноз: майстерність (*skill*) індивідуального прогнозу часто порівнюється зі стійкістю по Ейлеру. Прогноз, при якому поля опадів переносяться відповідно до поля швидкості (векторне поле) без зміни їх інтенсивності, називається стійкістю по Лагранжу:

$$\frac{dR}{dt} \equiv 0 \quad (1.1)$$

де $R(x,y)$ є інтенсивність опадів в точці (x,y) . В цьому рівнянні dR/dt виражається в координатах поточних даних (система Лагранжа). Рівняння (1.1) може бути записане в фіксованих (зображення) координатах наступним чином:

$$\frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial R}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial R}{\partial t} = 0$$

або

$$u \frac{\partial R}{\partial x} + v \frac{\partial R}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial t} = 0$$

$$v \cdot \nabla R + \dot{R} = 0 \quad (1.2)$$

де $v = (u, v)$ поле швидкості. В цьому рівнянні інтенсивність опадів R відомо з даних сканування радара і необхідно визначити поле швидкості V . Часто переноситься значення відбиття Z замість інтенсивності опадів (отриманої зі значень відбиття). В комп'ютерних науках рівняння (1.2) згадується як рівняння оптичного потоку (*optical flow equation*), або просто оптичний потік. Оптичний потік виступає як визначення видимого руху по аналізу послідовних (дискретних) спостережень. На практиці рівняння оптичного потоку має дискретну природу:

$$U \frac{\Delta R_n}{\Delta x} + V \frac{\Delta R_n}{\Delta y} + \frac{\Delta R_n}{\Delta t} = 0 \quad (1.3)$$

де R_n інтенсивність опадів в момент часу n , а U і V компоненти швидкості поля інтенсивності опадів (або поля відбиття, якщо використовується Z). Дискретні просторові похідні $\Delta R_n / \Delta x$ та $\Delta R_n / \Delta y$ розраховуються по поточному зображенню інтенсивності опадів R_n , тоді як $\Delta R_n / \Delta t$ отримаємо як різницю між R_n та R_{n-1} .

Рівняння оптичного потоку (1.2) не містить достатньо інформації для розв'язання поля швидкості V . Насправді, рівняння (1.2) містить два невідомих U і V . Схеми кількісного прогнозу опадів, які використовують оптичний потік, зазвичай залучають додаткову мінімізацію, як наприклад, мінімізація функції вартості C в колі Ω типу:

$$C = \sum_{\Omega} w \cdot (v \cdot \nabla R + \dot{R})^2$$

де w може бути функцією координат зображення та/або координати в околі. Дана мінімізація веде до перевизначеної системи, звідки отримуються «найкращі» оцінки u і v [2]. Альтернативою для додаткового рівняння з метою забезпечення достатньої інформації для розв'язання v є наступне:

1) мінімізація $\nabla^2 v$, як це реалізовано у версії GANDOLF (одна з використовуваних систем кількісного прогнозу опадів в Великобританії) [3]; де еквівалент мінімізації

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \text{і} \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$

що змушує потік бути більш гладким (*smoothness constraint*);

2) мінімізація $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$, як використано в схемі COTREC (одна з використовуваних систем кількісного прогнозу опадів в Чехії) [4].

Додаткові рівняння, які додаються до рівняння оптичного потоку в літературі носять назву *обмеження оптичного потоку* (*optical flow constraint*). Іноді, в деяких публікаціях рівняння (1.2) розглядається як обмеження оптичного потоку, тоді як додаткові рівняння виступають як рівняння оптичного потоку.

Рівняння (1.3) може бути розширене членами джерел і стоків, що може набути вигляду:

$$U \frac{\Delta R_n}{\Delta x} + V \frac{\Delta R_n}{\Delta y} + \frac{\Delta R_n}{\Delta t} = f(Z_n, Z_{n-1}, \dots, Z_{n-k}, a) + w$$

де f функція k попередніх полів інтенсивності опадів або відбиття, і список m параметрів $a = (a_1, a_2, \dots, a_m)$. w – це компонента шуму. Такий підхід очевидно не зберігає загальну інтенсивність опадів, таким чином, стійкість Лагранжа більше не дійсна. У [5] в 2000 році протестували схему зворотного зв'язку нейронної мережі до функції $f(\cdot)$, але дійшли висновку, що порівняно з відносно простою адвекцією Лагранжа, досягається лише незначна перевага при використанні такої складної процедури, що базується на нейронній мережі. Звичайно, своєрідні умови проведеного експерименту в цьому дослідженні не можуть враховувати всі можливі формулювання нейронних мереж (а разом з тим і функцій f), але результати припускають, що більш комплексні схеми не завжди гарантують кращий кількісний прогноз опадів ніж більш прості схеми.

Хоча побудова поля швидкості $v(u, v)$ за допомогою оптичного потоку (рівняння (1.2) та додаткові обмеження) є достатньо обгрунтованою з математичної точки зору, однак, це часто призводить до значного зашумлення полів швидкості, або помилковості. Отже, поля швидкості нерідко відтворюють іншими методами. При створенні полів кількісного прогнозу опадів часто використовують два основні підходи, які широко висвітлені в літературі: методи відстеження області з опадами та методи відстеження осередків (центрів) опадів.

1.3 Відстеження області опадів

Відстеження області розділяє зображення інтенсивності опадів на сітку блоків і для кожного блоку на наступному зображенні шукається відповідний йому блок (в значенні максимуму кореляції). Набір векторів, що відображають переміщення відповідних блоків формує поле швидкості v . Процедура відстеження області опадів зображена на рис.1.1, де представлена концепція TREC [6], однак інші відстежувачі області кореляції працюють аналогічним чином.

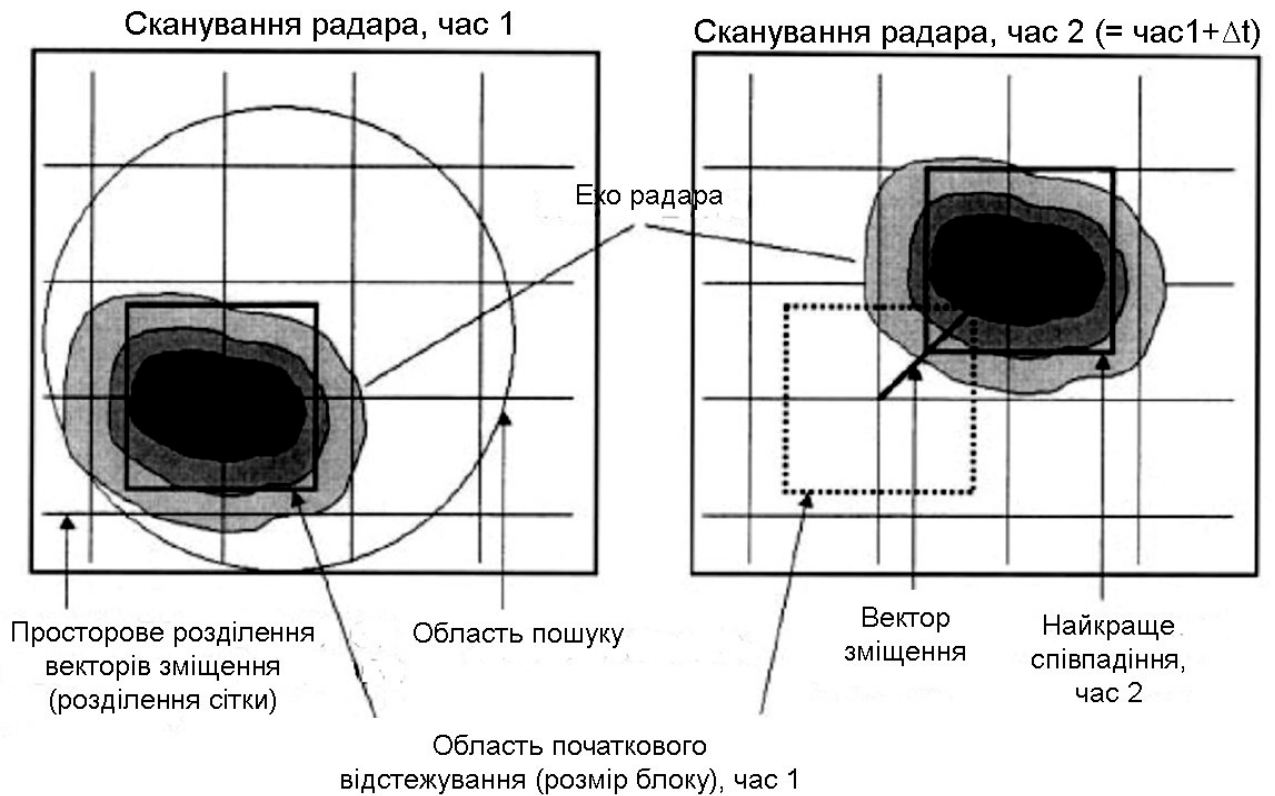


Рисунок 1.1 - Концепція алгоритму відстеження області TREC.

Перше зображення (ліворуч) визначає просторовий розподіл для векторів зміщення. Навколо кожної точки сітки визначена область відстеження, що має назву розмір блоку (*box size*). Цей блок порівнюється зі схожими блоками в межах зони пошуку другого зображення. Розмір зони пошуку визначається шляхом вибору максимальної швидкості і затримки в часі між першим та другим зображеннями. Для кожної пари блоків першого та другого зображень розраховується коефіцієнт кореляції. Вектор зміщення між парами блоків, визначений за максимальним коефіцієнтом кореляції, вважається як дійсний вектор швидкості. На жаль, описана вище процедура призводить до зашумлення полів швидкості, нерідко містячи в собі невірні вектори або дивергентні особливості. Декілька схем розроблено для згладжування та/або корекції цих недоліків.

Відстеження осередків з опадами. При відстеженні осередків (центрів) на послідовних зображеннях радара розглядається еволюція дискретних об'єктів. Кожний алгоритм відстеження осередків має дві основні складові: *алгоритм виявлення (detection algorithm)* і *алгоритм узгодження (matching algorithm)*. В першій частині дискретні об'єкти (зазвичай суміжні регіони з високим значенням відбиття на двовимірних зображеннях або в тривимірних сканованих об'ємах) ідентифікуються на скануваннях і їх характеристики зберігаються в базі даних певної структури. Як правило

такими характеристиками виступають координати центру, область, найбільші значення ехо (*echo-tops*), інтегрована по вертикалі рідина в межах осередку (*cell-based vertically integrated liquid*), та ін. В другій частині алгоритму, частині узгодження зазначені характеристики використовуються для виявлення ідентичних осередків на наступних зображеннях. Зазвичай, визначення області пошуку осередку опирається на попередні швидкості осередку. Головною перевагою являється те, що статистики осередку можуть бути отримані з відстежень осередків, і стають можливими статистичні дослідження осередків опадів. Крім того, інтенсивні конвективні осередки часто демонструють динамічну поведінку, яка значно відрізняється від великої області з опадами, що оточує такі осередки. Очевидно, відстеження осередків очікується успішнішим при розвитку ситуацій з інтенсивними конвективними процесами.

Спектральні алгоритми. Спектральні алгоритми забезпечують підхід, який базується на спостереженні, що найменші масштаби на зображенні інтенсивності опадів, як правило, являються найменш передбачуваними, оскільки їх типовий час існування є значно коротшим ніж час існування більших структур. В спектральному алгоритмі зображення відбиття розміром $L \times L$ пікселів розкладається на адитивний каскад (*additive cascade*) n рівнів X_k , представляючи k -тий масштаб розкладання так, що

$$dBZ_{i,j}(t) = \sum_{k=1}^n X_{k,i,j}(t), \quad i = 1, \dots, L, \quad j = 1, \dots, L \quad L = 2^n$$

де $dBZ_{i,j}(t)$ відбиття в dB в пікселі (i, j) в момент часу t . Інтенсивність опадів R має мультиплікативну структуру, тобто поля опадів можуть бути наближені шляхом множення незалежних складових процесів на різних масштабах [7]. Якщо брати логарифм, то ця мультиплікативна структура перетворюється на сукупність і це є причиною того, чому саме dBZ береться для розкладання, а не Z або R . X_k в каскаді представляє мінливість початкового (дійсного) поля зі структурами масштабів між $2^{-(k+1)}L$ та $2^{-k}L$ пікселів.

Цей метод використовується в S-PROG алгоритмі, що розроблено в [8], і використовується в різних схемах надкороткострокового прогнозування. Приклад поля відбиття і пов'язаного розкладання наведено на рис.1.2.

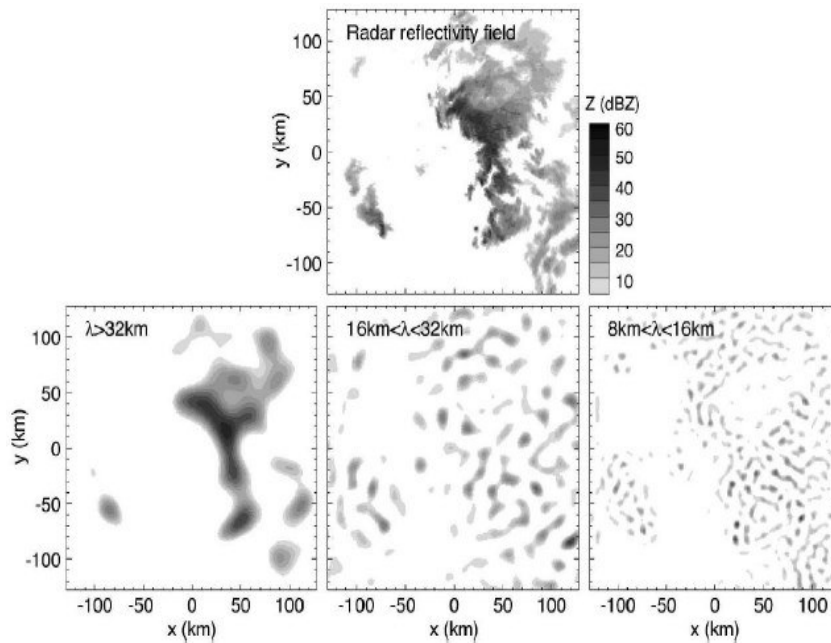


Рисунок 1.2 – Розкладання відбитого сигналу (зверху) по каскаду структур різних масштабів (знизу).

Після розкладання еволюція рівнів розглядається окремо: міра часу існування для певного рівня отримується шляхом дослідження кореляції цього рівня в моменти часу t_1 та t_2 ($= t_1 + \Delta t$). Потім майбутнє зображення інтенсивності опадів розкладається додаванням різних рівнів, приймаючи до уваги їх передбачений час існування як вагу. Рівні з великими структурами будуть мати високі значення кореляції з попередніми рівнями, отже ці рівні будуть переважати на тривалих інтервалах часу.

Один з недоліків легко побачити на рис.1.2: присутність періодичних структур на малих масштабах, що явно відсутні на початковому полі відбиття. Це добре відомий ефект в спектральних розкладах, який носить назву ефект Гіббса (*Gibbs effect*). Цього ефекту можна в значній мірі уникнути шляхом використання локальних спектральних розкладень, які можуть бути реалізовані за допомогою вейвлетів.

Зазвичай, спектральні алгоритми самі по собі не забезпечують процедури адвекції; різні рівні каскаду мають бути перенесені додатковими процедурами.

Експертні системи. Експертні системи – це назва класу систем, які містять в собі комбінацію одного із зазначених алгоритмів в сукупності з іншими даними, концептуальними моделями та/або явними розв’язаннями чисельних рівнянь. Головною метою таких доповнень на додаток до вище зазначених алгоритмів виступає можливість передбачення виникнення (інтенсифікації) або згасання шторму. Дійсно, оскільки алгоритми

відстеження в своїй основі мають тільки поля відбиття в минулому, то вони не здатні передбачити виникнення жодного шторму.

Узагальнені рекомендації щодо створення системи кількісного прогнозу опадів за даними радару. Розроблення будь-якої системи кількісного прогнозу опадів повинно починатися з чіткого опису вимог споживача. Перед початком фактичної розробки системи конструктор (в даному випадку це особа, яка займається розробкою системи) повинен ретельно дослідити точні цілі системи. Наступні питання повинні бути висвітлені з максимальною повнотою, точністю і глибиною.

а) Тип опадів. Очікувана система повинна концентруватися на потужній конвекції з високими значеннями інтенсивності опадів та відповідними загрозами, або ж перевага повинна надаватися якісній екстраполяції облогових ситуацій (переважають опади облогового типу), які спостерігаються значно частіше ніж конвективні, хоча і несуть в собі менше загрози? Звичайно, ідеальною є така система, яка в рівній мірі добре працює в обох випадках (в обох типах ситуацій), однак неминучим є факт, що в певний момент рішень необхідно буде віддавати перевагу або прогнозуванню великомасштабних комплексів з опадами, або екстраполяції індивідуальних осередків. В деяких випадках для запобігання таких моментів складних рішень розробляються системи, що складаються з підсистеми, оптимізованої для конвективних опадів і підсистеми, адаптованої для облогових ситуацій.

б) Вихідний результат. Очікувана система кількісного прогнозу опадів повинна випускати детермінований або ймовірнісний прогноз? Кінцеві користувачі часто віддають перевагу детермінованому прогнозу, однак такий прогноз представляє лише одну з багатьох можливих майбутніх ситуацій, яка є, як очікується, максимально наближеною до фактичних майбутніх умов. Ймовірнісний прогноз опадів розробляти складніше, проте такий прогноз фактично представляє собою синтез всіх можливих вихідних результатів, що виходять з наявних початкових умов. По суті, обидва типи прогнозу являються доповняльними.

в) Масштаб часу. Схема розбудови системи кількісного прогнозу опадів також визначається проміжком часу прогнозу. Системи кількісного прогнозу опадів, які випускають прогноз більш ніж на найближчі 1-2 години потребують введення інформації від чисельних моделей прогнозу погоди. В конвективних ситуаціях виникнення шторму і його затухання суттєво обмежуються простими процедурами екстраполяції. Часовий масштаб прогнозу також пов'язаний і з його просторовим масштабом: системи кількісного прогнозу опадів континентального масштабу мають значно

довший строк дії (передбачення) ніж аналогічні системи для малих областей, однак їх просторове розділення суттєво менше (більший просторовий крок).

г) Споживачі. Вихідний результат очікуваної системи кількісного прогнозу опадів буде доступний виключно для прогнозистів, чи він повинен бути повністю видимий для широкої публіки (як наприклад, відкриті національні погодні веб-сервіси насичені відповідною прогностичною продукцією)? Найбільш розповсюдженим рішенням в таких ситуаціях є передача вихідних результатів лише до відповідних погодних служб і обмеженої кількості обраних споживачів.

д) Попередження. У разі сильних опадів (злив) очікувана система кількісного прогнозу опадів повинна автоматично генерувати попередження, чи випускати такі штормові попередження повинен черговий прогнозист? Необхідно відмітити, що будь-яке автоматично створене попередження повинно бути перевірене людиною-прогнозистом до того, як воно буде передано до розповсюдження в широкому колі споживачів.

Окремої уваги заслуговує оцінювання будь-якого прогнозу опадів, оскільки в силу своєї "плямистої" структури стандартні статистичні оцінки будуть лише частково відбивати ступінь (не)відповідності прогнозу фактичним опадам. Одна з основних проблем полягає в надійності спостережень необхідних для процедур верифікації. Оскільки мережа спостережень за опадами значною мірою нерівномірна, то приведення вимірюваних опадів у вузли модельних сіток, або пристосування до радарних спостережень вносить додаткові інформаційні викривлення. Існує також і зворотний підхід, тобто для порівняння розробляється інтерполяція полів прогнозу в точки спостережень. Сьогодні для аналізу опадів все більш інтенсивно залучаються супутникові дані й інформація радарів. Осереднені оцінки акумульованих опадів із цих джерел мають різні характеристики і не завжди можуть бути придатними для верифікації окремих станцій або прогнозів у заданій точці. Оскільки прогнози і спостереження полів опадів є функціями і часу і простору одночасно, сукупність різних верифікаційних критеріїв і мір, наведених вище, може бути застосована різними шляхами за допомогою поділу всього набору даних на певні піднабори (відповідно до певних критеріїв розподілу даних в просторі або за часом).

З різним ступенем успіху застосовуються багато стандартних верифікаційних процедур для просторового розподілу опадів. Такі міри як середньоквадратична помилка і коефіцієнти кореляції дають незадовільні оцінки, коли прогноз опадів правильний і в просторі, і в інтенсивності й тривалості, але зміщений щодо дійсного положення у часі або просторі.

Більш сучасні вдосконалені підходи для рішення цього питання розщеплюють якість, або відсутність такого (розбіжності прогноз-спостереження) на наступні складові частини: зсув (просторовий) структур опадів, різниця в кількості опадів і залишкова різниця. Неузгодженість зсуву одержують шляхом процедури перетворення характеристик прогнозу опадів щодо спостережених характеристик до тих пір, поки не задовольнятиметься "критерій оптимальної відповідності". Цей критерій складається з мінімізації середньоквадратичної помилки або спектральних коефіцієнтів функції вартості. На сьогоднішній день область досліджень ефективних і надійних критеріїв оцінки прогнозу опадів залишається досить актуальною і потребує подальшого розвитку [9].

2 ЗАСТОСУВАННЯ РАДАРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ КІЛЬКІСНОГО ПРОГНОЗУ ОПАДІВ

2.1 Формат ієрархічних даних для обробки радарних вимірювань

Загальні визначення і поняття. Формат ієрархічних даних HDF (Hierarchical Data Format) створено американським Національним центром комп'ютерних технологій NCSA (National Center for Supercomputing Applications) для обміну науковими базами даних. Загалом, HDF – це формат даних, що описує сам себе, і використовується для перенесення різних типів даних між різними комп'ютерами. Бібліотека HDF містить інтерфейс для зберігання та пошуку стиснутих та нестиснутих растрових зображень з палітрами кольорів, інтерфейс для зберігання та пошуку n-розмірних наборів наукових даних разом з інформацією про такі дані як мітки, одиниці вимірювання, формати та масштаби по всім вимірам. Інакше кажучи, в HDF використовуються метадані про набори наукових даних SDS (Scientific Data Sets), які містять в собі наступне: 1) систему координат, що використовується для інтерпретації або відображення даних; 2) масштаби вздовж кожної осі; 3) мітки вздовж кожної осі та для всього набору даних загалом; 4) одиниці вимірювання вздовж кожної осі і для даних; 5) допустимі максимальне та мінімальне значення даних; 6) інформацію про калібрування даних; 7) інформацію про додаткові або відсутні значення. Версії 3.3 і вище передбачають роботу з форматом JPEG (формат зображень) та підтримують використання даних формату NetCDF (Network Common Data Form).

Представлена далі інформаційна модель була створена з точки зору спроби утримувати і зберігати всю важливу інформацію, що поступала з трьох різних радарів погоди (різні країни, різні виробники, відповідно різні стандарти та параметри вимірювань). Використання спільного формату даних посередництвом серійного їх виробництва суттєво спрощує створення і використання як локальних, так і міжнародних мереж обміну інформацією.

HDF5 підтримується на багатьох як Unix так і Windows платформах, а особливості порядку проходження байтів вирішуються автоматично. HDF5 файли можуть вільно обмінюватися і передаватися між різними платформами. Цей формат віртуально підтримує будь-які наукові дані з максимальною гнучкістю. Так, наприклад, достатньо просто може бути пристосований оперативний обмін 8-бітовим відбиттям, 16-бітовою шириною спектра та/або 32-бітовими сумарними опадами. Також не складно визначити заголовки, що сприяє визначенню необхідних атрибутів.

Визначення

HDF5 дозволяє зберігати дані у вигляді наступних типів: *атрибути* (*Attributes*), *набори даних* (*Datasets*), *групи* (*Groups*) та *структури* (*Compound*), що визначаються користувачем. На практиці всі вказані типи управляються за допомогою використання універсальних *вузлів-об'єктів* (*Node*), тобто *вузол* (*Node*) може бути будь-яким із зазначених типів.

Скаляри (*Scalars*)

Скалярні значення зберігаються в *атрибутах-об'єктах* і можуть бути будь-якими з наступних (у відповідності до документації HDF5):

H5T_STD_I8BE, H5T_STD_I8LE, H5T_STD_I16BE, H5T_STD_I16LE,
H5T_STD_I32BE, H5T_STD_I32LE, H5T_STD_I64BE, H5T_STD_I64LE,
H5T_STD_U8BE, H5T_STD_U8LE, H5T_STD_U16BE, H5T_STD_U16LE,
H5T_STD_U32BE, H5T_STD_U32LE, H5T_STD_U64BE, H5T_STD_U64LE,
H5T_NATIVE_SCHAR, H5T_NATIVE_UCHAR, H5T_NATIVE_SHORT,
H5T_NATIVE_USHORT, H5T_NATIVE_INT, H5T_NATIVE_UINT,
H5T_NATIVE_LONG, H5T_NATIVE_ULONG, H5T_NATIVE_LLONG,
H5T_NATIVE_ULLONG, H5T_IEEE_F32BE, H5T_IEEE_F32LE,
H5T_IEEE_F64BE, H5T_IEEE_F64LE, H5T_NATIVE_FLOAT,
H5T_NATIVE_DOUBLE, H5T_NATIVE_LDOUBLE, H5T_STRING

На практиці, це означає, що початковий тип на даній платформі може бути будь-яким з наступних (псевдо-С синтакс):

char, schar, uchar, short, ushort, int, uint, long, ulong, llong, ullong, float, double, hsize, hssize, herr, hbool, string

Це також означає, що початковий тип записаний на одній платформі буде прочитаний і автоматично повернений як відповідний початковий тип на іншій платформі.

Бажано, щоб рядки були створені за допомогою знаків ISO-8859-1 набору символів, хоча за деяких умов підтримка для UNICODE може бути більш бажаною.

Послідовності (*Sequences*)

Для зберігання *послідовностей* може бути використаний особливий вид рядків. Послідовність містить скалярні значення записані рядком (*string notation*) і відокремлені комою. Наприклад, послідовності корисні для зберігання радарних станцій, що приймають участь у створенні комбінованого зображення, і для зберігання кутів піднімання, які використовуються в об'ємі даних в полярній системі координат.

Атрибути (*Attributes*)

Атрибут – це HDF5-об’єкт, що використовується для зберігання атрибутів заголовка або даних. В даному випадку, цей об’єкт використовується лише для зберігання атрибутів заголовка.

Набори даних (*Datasets*)

HDF5 набори даних представляють собою об’єкти даних, які самі себе описують і містять в собі *n*-розмірний масив та атрибути, що його описують. Тип масиву може бути будь-який з *char*, *schar*, *uchar*, *short*, *ushort*, *int*, *uint*, *long*, *ulong*, *llong*, *ullong*, *float*, *double* на даній платформі.

Групи (*Groups*)

Група – це об’єкт найвищого рівня, який використовується для організації інших об’єктів. Наприклад, *група* може містити сукупність *атрибутів* заголовку, сукупність *наборів даних*, або бути кореневим об’єктом для повного змісту файлів HDF5.

Концепція інформаційної моделі

Інформаційна модель намагається одночасно досягнути універсальності в обох випадках: 1) зберігання і окремих сканувань, і зображень, і результатів; 2) можливість зберігання послідовностей (в просторі та/або з часом) цих типів інформації з використанням компонування стандартних блоків. Наприклад, результат індивідуального зображення мав би наступну структуру:

```
/what
/where
/how
/image1
/image1/what
/image1/where
/image1/how
/image1/data
```

В цьому прикладі « /image1/data » це фактичний об’єкт набору даних, що містить дані результату.

Часовий ряд, наприклад, таких *зображень* (images) містив би просто додавання « image1-image_n » нових *груп*.

Дані в полярних координатах працюють таким самим чином, за виключенням того, що кожне сканування зберігається в групі сканування (*scan Group*). Об’єми в полярних координатах можуть зберігатися шляхом зв’язування таких груп сканування так само як і *зображення* (images).

Важливо зрозуміти зв’язок між « what, where, how » верхнього рівня і «scan» та «image» « what, where, how » нижнього рівня. *Атрибути* можуть

бути збережені в одному випадку, або ж в обох. Не всі атрибути повинні бути збережені в одному чи іншому, так, якщо атрибути не змінюються серед об'єктів даних, то вони можуть бути збережені на верхньому рівні, тоді як атрибути, що змінюються серед об'єктів даних можуть бути збережені на нижніх рівнях. Якщо даний атрибут з'являється і на верхніх і на нижніх рівнях, тоді кожний окремий рівень передбачає старшинство.

Така концепція надає певний ступінь свободи і гнучкості.

Особливості атрибуту заголовку. Атрибути заголовку комплектуються в три об'єкти груп, всі з них можуть бути використані рекурсивно. Атрибути, які описують зміст даного файлу, час і місце (де і коли відображена файлова інформація) разом компонуються в групу «що» («what»). Атрибути, які описують географічні характеристики даного файлу (проекція, координати кутів, розмірності, масштаби) збираються в групу «де» («where»). Обидві групи «де» і «що» містять лише обов'язкові атрибути. Атрибути, що сумарно описують додаткові характеристики даних/результатів таких як, радарна система, обраний алгоритм, інформація щодо якості зберігаються в групі, що називається «як» («how»). Всі атрибути знайдені в групі «як» розглядаються як необов'язкові, хоча використання зазначених атрибутів настійно рекомендується. Також, додаткові атрибути, які не були тут вказані, можуть бути поміщені лише в групу «як».

Атрибути заголовку найвищого рівня комплектуються в об'єкти групи «що», «де» і «як», які розташовані безпосередньо в кореневій групі під « / ». Кожний атрибут зберігається як об'єкт-атрибут, що містить скалярну величину. Деякі дані/результати можуть мати атрибути заголовку, які відображають особливості набору даних. В такому випадку набір даних і його атрибути заголовку комплектуються в групи «що», «де», «як» нижчого рівня, які пов'язані з цим набором даних.

Представлена концепція має на увазі, що кожний атрибут визначається рядком (string), тобто такий спосіб організації даних виступає більш інтуїтивним порівняно з числовими дескрипторами, які використовуються в BUFR (Binary Universal Form for the Representation of meteorological data – Двійкова універсальна форма представлення метеорологічних даних) і GRIB (GRIdded Binary) форматах.

Обов'язкові атрибути заголовку для всіх файлів наведені в таблиці 2.1. Примітка, всі географічні координати довготи і широти представлені з додатними східними значеннями (східніше гринвіцького меридіану) і додатними північними значеннями (північніше екватору).

Таблиця 2.1 - Обов'язкові атрибути заголовку найвищого рівня «що» для всіх файлів погодних радарів

Назва	Тип	Формат	Опис
object	string	-	Відповідно до таблиці 2.2.
sets	int	-	Кількість наборів даних в файлі. Для вертикальних профілів це кількість профілів у файлі.
version	string	H5rad M.m	Формат або версія інформаційної моделі. «М» це головна версія. «m» це менша (неголовна) версія. Програмне забезпечення налагоджене на видачу попередження, якщо файл було збережено в іншій версії, ніж яка очікувалась. Однак, програмне забезпечення змушене продовжити зчитування файлу, ігноруючи незрозумілі для нього атрибути.
date	string	YYYYMMDD	«YYYY» - рік, «MM» - місяць, «DD» - день даних/результатів.
time	string	HHmmss	«HH» - години, «mm» - хвилини, «ss» - секунди в UTC (всесвітній координований час) даних/результатів.

«Що»-група найвищого рівня (top-level what Group)

Ця група містить лише ті обов'язкові атрибути, які загалом описують зміст даного файлу і час надходження. Ці атрибути представлені в таблицях 2.1-2.14.

Рядкові позначення файлів можуть бути будь-якими у відповідності до табл.2.2. Для кожного набору даних Dataset вони можуть супроводжуватися «що»-групою і з характерною інформацією відповідно до змісту табл. 2.13.

Таблиця 2.2 – Рядкові позначення файлів-об'єктів і їх значення

Рядкова змінна	Опис
PVOL	Об'єм в полярних координатах
CVOL	Об'єм в декартових координатах
SCAN	Сканування в полярних координатах

Продовження табл. 2.2

Рядкова змінна	Опис
IMAGE	Двомірне зображення в декартових координатах
COMP	Двомірне комбіноване зображення в декартових координатах
XSEC	Двомірний вертикальний поперечний розріз
VP	Одномірний вертикальний профіль
THVP	Часовий ряд одномірних вертикальних профілів
інші	Призначається користувачем

«Де» - група (*where Group*)

Атрибути «де»-групи мають відмінності для полярних або декартових наборів даних (*Datasets*), тобто вони містять групи сканування (*scan Group*) і зображення (*image Group*) відповідно. «Де»-група являється обов'язковою, проте вона може бути розташована або на найвищому рівні даного файлу, або на нижчому рівні, що пов'язаний з даним набором даних. Якщо, «де» знаходиться на верхньому рівні, то мається на увазі, що інформація, яка утримується в даному «де», відноситься до всіх наборів даних в цьому файлі. Якщо, «де»-група знаходиться на нижньому рівні, тоді вона повинна бути поміщена в групу сканування або зображення, до якої застосовується вміст. Якщо, «де»-група знаходиться на обох рівнях (і на верхньому і на нижньому), тоді вміст місцевої «де»-групи не приймає до уваги вміст «де» вищого рівня.

Нерідко трапляються випадки, коли деякі атрибути застосовуються для всіх наборів даних в файлі, а інші атрибути можуть відрізнятися для кожного з наборів даних. В таких випадках атрибути, які є загальними можуть розташовуватись в «де»-групі на найвищому рівні, а ті з атрибутів, що різняться, відповідно розміщаються в «де»-групах місцевого рівня.

«Де» для груп полярних даних

Такі «де»-групи містять в собі лише ті обов'язкові атрибути, які загалом описують географічні і геометричні характеристики даного набору даних сканування. Набори даних представляють собою об'єкти, що містять бінарні дані і «де» в даному контексті описує цей набір даних, але фактично не являються частиною цього набору даних.

Полярні дані, тобто необроблені радіолокаційні дані, як функція азимуту і дальності зберігаються в групі сканування (*scan Group*) і об'єм полярних даних поміщається як стек цих груп сканування. Кожна група

сканування містить полярні дані одного параметру (величини) одного піднімання радару.

Таблиця 2.3 – «Де»-атрибути для сканування-об'єктів

Назва	Тип	Опис
lon	float	Довготне положення антени радара (градуси). Дробна частина градусу задається десятковими числами.
lat	float	Широтне положення антени радара (градуси). Дробна частина градусу задається десятковими числами.
height	float	Висота центру антени над рівнем моря (метри).
angle	float	Кут піднімання антени над горизонтом (градуси).
xsize	int	Число елементів розділення по дальності на кожному промені.
ysize	int	Число азимутальних променів в кожному скануванні
xscale	float	Відстань в метрах між двома послідовними елементами розділення по дальності.

«Де» для географічно пов'язаних (прив'язаних) груп зображень

Такі «де»-групи містять в собі лише ті обов'язкові атрибути, які загалом описують географічні і геометричні характеристики даних зображень. Набір даних представляє собою об'єкт, що містить бінарні дані і «де» в даному контексті описує цей набір даних, але фактично не являються частиною цього набору даних.

Бібліотека картографічних проекцій PROJ4 це простий і різносторонній спосіб організації роботи з географічно прив'язаною інформацією. Використання PROJ4 набуває зростаючої популярності в країнах Європи, та особливо в її північних країнах. В результаті, найпрямішим шляхом представлення інформації в радарних файлах щодо проекції являється використання рядкових означень проекцій, які застосовуються з самою бібліотекою.

USGS PROJ4 містить повний набір аргументів для визначення певної проекції, включаючи помилкові східні/північні відхилення, зміну масштабу

координат, вибір еліпсоїду (або означення власного) і знаходження косих (обертових) проекцій.

Таблиця 2.4 – «Де»-атрибути для груп даних географічних зображень

Назва	Тип	Опис
projdef	string	Аргументи визначення проекції, які можуть бути використані разом з USGS PROJ4 [12]
xsize	int	Кількість пікселів по Х- координаті
ysize	int	Кількість пікселів по Y- координаті
xscale	float	Розмір пікселів в Х-площині, в координатах відповідної проекції (часто в метрах)
yscale	float	Розмір пікселів в Y -площині, в координатах відповідної проекції (часто в метрах)
LL_lon	float	Довгота кута нижнього лівого пікселя.
LL_lat	float	Широта кута нижнього лівого пікселя.
UR_lon	float	Довгота кута верхнього правого пікселя.
UR_lat	float	Широта кута верхнього правого пікселя.

«Де» для групи даних поперечних розрізів (“where” for cross-section data Group)

Індикатор висоти/дальності розглядається як особлива форма декартових зображень. Х-розмірність зображення представляє координати в х/у-площині, тоді як у-розмірність описує вертикальні координати індикатора висоти/дальності або поперечного розрізу. Для представлення географічної орієнтації та протяжності індикатора висоти/дальності або поперечного розрізу був визначений спеціалізований набір атрибутів в «де»-групі. Географічне розташування поперечних розрізів задається широтами і довготами стартової і кінцевої позиції. Поперечні розрізи, таким чином, вважаються взятими вздовж великих кіл. В разі, якщо вони взяті вздовж лінії на площині географічної проекції відхилення від великого кола буде незначним для процедур візуалізації.

Таблиця 2.5 – «Де»-атрибути для даних поперечних розрізів

Назва	Тип	Опис
Загальні атрибути		
xsize	int	Кількість пікселів в горизонтальній площині
ysize	int	Кількість пікселів у вертикальній площині
xscale	float	Горизонтальне розділення (метри)
yscale	float	Вертикальне розділення (метри)
Особливості індикатора висоти/дальності		
lon	float	Довготне положення антени радара (градуси). Дробна частина градусу задається десятковими числами.
lat	float	Широтне положення антени радара (градуси). Дробна частина градусу задається десятковими числами.
az_angle	float	Полярний кут
range	float	Максимальна дальність (кілометри)
Особливості поперечного розрізу		
start_lon	float	Довгота стартової позиції
start_lat	float	Широта стартової позиції
stop_lon	float	Довгота кінцевої позиції
stop_lat	float	Широта кінцевої позиції

«Де» для вертикальних профілів

Такі «де»-групи містять в собі лише ті обов’язкові атрибути, які загалом описують географічні і геометричні характеристики вертикальних профілів горизонтального вітру та/або відбиття радара.

Таблиця 2.6 – «Де»-атрибути для даних вертикальних профілів

Назва	Тип	Опис
lon	float	Довготне положення антени радара (градуси). Дробна частина градусу задається десятковими числами.
lat	float	Широтне положення антени радара (градуси). Дробна частина градусу задається десятковими числами.
height	float	Висота центру антени над рівнем моря (метри).
levels	int	Число точок профілю
interval	float	Відстань по вертикалі в метрах між висотними інтервалами, або 0.0 якщо змінна.

«Де» для групи даних часових рядів вертикальних профілів

Часові ряди вертикальних профілів розглядаються як особлива форма декартових зображень. X-розмірність зображення представляє координати часу, тоді як y-розмірність описує вертикальні координати профілів. Вертикальні профілі повинні бути доступні на еквідистантних вертикальних рівнях з постійними часовими інтервалами. В разі відсутності даних на певному рівні або в певний момент часу відповідні області повинні бути заповнені значенням «nodata». Для представлення географічного місця розташування, висотних рівнів і осі часу часових рядів профілів був визначений спеціалізований набір атрибутів в «де»-групі. Кожний THVP (часовий ряд одномірних вертикальних профілів, табл. 2) містить один параметр. Для профілів вітру THVP буде містити як мінімум два набори даних: один для *u*-компоненти поля вітру, і один для *v*-компоненти.

Таблиця 2.7 – «Де»-атрибути для даних часових рядів одномірних вертикальних профілів

Назва	Тип	Опис
lon	float	Довготне положення антени радара (градуси). Дробна частина градусу задається десятковими числами.
lat	float	Широтне положення антени радара (градуси). Дробна частина градусу задається десятковими числами.

Продовження табл. 2.7

Назва	Тип	Опис
height	float	Висота центру антени над рівнем моря (метри).
xsize	int	Кількість пікселів на осі часу
ysize	int	Кількість пікселів по вертикалі
xscale	float	Часове розділення (секунди)
yscale	float	Вертикальне розділення (метри)
xoffset	float	Час (UTC) першого профіля/стовбця в секундах після 00:00 UTC на день означений «date»-атрибутом в «що»-групі
yoffset	float	Висота першого рівня профіля (метри)

«Як» - група (how Group)

«Як»- група містить рекомендовані та інші атрибути, які надають додаткову і допоміжну інформацію, що може бути використана для опису певного об'єкту сканування або об'єкту зображення, як наприклад, інформація щодо якості об'єкту.

«Як»-група являється необов'язковою, проте вона може бути розташована або на найвищому рівні даного файлу, або на нижчому рівні, що пов'язаний з даним набором даних. Якщо, «як» знаходиться на верхньому рівні даного файлу, то мається на увазі, що інформація, яка утримується в даному «як», відноситься до всіх наборів даних в цьому файлі. Якщо, «як»-група знаходиться на нижньому рівні, тоді вона повинна бути поміщена в групу сканування або групу зображення, до якої застосовується вміст. Якщо, «як»-група знаходиться на обох рівнях (і на верхньому і на нижньому), тоді вміст місцевої «як»-групи не приймає до уваги вміст «як» вищого рівня. Нерідко трапляються випадки, коли деякі атрибути застосовуються для всіх наборів даних в файлі, а інші атрибути можуть відрізнятися для кожного з наборів даних. В таких випадках атрибути, які є загальними можуть розташовуватись в «як»-групі на найвищому рівні, а ті з атрибутів, що відрізняються, можуть бути розміщені в «як»-групах місцевого рівня. Для ясності, в таблиці 8 містяться рекомендовані «як»-атрибути, які розділені таким чином, що різні розділи вміщують різні атрибути особливостей продукту.

Таблиця 2.8 – «Як»-атрибути для всіх об'єктів

Назва	Тип	Опис
Загальні атрибути		
WMO	int	Комбінований ВМО блок і номер станції, або 0 якщо нічого не призначено
place	string	Ідентифікатор області, тобто відповідно до табл.9 або <i>sswe</i> для регіонального шведського комбінованого зображення
startepochs	int	Секунди після стандартної епохи 1970, для якої дійсний час початку/старту даних/продукту. Доповнення до «date» і «time» в таблиці 1.
endepochs	int	Секунди після стандартної епохи 1970, для якої дійсний час завершення/кінця даних/продукту. Доповнення до «date» і «time» в таблиці 1.
system	string	Відповідно до табл. 10
software	string	Відповідно до табл. 11
zr_a	float	Z - R константа A в $Z = A R^b$, може застосовуватись до будь-якого продукту, який містить відбиття або інтенсивність опадів
zr_b	float	Z - R показник степеня b в $Z = A R^b$, може застосовуватись до будь-якого продукту, який містить відбиття або інтенсивність опадів
Дані з окремих/індивідуальних радарів		
beamwidth	float	Ширина діаграми спрямованості по рівню половинної потужності
wavelength	float	Довжина хвилі (сантиметри)
rpm	float	Швидкість антени в обертах за хвилину
pulsewidth	float	Ширина пульсу (μs)
lowprf	int	Нижня частота проходження імпульсів (Hz)
highprf	int	Верхня частота проходження імпульсів (Hz)
angles	sequence	Кути піднімання, що використовуються при створенні продукту
Полярні дані		
azmethod	string	Як перероблюються необроблені дані по азимуту для отримання даної величини, відповідно до табл. 2.12

Продовження табл. 2.8

Назва	Тип	Опис
binmethod	string	Як перероблюються необроблені дані по дальності для отримання даної величини, відповідно до табл. 2.12
Декартові зображення, включаючи комбіновані		
angles	sequence	Кути піднімання в порядку зростання, що використовуються при створенні продукту
camethod	string	Як обробляються декартові дані, у відповідності до табл. 2.12
nodes	sequence	Вузли радара (табл.2. 9), що робили внесок даних для кобінювання
Особливості вертикальних профілів		
minrange	float	Мінімальна дальність, на якій використовуються дані при створенні профілю (кілометри)
maxrange	float	Максимальна дальність, на якій використовуються дані при створенні профілю (кілометри)
NI	float	Інтервал однозначної швидкості ($\pm$ м/с)
dealised	int	1 - дані не фільтрувались, інакше - 0

Таблиця 2.9 – Місце знаходження NORDRAD, DMI, і KNMI радарів і їх вузлові значення. Використання трибуквених вузлів дозволяє представляти до 17 576 радарів, якщо використовується написання ненаголошених. Назва «місця» може містити знаки UNICODE.

Місце/місто	Вузол
Hægebostad	hgb
Oslo	osl
Kiruna	kir
Luleå	lul
Örnsköldsvik	ovi
Östersund	osu
Hudiksvall	hud
Leksand	lek
Arlanda	arl
Norrköping	nkp

Продовження табл. 2.9

Місце/місто	Вузол
Vara	var
Hemse	hem
Karlskrona	kkkr
Ängelholm	ang
Korpo	kor
Vantaa	van
Anjalankoski	anj
Ikaalinen	ika
Kuopio	kuo
Utajärvi	uta
Luosto	luo
Vimpeli Lakeaharju	vim
Stevns	ste
Sindal	sin
Rømø	rom
De Bilt	blt
Den Helder	dhl

Примітки:

NORDRAD - Weather Radar Network. NORDRAD, країни партнери-учасники - SMHI (Sweden), Met.no (Norway), FMI (Finland), EMHI (Estonia) and LEGMA (Latvia). 30 північних і 2 балтійських погодніх радарів поєднані у взаємному оперативному обміні радарними зображеннями.

DMI - Датський Метеорологічний Інститут

KNMI – Метеорологічний інститут Королівства Нідерланди

Таблиця 2.10 – Аббревіатури радарних систем і їх значення

Рядок	Значення
GEMAXxx	Gematronik Meteor ACxx radar
EECxx	EEC xx radar
ERICxx	Ericsson xx radar
other	інші радари

Таблиця 2.11 – Аббревіатури програмного забезпечення обробки даних і їх значення

Рядок	Значення
IRIS	Sigmat IRIS
EDGE	EEC Edge
EWIS	Ericsson EWIS
RAINBOW	Gematronik Rainbow
FROG	Gamic FROG, MURAN . . .
SWERAD	SWERAD
NORDRAD	NORDRAD
RMV	DWD RMV
other	інші радари

Таблиця 2.12 – Спосіб/метод скорочень і їх значення

Рядок	Значення
NEAREST	Сусідній або найближчий радар
INTERPOL	Інтерполяція
AVERAGE	Середнє всіх значень
RANDOM	Випадковий
MDE	Мінімальна відстань до Землі
LATEST	Самий останній радар
MAXIMUM	Максимальне значення
DOMAIN	Комбінування, що визначається користувачем
VAD	Індикатор швидкість-азимут
VVP	Обробка сигналу об'єму швидкості
RGA	Узгодження з наземними спостереженнями
other	експериментальний

«Що» - група (*what Group*) для «набір даних»-об'єктів

В даному підрозділі описується використання вмісту «що»- групи з кожним набором даних. Коефіцієнти лінійного перетворення (трансформації) «gain» і «offset» повинні бути відповідно встановлені на 1 або 0, якщо немає наміру використовувати з даним набором даних.

Таблиця 2.13 - «Що»-атрибути заголовку у відповідності до особливостей наборів даних

Назва	Тип	Формат	Опис
product	string	-	Відповідно до таблиці 2.14.
prodpar	float	-	Параметр продукту, тобто висота для продуктів, що базуються на CAPPI (в метрах над радаром), піднімання (град.) для індикатора кругового огляду, рівень відбиття (dBZ) для найбільших значень ехо, період компонування (год.) опадів, азимут (град.) для індикатора дальності/висоти.
quantity	string	-	Відповідно до таблиці 2.14.
startdate	string	Starting YYYYMM MDD	Рік, Місяць, День радарного продукту. (Початок)
starttime	string	Starting HHmmss	Години, Хвилини, Секунди радарного продукту. (Початок)
enddate	string	Ending YYYYMM MDD	Рік, Місяць, День радарного продукту. (Кінець)
endtime	string	Ending HHmmss	Години, Хвилини, Секунди радарного продукту. (Кінець)
gain	float	-	Коефіцієнт «а» в $y=ax+b$ використовується для перетворення «int» в «float»
offset	float	-	Коефіцієнт «b» в $y=ax+b$ використовується для перетворення «int» в «float»
nodata	float	-	Необроблене значення, використовується для позначення областей позбавлених даних.
undetected	float	-	Необроблене значення, використовується для позначення областей нижче порога виявлення вимірювань (випромінено, але нічого не виявлено).

Таблиця 2.14 – Аббревіатури продуктів і їх значення

Рядок	Значення
SCAN	Сканування полярних даних (в полярних координатах)
PPI	Індикатор кругового огляду
CAPPI	Індикатор кругового огляду постійної висоти
PCAPPI	Індикатор кругового огляду псевдо постійної висоти
ETOP	Відбиття на вершині хмари
ZMAX	Максимальне значення відбиття
RR	Накопичення
VIL	Кількість води інтегрована по вертикалі
COMP	Комбіноване/комполітне зображення
WRWP	Профіль вітру
RHI	Індикатор висоти/дальності
XSEC	Довільний вертикальний розріз
VSP	Вертикальне бокове зображення
HSP	Горизонтальне бокове зображення
other	експериментальний

Таблиця 2.15 – Ідентифікатори величин (змінних)

Рядок	Величина, [одиниці вимірювання]	Опис
DBZ	Z [dBZ]	Реєстрований коефіцієнт відбиття
LZDR	ZDR [dBZ]	Диференціальний коефіцієнт відбиття для зсуву
RATE	RR [мм/год]	Інтенсивність опадів
ACRR	RR _{accum} [мм]	Сумарні опади
HGHT	H [км]	Висота (найвищих значень ехо)
VIL	VIL [кг/м ²]	Кількість води інтегрована по вертикалі
VRAD	V _{rad} [м/с]	Радіальна швидкість
WRAD	W _{rad} [м/с]	Ширина спектру радіальної швидкості

Продовження табл. 2.15

Рядок	Величина, [одиниці вимірювання]	Опис
UWND	U [м/с]	Компонента вітру в <i>x</i> -напрямку
VWND	V [м/с]	Компонента вітру в <i>y</i> -напрямку
BRDR	0 або 1	1 – позначає границю, де зустрічаються в комбінації дані двох або декількох радарів, в іншому випадку - 0
QIDX	Якість [0-1]	Ваговий індекс просторово аналізованої якості, змінюється від 0 (найгірша якість) до 1 (найкраща якість)

2.2 Особливості радарних даних

Всі масиви даних і для даних в полярних координатах, і в декартових, зберігаються як «набір даних»-об'єкти. Рекомендується будь-який рівень (від 1 до 6) стискання. Вбудовані в HDF5 рівні стиснення змінюються від 0 (не стискаються) до 9 (максимум стиснення); при реалізації алгоритмів стиснення на рівнях вищих 6-го витрачають ресурси непропорційно до отриманого розміру файлу, що пояснює небажаність використання високих (вище 6) рівнів.

Полярні дані

Кожне сканування в файлі полярного об'єму поміщається в групу (Group) озаглавлену скануванням (*scan_n*), де *n* – індекс сканування в порядку зростання починаючи з 1. В кожному наборі даних сканування (scan Dataset) представлена лише одна змінна. Атрибути, що використовуються для опису характеристик даних містяться в групах «що», «де» і «як» (what, where, how Groups). Самі ж дані зберігаються в окремому наборі даних HDF5.

Початок першого азимутального виходу (перший імпульс) завжди вказує строго на північ і перший елемент розділення по дальності починається з радару. Це означає, що перший азимутальний вихід охоплює інтервал 0-1°, маючи на увазі 360 азимутальних виходів протягом одного сканування. Азимутальні виходи впорядковані по ходу годинникової стрілки.

Інакше кажучи, елементи розділення по дальності зберігаються в еквівалентній X -розмірності масиву і азимутальні виходи в Y -розмірності. Механізму для точного встановлення/азимутальних пропускених азимутальних виходів або елементів розділення по дальності немає. Це означає, що неповні сканування/промені повинні бути заповнені, для того, щоб вони були завершеними. Заповнені області визначаються значенням «nodata», що вказане у відповідній «що»-групі (what Group).

Дані-зображення (Image Data)

Продукт «зображення» в даному контексті має на увазі двомірні декартові кількісні дані, а не візуальний графічний продукт (рисунок). Кожне «зображення» поміщається в групу з назвою «зображення n » (image n), де n – індекс рівня в порядку зростання (де можливе застосування), починаючи з 1. В кожному наборі даних зображення (image Dataset) представлена лише одна змінна. Атрибути, що використовуються для опису характеристик даних містяться в групах «що», «де» і «як» (what, where, how Groups). Самі ж дані зберігаються в окремому наборі даних HDF5.

Бінарні масиви впорядковані і збережені як один несегментований рядок, що починається в верхньому лівому куті і продовжується рядок за рядком (з півночі на південь), зліва (з заходу) направо (на схід). Пропущені області певної змінної позначаються «nodata», що вказано у відповідній «що»-групі (what Group).

Індикатори висоти/дальності, поперечні розрізи і бокові зображення

Індикатори висоти/дальності, поперечні розрізи і бокові зображення являються особливими формами зображення. Індикатори висоти/дальності знімаються з антеною орієнтованою на схід початок (старт) ліворуч і завершення (кінець) праворуч. Якщо антена орієнтована на захід, тоді старт індикатора висоти/дальності праворуч, а кінець відповідно ліворуч. Індикатори висоти/дальності орієнтовані точно на південь або на північ завжди стартують зліва і закінчуються справа. Для поперечних розрізів ліва сторона зображення є початковою точкою і права сторона є кінцевою точкою, незважаючи на азимутальний кут антени. Для бокових зображень, стартова точка це північ для вертикальних бокових зображень і захід для горизонтальних бокових зображень. Так само, як і з іншими файлами зображень, перший піксель це верхній зліва і вміст зображення впорядкований по рядкам зверху до низу і зліва направо.

Профілі

На відміну від полярних або декартових даних, які використовують набори даних для збереження двомірних масивів, профілі залучають декілька наборів даних для зберігання одномірного масиву, що відображає різні змінні вздовж даного профілю. Одна змінна зберігається в кожному наборі даних. Рівні в профілях впорядковані послідовно в порядку зростання. Профіль це група з назвою «профіль» (*profile*), яка містить декілька наборів даних, кожний з яких зберігає змінну для певного рівня. Обов'язкові набори даних для кожного профілю наведені в таблиці 2.16.

Таблиця 2.16 – Набори даних для файлів вертикальних профілів

Назва	Тип	Опис
Обов'язкові		
height	float	Середня висота рівня (m a s l)
Необов'язкові (рекомендовані)		
ff	float	Швидкість середнього горизонтального вітру (м/с)
dd	float	Напрямок середнього горизонтального вітру (градуси)
ff_dev	float	Мінливість швидкості (м/с)
dd_dev	float	Мінливість напрямку (градуси)
n	int	Розмір вибірки
dbz	float	Реєстрований коефіцієнт відбиття радару (dBZ)
dbz_dev	float	Мінливість реєстрованого коефіцієнту відбиття радару (dBZ)
z	float	Лінійний коефіцієнт відбиття радару (Z)
z_dev	float	Мінливість лінійного коефіцієнту відбиття радару (Z)
w	float	Вертикальна швидкість (м/с, додатна вгору)
w_dev	float	Мінливість вертикальної швидкості (м/с)
div	float	Дивергенція (с^{-1})
div_dev	float	Мінливість дивергенції (с^{-1})
def	float	Деформація (с^{-1})
def_dev	float	Мінливість деформації (с^{-1})
ad	float	Вісь вимірювання (0-360°)
ad_dev	float	Мінливість осі вимірювання (0-360°)
chi2	float	Хі-квадрат значення апроксимації профілю вітру

Всі набори даних повинні бути однакової довжини для того, щоб задовольнити висоти задані в `height`. Також, необхідна обережність у визначенні атрибутів «`nodata`» і «`undetected`», оскільки вони будуть застосовуватись до всіх наборів даних в профілі. Тому, для таких цілей більш рекомендовано використовувати «звичайні» метеорологічні флаги такі як - 9999.

Наведений шлях зберігання вертикальних профілів може також використовуватись з часовими рядами таких профілів, однак існує більш ефективний шлях реалізації цього, що і буде продемонстровано далі.

Часові ряди вертикальних профілів

Часові ряди вертикальних профілів розглядаються як особливий вид декартових зображень. *X*-розмірність зображення представляє собою координату часу, тоді як *y*-розмірність описує вертикальну координату профілів. Вертикальні профілі повинні бути доступні на еквідистантних вертикальних рівнях і незмінних часових інтервалах. В разі відсутності даних на певному рівні або в певний час, відповідні області повинні бути заповнені «`nodata`» значеннями. Так само, як і з іншими файлами зображень, перший піксель це верхній зліва, тобто рівень максимальної висоти першого профілю, і вміст зображення впорядкований по рядкам зверху до низу і зліва направо, тобто від першого профілю до останнього в часових рядах. Вказане означає, що приріст висоти («`yscale`») буде від'ємним. Кожний набір даних зображень «профіль-час» містить єдину величину. Для профілів вітру файл «профіль-час» буде містити як мінімум два набори даних: один для *u*-компоненти поля вітру, і один для *v*-компоненти.

Правила створення файлових назв

Рядки файлів (`file strings`) описують (настільки детально, наскільки це можливо без складнощів у керуванні) зміст файлів, відображаючи походження: який вид даних або радарного продукту, з якого радару (якщо не комбінований), і від якої дати і на який час була збережена інформація.

Рядки файлів повинні бути створені таким чином, щоб вони підтримувались більшістю широко використовуваних операційних систем, таких як різні діалекти Unix, Windows, MacOS систем, і можливо VMS/OpenVMS. Необхідно уникати MS DOS 8.3 обмеження задавання файлових назв, як DOS сам по собі.

2.3 Обробка метеорологічних радарів з використанням програми Rack

2.3.1 Загальна характеристика Rack

Rack – це вільна програма обробки даних метеорологічних радарів, команди в якій задаються за допомогою командного рядка. Вона як вхідну інформацію зчитує шаблони або об'єми в форматі HDF5 і створює продукти як одного радара, так і комбіновані продукти (з декількох радарів). Rack також надає функції виявлення і усунення аномалій (anomaly detection and removal → AnDRe). До того ж, Rack підтримує випуск вихідної інформації у форматі зображення і забезпечує пов'язані службові програми такі, як застосування палітри кольорів і прозорість.

Для оперативного або дослідницького середовища Rack по суті є полегшеною опцією, працюючи в Linux/Unix додатково необхідно лише бібліотеки HDF5, PNG і PROJ.4 як зовнішні залежності. Програма виявлення аномалій розроблена на C мові і функціонує в Фінському метеорологічному інституті з 2001 року [10]. Останні розробки також підтримувались BALTRAD проектом, що дозволило зробити програмний код вільно доступним в рамках ліцензії GNU Lesser General Public License. В HDF5 структурах Rack використовує OPERA Data Information Model [11].

2.3.2 Інсталяція і основи використання Rack

Код програми можна отримати на WEB-сторінці <http://baltrad.fmi.fi/software/rack/download.html>. Ця сторінка містить лінки до інсталяційних архівів (zips of Rack, executable) і бібліотеки Drain. Крім того, до пакету включено посібник користувача.

Rack – це програма, команди в якій задаються за допомогою командного рядка і зчитування аргументів відбувається в порядку їх появи. Прості аргументи (без дефісу на початку) сприймаються як вхідні файли об'єму. Окремі шаблони можуть бути просто скомбіновані шляхом видавання назв файлів послідовно, одна за одною. Інші аргументи сприймаються як команди, що повинні виконуватись, або як мінливі завдання.

Типовий виклик складається із читання вхідного файлу(-ів), виконання команд і видачі результатів:

```
rack <input-files> <command> -o <output-file1> \  
    <command2> -o <output-file2> ...
```

Слід зауважити, що після запису продукту/результату файл 1 може продовжувати з наступними командами. Це виступає практичним при створенні різноманітних кінцевих продуктів, що обчислюються на основі одного вхідного файлу. Rack внутрішньо оновлює і забезпечує посилення в трьох структурах радарних даних: вхідний об'єм даних, проміжний полярний продукт декартовий продукт. Потік даних всередині Rack схематично зображено на рис.2.1.

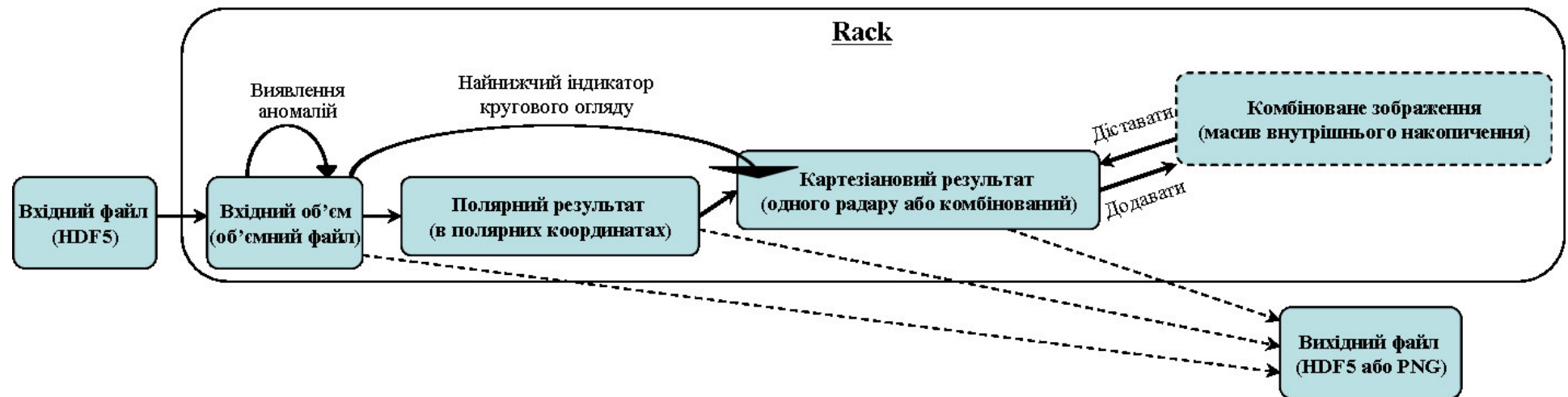


Рисунок 2.1 – Загальний потік даних всередині Rack (адаптовано з [13]).

2.3.3 Виявлення і видалення аномалій

Набір функцій Rack, що спрямовані на виявлення і видалення аномалій, як вже згадувалося раніше, називається AnDRe. Виявлення має в основі звичайні, тобто не поляриметричні дані. Як відомо, ехо, отримане метеорологічним радаром, породжується не лише хмарами з опадами, але також комахами, птахами, літаючими апаратами, кораблями, підстильною поверхнею, морськими перешкодами і електромагнітними джерелами. Від розробників чисельних прогнозів погоди останнім часом надходить все більше скарг щодо проблем якості, що спричиняються не метеорологічними ехо.

В AnDRe обробка даних ділиться на два етапи: ідентифікація аномалій і видалення їх із вхідних даних. Ці етапи модифікують ODIM (OPERA Information Model) [12] дані незалежно так, що користувач може комбінувати Rack обробку даних з іншими програмами. Були застосовані детектори для гранульованого (плямистого) шуму, біометеорів, кораблів та ін.. Розрахунки використовують нечіткі функції (fuzzy function), які відображають результати в безперервних значеннях істинності між 0.0 (ні) і 1.0 (так). Наступний код представляє собою приклад застосування, виявлення і видалення в Rack:

```
rack volume-anomalous.h5 \
--aStoreDetections \
--aBiomet 0dBZ,500m,5dBZ,500m \
--aEmitter 5000m,3.0deg,0.7 \
--aEmitter 20000m,5.0deg,0.7 \
--aShip 20dBZ,10dBZ,1500m,3deg \
--aSpeckle -10dBZ,5 \
--aEraser 0.25,0.25 --aGapFill 1500,5
-o volume-corrected.h5
```

Видалення аномалій це окремий етап з двома додатковими опціями: стирання значень та/або заміщення значень із заповненням пропусків, залучаючи сусідні значення за напрямком їх вищої якості.

2.3.4 Основні продукти

Продукти в полярних координатах. Rack внутрішньо розраховує продукти одного радара з використанням полярної системи координат. Результируючі продукти являються подібними в полярних координатах, як правило, далі перетворюються/обробляються на декартові продукти одного радара або комбіновані продукти. Мотивація для розрахунків проміжних продуктів в полярних координатах виглядає наступним чином: а) полярні координати являються вихідною системою для радара; за умовчанням, полярні продукти розраховуються з таким самим азимутальним розділенням як і дані вимірювань, що означає, що можна уникнути азимутальних інтерполяцій, а отже, буде збережено більше інформації; б) досягається швидкодія, якщо декілька кінцевих продуктів будуть розраховуватись в різних географічних проекціях; в) додавання нових метеорологічних алгоритмів потребує мінімальних розробок/добробок коду. Так, наприклад, розрахунок індикатора кругового огляду постійної висоти (CAPPI) отримується командою `--cappi`. Висота береться як перший аргумент.

```
Rack volume.h5 --cappi 500m -o cappi.h5
```

Іншими, необов'язковими аргументами являються число елементів по дальності, число променів, розділення елементів по дальності, «gain» і «offset» інтенсивності. В іншому випадку, застосовуються і зберігаються в результируючій структурі HDF5 значення за умовчуванням цих ODIM атрибутів. Також розроблені продукти максимальної інтенсивності і продукти відбиття на вершині хмари і на її нижній границі.

Перетворення в декартові координати. Дані в полярних координатах можуть бути відображені як декартовий продукт за допомогою наступної команди: `--cCreate`. Таким чином, для локально інсталюваної програми на персональному комп'ютері в ОДЕКУ (UNIX-платформа) Rack створює декартові зображення в чорно-білих кольорах для першого набору даних в кожному файлі (рис.2.2):

```
rack./INDIR/YYYYMMDDhhmm_NNN.hdf -cCreate \  
-o ./OUTDIR/outname_NNN_grey_Cartesian.png
```

де YYYY – рік, MM – місяць, DD – день, hh – години, mm – хвилини (UTC), NNN – аббревіатура назви місця/міста розташування радара (відповідно до табл. 2.9), outname – назва вихідного файлу зображення.

Наступна команда, на додаток до попередньої команди створює шкалу яскравості в RGB у відповідності до заданих значень в palette_color.txt (табл.2.17):

```
rack./INDIR/YYYYMMDDhhmm_NNN.hdf -palette palette_color.txt\
-o ./OUTDIR/outname_NNN_color_Cartesian.png
```

Результати відображення із застосуванням RGB кольорів наведено на рис. 2.3, рис. 2.4, рис. 2.6.

В разі необхідності, декартовий. Наприклад, декартовий cappi може бути отримано наступною командою:

```
rack volume.h5 --cappi 500m --cCreate -o cappi.h5
```

За умовчанням застосовується азимутальна еквідистантна проекція. Однак, проекція може бути змінена командою --cProj із залученням синтаксису PROJ.4.

Таблиця 2.17 – Граничні значення відбиття та їх відповідне позначення в палітрі кольорів RGB

Інтенсивність відбиття, dBZ	Частка червоного кольору	Частка зеленого кольору	Частка синього кольору
-32.0	0	0	0
-24.0	60	140	200
-16.0	10	155	225
комахи – -8.0	5	205	170
мряка – 0.0	140	230	20
слабкий дощ - 8.0	240	240	20
дощ - 16.0	255	205	20
помірний дощ - 24.0	255	150	50
інтенсивний дощ - 32.0	255	80	60
град – 40.0	250	120	255
60.0	255	255	255

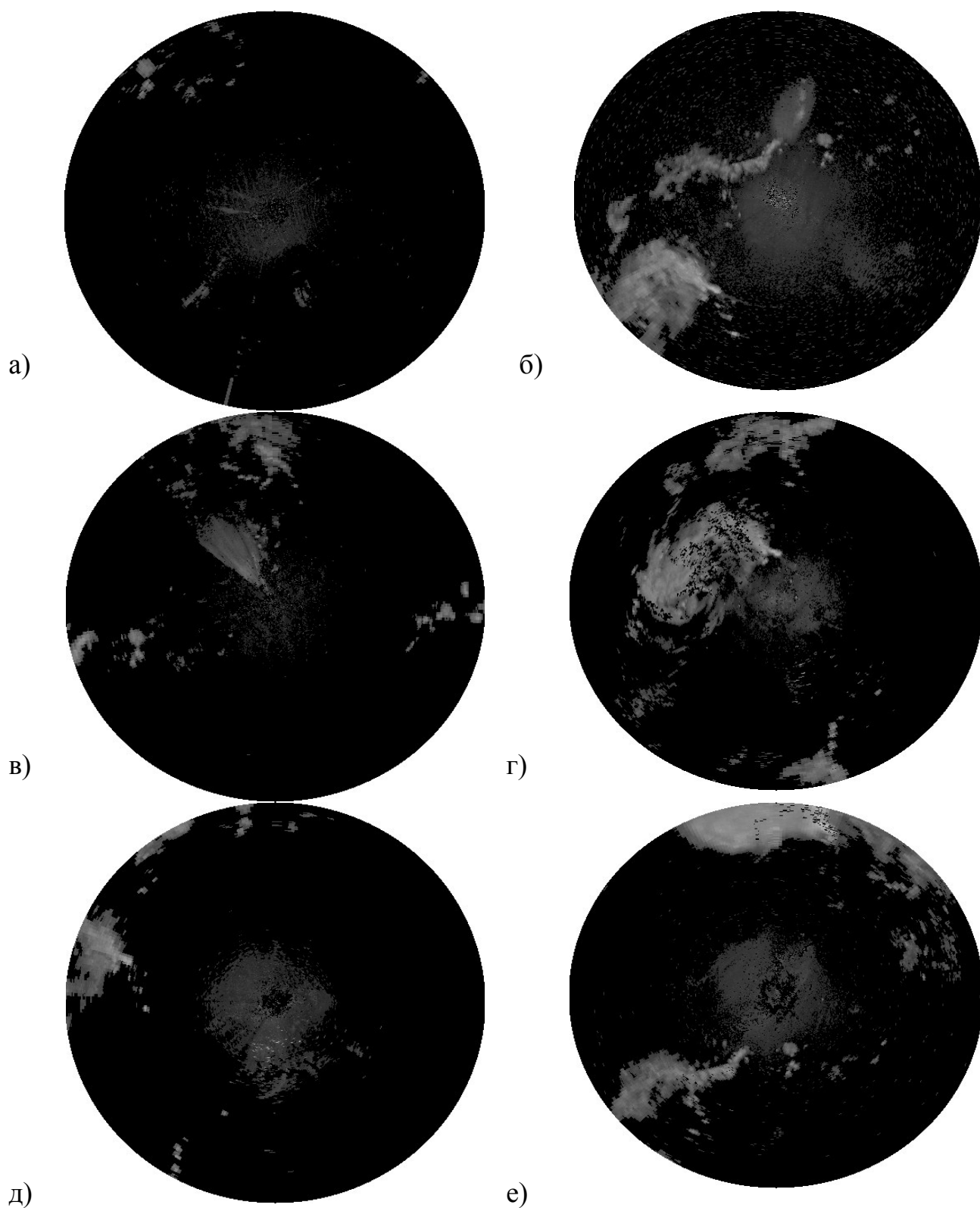


Рисунок 2.2 – Результати створення декартових зображень в чорно-білих кольорах для першого набору даних по кожному з 6 радарів (а – ANJ; б – ІКА; в - КУО; г - KOR; д - VAN; е - VIM) на момент часу 11.30 UTC 08 серпня 2010 року.

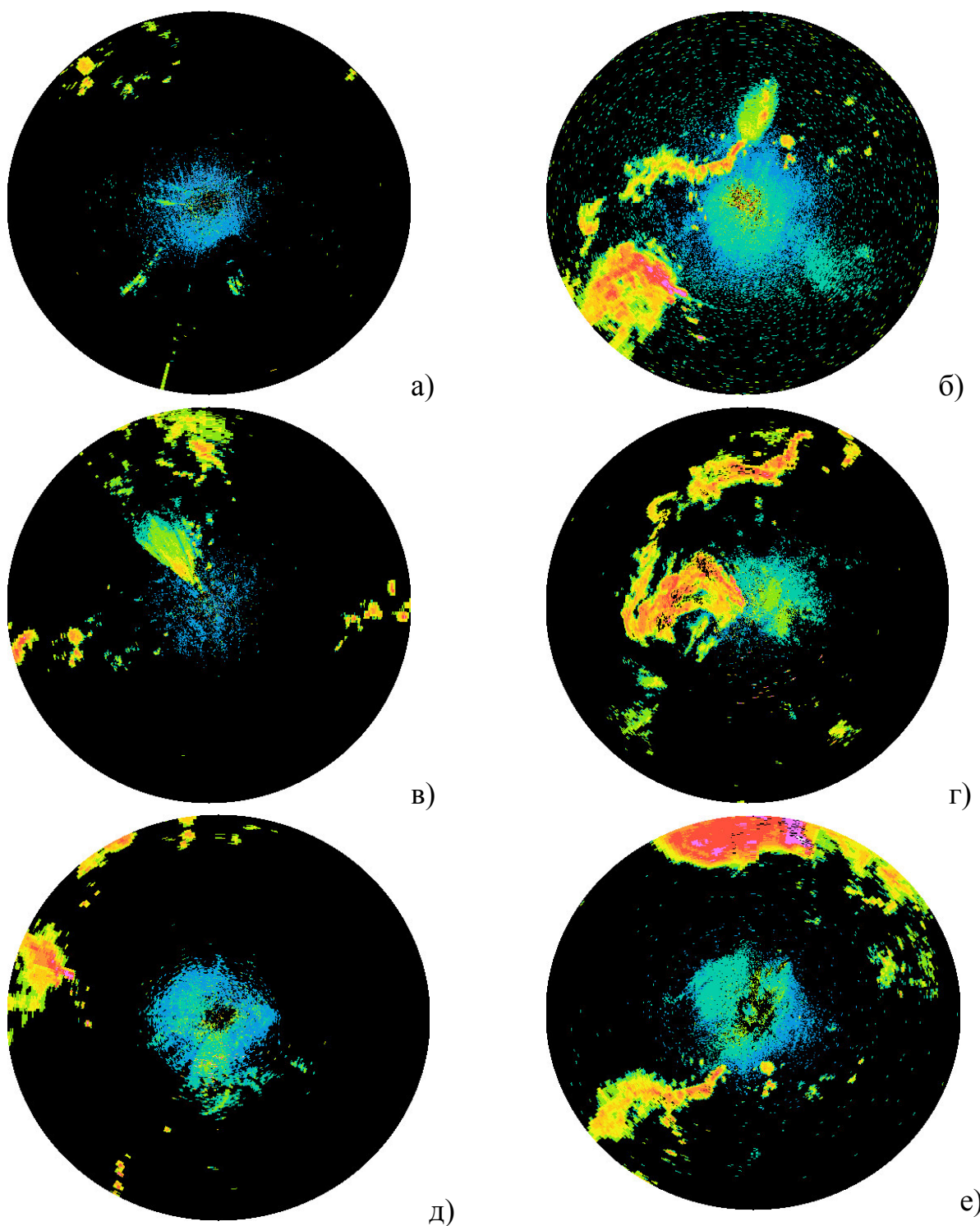


Рисунок 2.3 – Результати створення декартових зображень в RGB кольорах для першого набору даних по кожному з 6 радарів (а – ANJ; б – ІКА; в - KUO; г - KOR; д - VAN; е - VIM) на момент часу 11.30 UTC 08 серпня 2010 року.

Еволюція в часі (дискретність 15 хв.) розвитку атмосферних структур в декартових координатах на прикладі станції Когро (KOR) представлена на Рисунок 2.4.

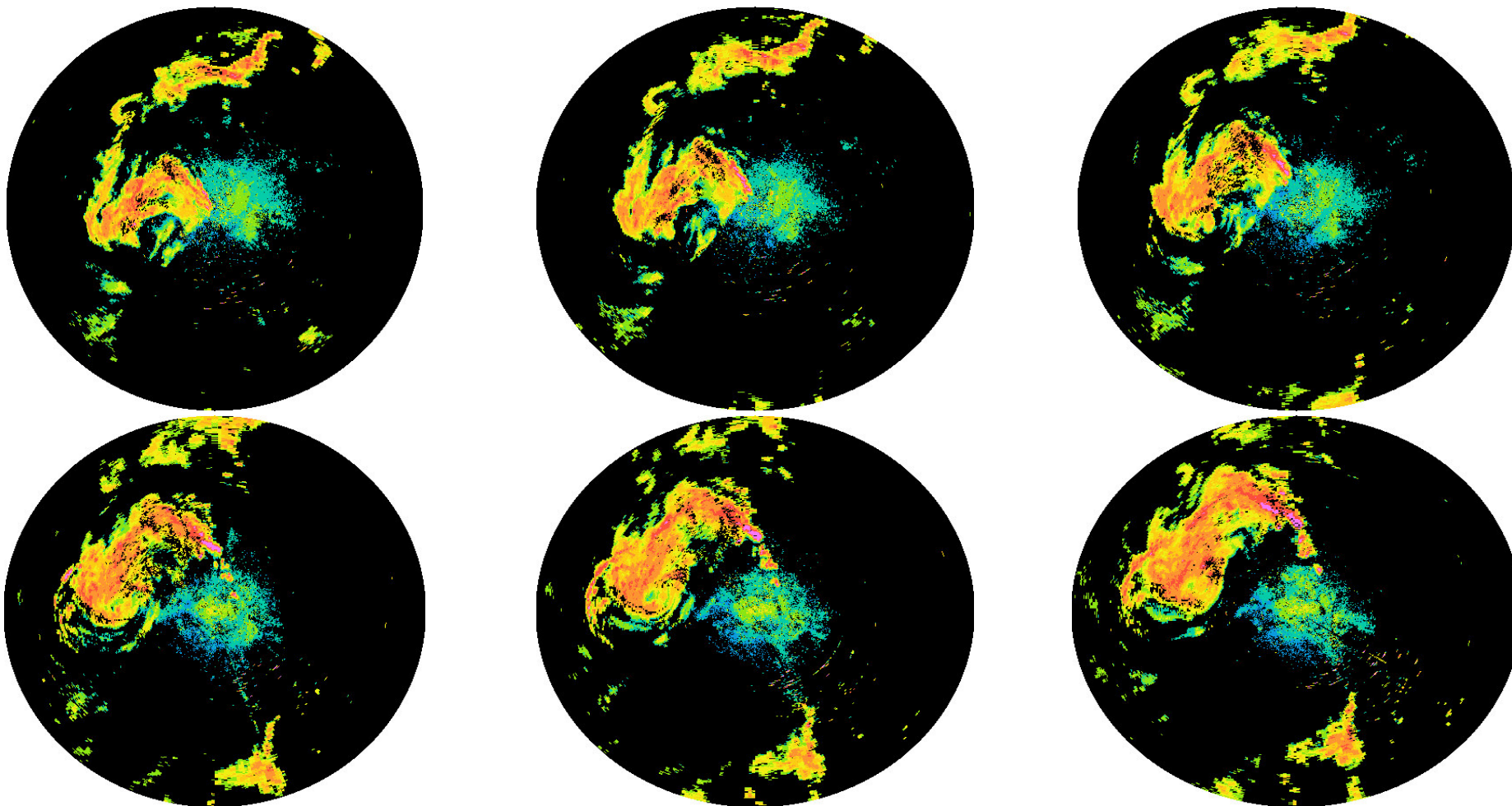


Рисунок 2.4 – Графічне зображення еволюція в часі (дискретність 15 хв.) розвитку атмосферних структур на станції Когро в декартових координатах в період 10.45-12.00 UTC 08 серпня 2010 року.

Результати в зображеннях Запис вихідних зображень в Rask простий: заміна розширення .h5 на .png в назві вихідного файлу приводить до того, що Rask зберігає дані як зображення. За умовчуванням даними для виводу являється перший набір даних в ієрархії hdf5. Наприклад, наступна команда створює полярні зображення в чорно-білих кольорах для першого набору даних в кожному файлі (рис.2.5):

```
rack./INDIR/YYYYMMDDhhmm_NNN.hdf-o
./OUTDIR/outname_NNN_grey_polar.png
```

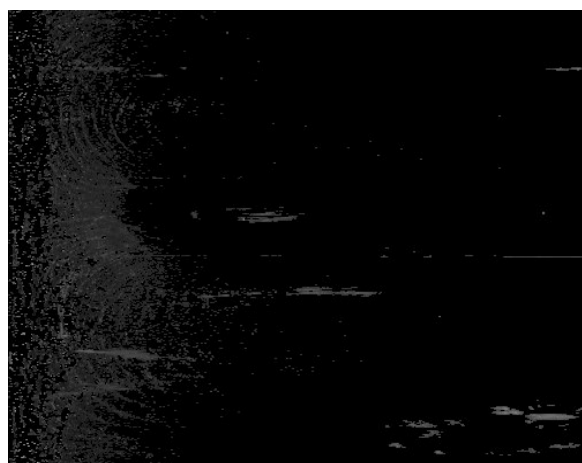
Наступна команда, на додаток до попередньої команди створює шкалу яскравості в RGB у відповідності до заданих значень в palette_color.txt (табл.2.17):

```
rack./INDIR/YYYYMMDDhhmm_NNN.hdf -palette palette_color.txt\
-o ./OUTDIR/outname_NNN_color_polar.png
```

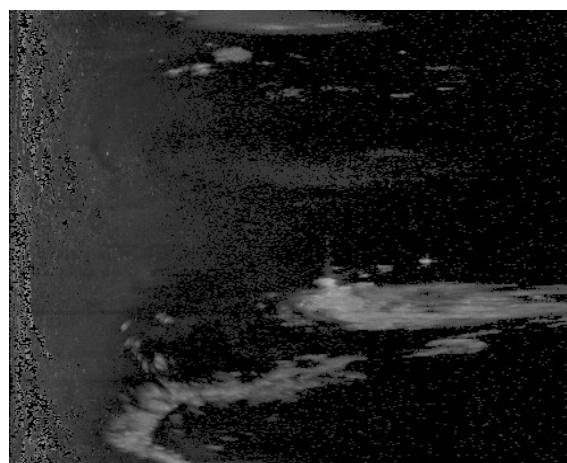
Результати відображення полярного зображення із застосуванням RGB кольорів наведено на рис. 2.6.

2.3.5 Композиційне зображення

В dBZ комбінованих продуктах існує декілька основних складових компонування: максимум, середнє, максимальна якість і зважена якість, включаючи найближчий радар. На сьогодні реалізовано традиційне ретроспективне відновлення даних але прогностичне відновлення даних знаходиться ще в розробці. Традиційне перетворення є грубішим, але швидшим, а отже, більш зручним в разі потреби. Всередині, комбінування використовує інтегральний масив, з якого вибираються кінцеві інтенсивності і якості для остаточного продукту. Метод, який застосовується, також забезпечує значення радарів, що вимірювались і стандартне відхилення для кожного пікселя.



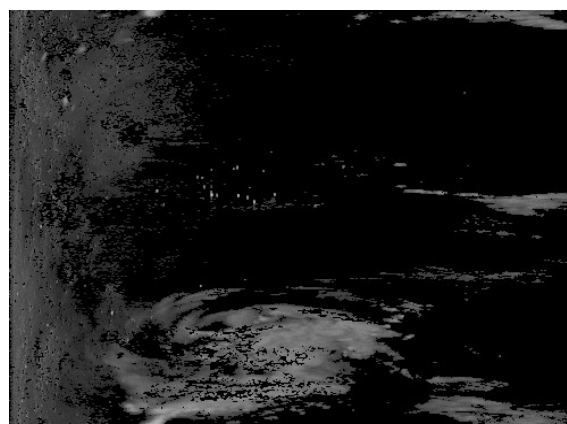
а)



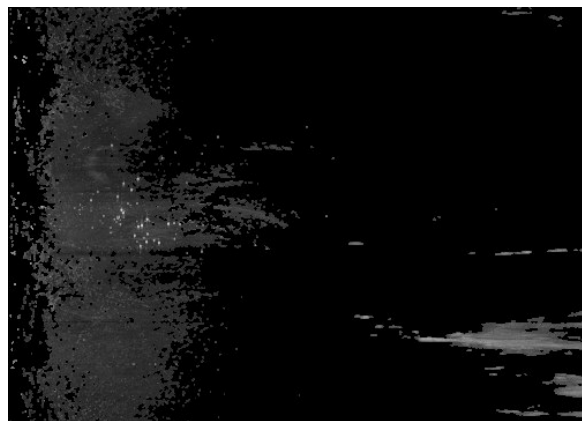
б)



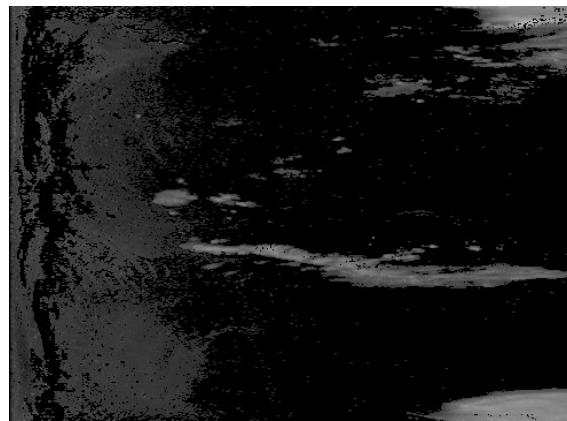
в)



г)

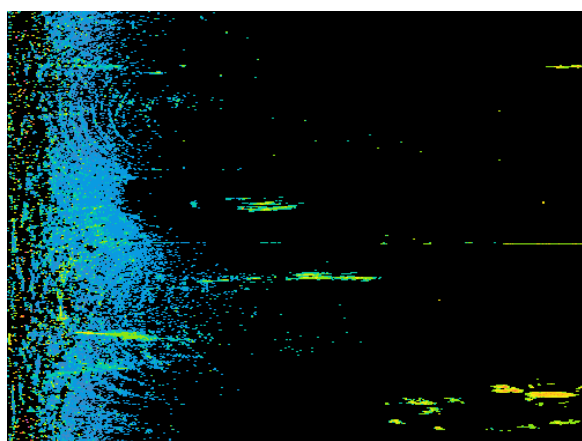


д)

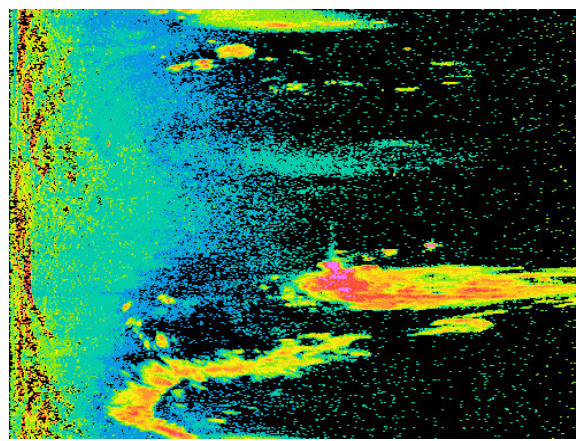


е)

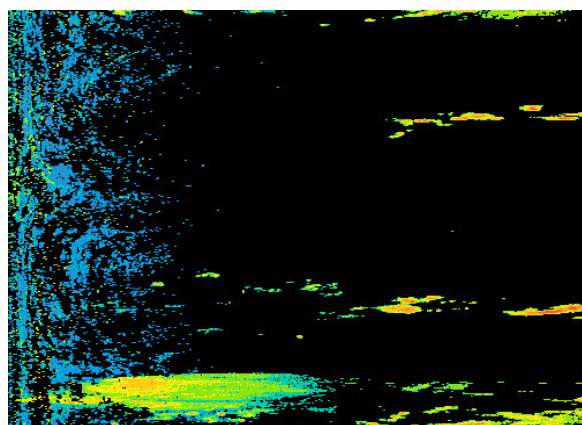
Рисунок 2.5 – Результати створення полярних зображень в чорно-білих кольорах для першого набору даних по кожному з 6 радарів (а – ANJ; б – IKA; в - KUO; г - KOR; д - VAN; е - VIM) на момент часу 11.30 UTC 08 серпня 2010 року.



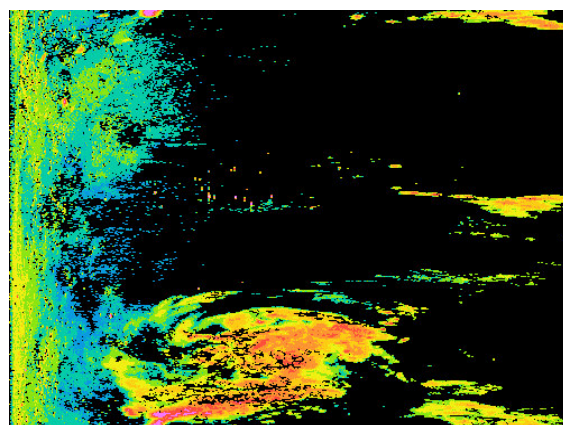
а)



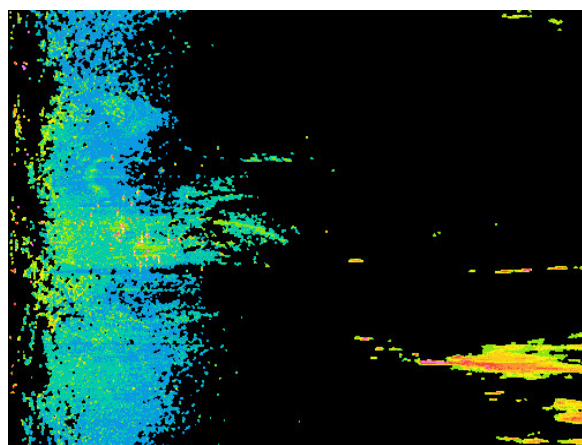
б)



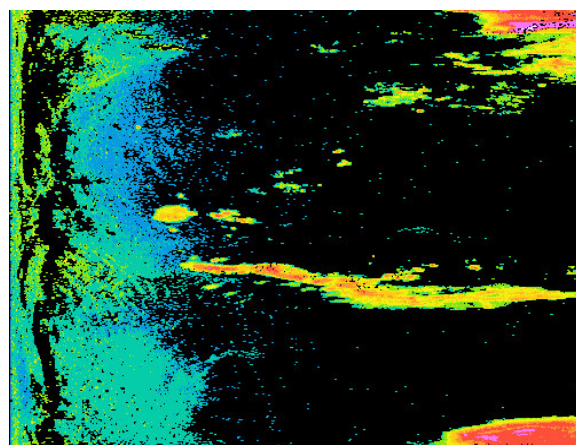
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.6 – Результати створення полярних зображень в RGB кольорах для першого набору даних по кожному з 6 радарів (а – ANJ; б – IKA; в - KUO; г - KOR; д - VAN; е - VIM) на момент часу 11.30 UTC 08 серпня 2010 року.

По суті, команда комбінування складається з трьох частин: ініціалізація (наприклад, '+init=epsg:4326'), додавання даних радара, добування результату. На рис. 2.7 представлені результати обробки (комбінування) даних 6-ти радарів в декартових координатах в RGB кольорах наступною командою:

```
rack --cProj '+init=epsg:4326' --cBBox 17,57,33,66 --cSize
600,800 \
--cMethod AVG --verbose 5 \
./INDIR/201008081130_ANJ.hdf --cCreate --cAddWeighted 1.0 \
./INDIR/201008081130_IKA.hdf --cCreate --cAddWeighted 1.0 \
./INDIR/201008081130_KOR.hdf --cCreate --cAddWeighted 1.0 \
./INDIR/201008081130_KUO.hdf --cCreate --cAddWeighted 1.0 \
./INDIR/201008081130_VAN.hdf --cCreate --cAddWeighted 1.0 \
./INDIR/201008081130_VIM.hdf --cCreate --cAddWeighted 1.0 \
--cExtract=dwsC --palette ./palette_color.txt \
-o ./OUTDIR/si_composite.png
```

Більш розширена підтримка для алгебри контролю якості продемонстровано раніше в [13] і розподілене, безперервне «живе» створення композиційного зображення буде реалізовано наступних версіях Rack.

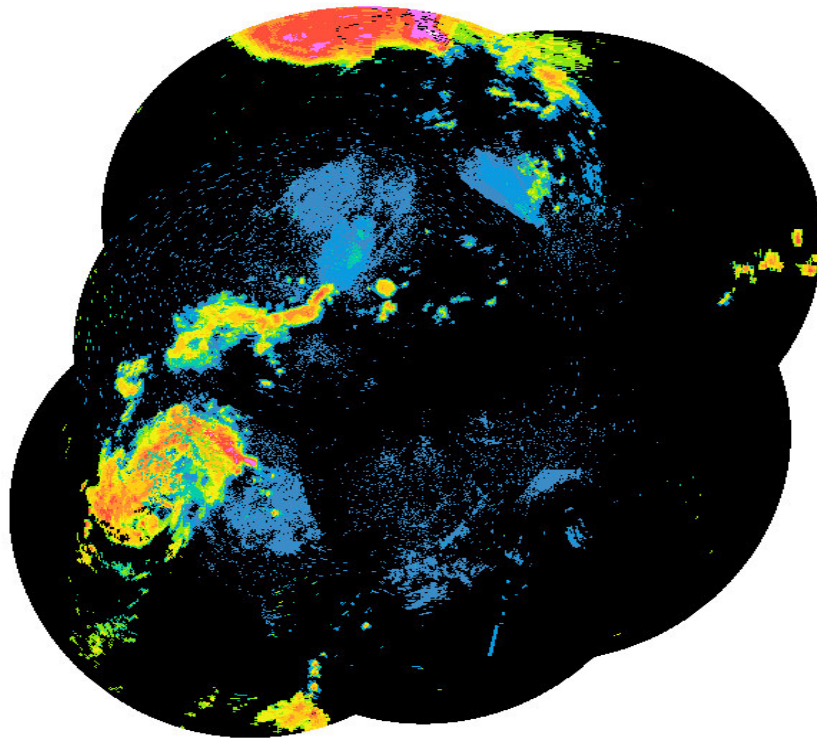


Рисунок 2.7 – Композиційне зображення даних 6-ти радарів в декартових координатах в RGB кольорах для першого набору даних по кожному з 6 радарів на момент часу 11.30 UTC 08 серпня 2010 року.

2.3.6 Інші функціональні можливості Rack

За допомогою Rack можна вільно перетворювати ODIM HDF5 на нові, залучаючи різні типи зберігання (unsigned, char, float, double,...) так само, як значення «gain», «offset», «undetected» і «nodata». В наступних версіях також може підтримуватись зчитування і запис BUFR-файлів.

В процесах оперативної обробки даних нерідко виникає необхідність створювати також вихідну текстову інформацію щодо обробки радарних даних і продуктів. Такі вихідні дані можуть бути запротокольовані в журналі, у вигляді www-сторінок (HTML) для відстеження процесу, в текстових файлах метаданих (txt), графічних кінцевих продуктах (SVG) або файлах географічних визначень (KML). Такий текстовий результат може бути створений за допомогою наступних команд: `--format`, `--formatFile`, `--formatOut`.

Іноді виникає необхідність дізнатися чи знаходиться географічна область в зоні дії радара. Наприклад, при створенні композиційного зображення необхідно мати справу (розпакувати, перетворити, передати, прочитати) лише з тими радарами, які співпадають з даною областю. Це можна перевірити командою `--cBboxTest`.

В програмуванні було застосовано декілька спеціалізованих методів в гонитві за доброю якістю і швидкістю обробки даних. Раніше вже вказувалося використання полярної системи координат у визначенні аномалій і створенні основних продуктів. Згладжування та інші віконні операції застосовують вікна, що пересуваються, які обновляються з приростом. Послідовні однопиксельні операції застосовують прямі ітерації в пам'яті, а не двомірні цикли. На границях масивів зображень оброблювачі координат гарантують, що координати належним чином відновлені або обмежені. В операціях орієнтованих на зафарбовування використовуються напіврекурсивні методи, поєднуючи нерекурсивний горизонтальний обхід з вертикальним рекурсивним обходом.

2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕЗОМАСШТАБНИХ АТМОСФЕРНИХ ПРОЦЕСІВ

Модель HARMONIE (Hirlam Aladin Regional/Meso-scale Operational NWP In Europe) розроблялась у співробітництві з Метео-Франс і консорціумом ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) і тому складові частини її програмного коду будувались на компонентах моделей від початку розроблених в цих двох асоціаціях. Типовий ступінь деталізації сітки моделі по-горизонталі складає 2.5 км і менше; у якості моделі прогнозу і системи аналізу використовують схеми, що закладені в модель AROME (Application of Research to Operations at Mesoscale) розроблених Метео-Франс.

Також, модель дозволяє застосовувати більш грубу деталізацію сітки при використанні фізичної параметризації ALARO (Aire Limitée Adaption Dynamique Development International) для ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

Рівняння гідродинаміки і дискретизація в моделі HARMONIE. Модель HARMONIE є динамічною спектральною моделлю в основу якої покладена напівнеявна двомірна напівлагранжева дискретизація для рівнянь з вертикальною гібридною сіткою. В моделі передбачено також використання гідродинамічної системи рівнянь Ейлера, але її рідко застосовують.

Горизонтальна сітка моделі є відображенням проекції сферичної системи координат.

Параметризація. Є необхідною процедурою для включення в схему моделі фізичних процесів підсіткового масштабу. Таблиця 3.1 дає коротку характеристику схем параметризації, що використовуються в моделі HARMONIE.

Таблиця 3.1 Фізичні процеси підсіткового масштабу, що підлягають параметризації в моделі HARMONIE

Назва процесу	Схеми параметризації
Коротко- і довгохвильові потоки радіації	Попередня опція: схема Моркретта (<i>Morcrette</i>) За вибором: а) радіаційний алгоритм ACRANEВ (ALARO) б) схема Сааріярви (<i>Saavijarvi</i>)

Продовження табл. 3.1

Назва процесу	Схеми параметризації
Мілка конвекція	Попередня опція: комбінована вихрова дифузійна схема потоку маси для мілкої конвекції EDMF За вибором: вихрова дифузійна схема потоку маси для мілкої конвекції EDKF
Глибока конвекція	Схема конвекційного потоку маси з замкнутою конвергенцією потоку вологи
Мікрофізика	Пакет ICE3 описує мікрофізику теплих хмар, атмосферного льоду і конденсації підсіткового масштабу
Турбулентність	Одномірна схема (1D) кінетичної енергії турбулентності Куксарта-Бужо (<i>Cuxart-Bougeault</i>).

Підстильна поверхня. Схема підстильної поверхні [SURFEX](#) (Surface Externalisée, франц.) включає декілька окремих моделей, що розглядають фізику: поверхні ґрунту, моря, внутрішніх водойм і урбанізованого середовища. Фізіографія поверхонь описується за допомогою даних ECOCLIMAP, що мають ступень деталізації близько 1 км.

До розгляду фізики морської поверхні включені такі процеси, як потоки імпульсу (кількості руху), тепла і вологи між океаном і атмосферою, процеси морського льоду.

Початкові та граничні умови. В HARMONIE початкові і граничні умови, як правило, ті що використовують в моделях більшого масштабу – в HIRLAM чи в ALADIN. На верхню границю накладається умова відсутності вертикальних рухів, тобто вертикальна складова швидкості дорівнює нулю. При визначенні нижніх граничних умов використовують розрахунки потоків імпульсу, тепла і вологи отримані з SURFEX.

Напівлагранжева схема. В напівлагранжевих рівняннях моделі HARMONIE залежність змінної (X) від часу виражається як:

$$\frac{dX}{dt} = \dot{X}, \quad (3.1)$$

де $\dot{X}$ - вклад масових та поверхневих сил.

В двомірній напівлагранжевій схемі $X(t + \Delta t)$ обчислюється у кожному вузлі сітки, якщо відоме значення $X(t)$ в точці відліку (не обов'язково вузловій точці).

Напівлагранжева схема передбачає застосування такого часового кроку, який відповідав би умовам стійкості згідно критерію Ліпшица:

$$\left| D + \frac{\partial \dot{\eta}}{\partial \eta} \right| \frac{\Delta t}{2} < 1 \quad (3.2)$$

Горизонтальна координатна система. В гідродинамічних рівняннях моделі циркуляції атмосфери сила ваги є домінуючою і, отже, грає суттєву роль в обраній системі координат. У нормальній сферичній системі координат (λ, φ, r) , де φ - широта, λ - довгота і r - радіальна відстань, проекції сили ваги, що визначаються членами гідродинамічних рівнянь, спрямовані уздовж сферичних поверхонь. Якщо в якості координатної системи використовуються геопотенціальні поверхні, то сила ваги спрямовується точно перпендикулярно поверхні $r = \text{const}$. Тому, як правило, в гідродинамічних рівняннях моделі циркуляції атмосфери віддається перевага використанню координатної системи геопотенціальних поверхонь.

Модель HARMONIE передбачає використання сферичної системи координат, а тому відповідні метричні коефіцієнти мають вигляд:

$$h_\lambda = r \cos \varphi, h_\varphi = r, h_r = 1 \quad (3.3)$$

Для такої системи координат прискорення і сили, що його викликають будуть виражатись через відомі рівняння збереження кількості руху і моменту імпульсу так, як це описано далі.

Нехай компоненти швидкості вітру V пов'язані з координатами у такий спосіб: u - у напрямку зростання λ (напрямок на „схід”), v - у напрямку зростання φ (напрямок на „північ”), w – радіальний напрямок, від центра земної кулі. Тоді, отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} u = h_\lambda \frac{d\lambda}{dt} = r \cos \varphi \frac{d\lambda}{dt} \\ v = h_\varphi \frac{d\varphi}{dt} = r \frac{d\varphi}{dt} \\ w = h_r \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dt} \end{cases}, \quad (3.4)$$

де u, v, w – східна, північна і радіальна складові швидкості вітру, відповідно.

Радіальна відстань $r = a + z$, де a радіус Землі і z – вертикальна відстань над поверхнею Землі.

Компоненти рівняння, що виражає закон збереження кількості руху, будуть мати вигляд:

$$\frac{du}{dt} = 2\Omega v \sin \theta - 2\Omega w \cos \varphi + \frac{uv \tan \varphi}{r} - \frac{uw}{r} - \frac{1}{r \rho \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_\lambda \quad (3.5)$$

$$\frac{dv}{dt} = -2\Omega u \sin \varphi - \frac{u^2 \tan \varphi}{r} - \frac{vw}{r} - \frac{1}{r \rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + F_\varphi \quad (3.6)$$

$$\frac{dw}{dt} = 2\Omega u \cos \varphi + \frac{u^2 + v^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - g + F_z \quad (3.7)$$

Якщо узагальнити вид рівнянь (3.5-3.7), то отримаємо наступне співвідношення:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} V^2 \right) = V \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p + F - gk \right), \quad (3.8)$$

де F – сила в'язкого тертя, g – прискорення вільного падіння, ∇p – сила баричного градієнту і $\frac{1}{\rho}$ – питомий об'єм.

Таким чином, швидкість обміну кінетичною енергією прямо пропорційна силам тиску і тяжіння.

Рівняння збереження моменту імпульсу матиме вигляд:

$$\frac{d}{dt} [(u + \Omega r \cos \varphi) r \cos \varphi] = r \cos \left(-\frac{1}{r \rho \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_\lambda \right) \quad (3.9)$$

Вертикальна система координат. Застосування в моделі гібридної вертикальної системи координат дозволяє детальніше описати особливості фактичного, вертикального розподілення метеорологічних величин і зменшує похибки апроксимації градієнтів тиску.

Гібридна вертикальна координата η – є монотонною функцією тиску $\eta = \eta(p, p_H)$, має властивості σ -системи координат в тропосфері і p -системи координат у стратосфері. Аракава і Лемб запропонували розраховувати η -координату наступним чином:

$$\eta_N = \frac{(p_N - p_I)}{\pi} \quad (3.10)$$

$$\text{де } \pi = \begin{cases} p_I - p_T & \text{за умови } p_T \leq p \leq p_I \\ p_* - p_I & \text{за умови } p_I \leq p \leq p_* \end{cases} \quad (3.11)$$

$$p_* = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma}, \quad (3.12)$$

де p_I - тиск у граничному шарі атмосфери (біля тропопаузи),

p_T - тиск на верхньому атмосферному рівні моделі,

p_N - тиск на рівні N , Φ - геопотенціал ($\Phi = g z$),

σ – вертикальна координата, що дорівнює $\sigma = p/p_H$, p_H – тиск на висоті H від земної поверхні.

Характерною рисою σ -системи є збіжність нижньої координатної поверхні з топографічною поверхнею, тобто, в цьому випадку нижня координата співпадає з орографічною поверхнею, а не з рівнем моря і відповідно нерівності поверхні в σ -системі не перетинаються координатними поверхнями. Нижні граничні умови, таким чином, тісно пов'язані з впливом, що здійснює орографія на розподіл метеорологічних величин.

В стандартній σ -системі $p_I = p_T = 0$. В гібридній системі граничні умови відповідають $\eta = \pm 1$.

Альтернативним до системи Аракави-Лемба варіантом форми гібридної сітки є визначення її координат $\eta_{N+1/2}$ між заданими від початку рівнями. Тоді значення тиску між двома сусідніми рівнями буде розраховуватися як

$$p_{N+1/2} = p_{I+1/2} \frac{\eta_{N+1/2}}{\eta_{I+1/2}} \quad \text{за умови} \quad \eta_{N+1/2} \leq \eta_{I+1/2} \quad (3.13)$$

$$p_{N+1/2} = p_{I+1/2} \frac{(\eta_{N+1/2} - \eta_{I+1/2})(p_* - p_{I+1/2})}{(I - \eta_{I+1/2})}$$

Необхідність розрахунку $p_{N+1/2}$ виникає при дискретизації рівнянь гідродинаміки в кінцево-різницевиx схемах, що включають відношення $\partial p / \partial \eta$ і тоді Δp_N розраховують як $\Delta p_N = p_{N+1/2} - p_{N-1/2}$.

На рис.3.1 представлена просторова сітка моделі, в якій вертикальна координата розрахована за гібридною схемою, а горизонтальна сітка являє сферичну систему координат.

Шукані змінні у вузлах просторової сітки розраховуються за сферичними гармоніками, а їх рівняння представляються у вигляді скінченного ряду:

$$X(\lambda, \varphi, \eta, t) = \sum_{m=-M}^{+M} \sum_{n=|m|}^N X_n^m(\eta, t) p_n^m(\sin \varphi) e^{im\lambda},$$

де X - одна із змінних, що підлягають визначенню, p_n^m - приєднаний поліном Лежандра.

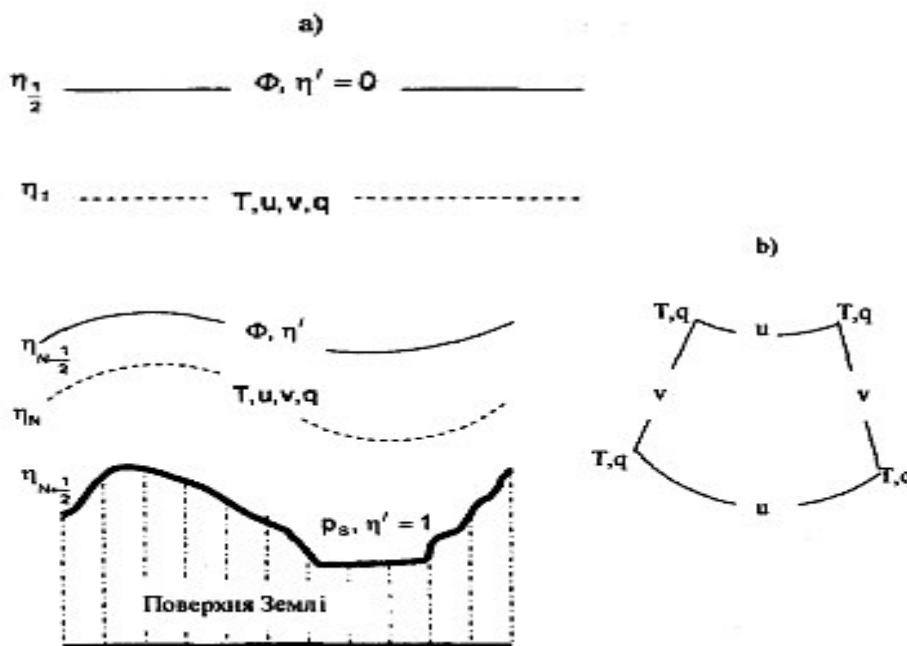


Рисунок 3.1 – Просторова сітка моделі: а) вертикальна структура сітки; б) позиції метеорологічних величин в межах клітинок горизонтальної сітки.

Параметризація процесів підсіткового масштабу. До переліку врахованих в моделі фізичних процесів підсіткового масштабу входять вертикальна та горизонтальна в'язкість (дифузія), суха і волога конвекція, великомасштабна конденсація, хмарність та радіація, тепло- та вологообмін між підстильною поверхнею і атмосферою.

Параметризація турбулентних потоків у приземному шарі ґрунтується на теорії подібності Моніна-Обухова, згідно якої профілі швидкості вітру, температури і вологості залежать лише від висоти z , параметра $\beta = g/\theta$ та масштабів для вимірювання швидкості v^* , температури θ^* і вологості q^* і виражаються через співвідношення:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}, \quad \theta^* = -\frac{H}{\rho c_p v^*}, \quad q^* = -\frac{Q}{\rho L v^*} \quad (3.14)$$

З величин v^* , θ^* , q^* та β складається один безрозмірний параметр $\zeta = \frac{z\theta^*}{(v^*)^2}$, отже, вертикальні профілі вітру, температури і вологості представляються як функції лише ζ . Для визначення цих функцій використовуються емпіричні дані. У підсумку виходять наступні розрахункові формули:

$$\begin{aligned} (v^*)^2 &= V_h^2 f_1\left(\frac{h}{z_0}, R_i\right), \\ v^* \theta^* &= V_h (\theta_h - \theta_0) f_2\left(\frac{h}{z_0}, R_i\right), \\ v^* q^* &= V_h (q_h - q_0) f_2\left(\frac{h}{z_0}, R_i\right), \end{aligned} \quad (3.15)$$

де z_0 - параметр шорсткості; h - висота приземного шару, яка дорівнює висоті найнижчого рівня моделі; R_i - число Річардсона, що визначається формулою

$$R_i = \beta \frac{h(\theta_h - \theta_0)}{V_h^2}; \quad (3.16)$$

індекси h та 0 позначають величини, що відносяться до рівнів h та z_0 . Функції f_1 та f_2 за умови нейтральної стратифікації задаються у вигляді:

$$f_1 = 1 - 10R_i \text{ та } f_2 = 1 - 15R_i,$$

а для умов сталої та несталої стратифікації описуються складнішими виразами.

Вище приземного шару турбулентні потоки обчислюються за допомогою коефіцієнта „турбулентної в'язкості”, який залежить від масштабу турбулентності l . У відповідності до напівемпіричної теорії Прандтля коефіцієнт турбулентної в'язкості k для стратифікованого середовища залежить від вертикальних градієнтів швидкості потоку та температури:

$$k = l^2 f \left(\left| \frac{\partial V}{\partial z} \right|, \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad (3.17)$$

$$\text{де } l = \frac{\chi z}{(1 + \chi z)} - \text{довжина шляху зсуву Прандтля; } f = (f_1, f_2) -$$

задана функція; $\lambda = 160\text{м}$; $\chi = 0,4$.

Турбулентні потоки імпульсу τ , тепла H та вологи Q виражаються наступним чином:

$$\tau = \rho k \frac{\partial V}{\partial z}, \quad H = -\rho k \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad Q = \rho k \frac{\partial q}{\partial z} \quad (3.18)$$

Горизонтальна “турбулентна в'язкість” забезпечує згладжування полів метеорологічних величин та видалення обчислювальних шумів з чисельного розв'язання.

Сухе конвективне пристосування забезпечується турбулентним перемішуванням, шляхом розрахунку потоків імпульсу, тепла та вологи. Волога конвекція параметризується за відомою схемою Куо з деякою модифікацією. Вона полягає в тому, що волога конвекція враховується скрізь, де має місце конвергенція вологи, а не лише у приземному граничному шарі атмосфери.

В моделі приймається, що конденсація вологи відбувається при відносній вологості $\bar{q} = \frac{q}{q_n} \geq 1$. В такому разі конденсаційні зміни температури ΔT та вологості Δq пов'язані наступними співвідношеннями:

$$\Delta T = \frac{L}{c_p} \Delta q, \quad \Delta q = q_H(T + \Delta T) - q(T), \quad (3.19)$$

де T , q та q_H - прогностичні значення температури, масової долі вологи без урахування конденсації та масової долі насиченої водяної пари.

Кількість вологи, що сконденсувала Δq , обчислюється за формулою

$$\Delta q = \frac{L}{c_p} \frac{q - q_H(T)}{1 + \frac{L^2 q_H(T)}{c_p R_H T^2}}, \quad (3.20)$$

а кількість опадів, що випали, - за формулою

$$W = \frac{1}{g_0} \int_0^\eta (\Delta q - \Delta e) p_s d\sigma. \quad (3.21)$$

У останній формулі Δe - випаровування опадів, яке визначається з виразу:

$$\Delta e = k_1 [q_H(T) - q] (k_2 \sqrt{\eta})^{k_3}, \quad (3.22)$$

де k_1, k_2, k_3 - константи.

При обчисленні радіаційних припливів тепла розраховуються потоки короткохвильової та довгохвильової радіації. Радіаційні процеси параметризуються з виділенням тих ефектів, які найсильніше впливають на прогноз погоди малої завчасності. Хмарно-аерозольні ефекти вважаються більш значними порівняно з поглинанням радіації газами. Для урахування добового ходу радіаційні потоки обчислюються в моделі кожні три- чотири години.

Потоки сонячної короткохвильової радіації обчислюються для двох спектральних інтервалів, а потоки земної довгохвильової радіації - для трьох інтервалів. У кожному з інтервалів спектра виділяються додатково декілька

під інтервалів, в яких відбувається розрахунок потоків з використанням відповідної функції пропускання. При обчисленні радіаційних потоків, крім астрономічних параметрів, залучається інформація про розподілення температури, вологи, вологи рідкої фази, кількості хмар, аерозолів, озону, вуглекислого газу і альbedo підстильної поверхні. Температура і вологість безпосередньо прогножуються в моделі, а інші перераховані параметри задаються за кліматичними даними.

Для обчислення потоків тепла та вологи розраховуються температура і вологість на підстильній поверхні. Температура водної поверхні задається на основі даних спостережень і *вважається* постійною на *періоді* прогнозу. Ця умова приймається і для відкритої води, і для водних поверхонь, що покриті кригою.

При обчисленні потоків вологи масова доля вологи біля водної поверхні приймається такою, що дорівнює значенню, яке відповідає стану насичення при температурі водної поверхні.

Модель HARMONIE 38h1 є адаптацією моделі HIRLAM до вимог IFS/ARPEGE CY38T1, яка реалізована в серпні 2012 і потім модернізована у наступних версіях 1-3.

У режимі «За замовчуванням» HARMONIE-38h1 має наступні властивості:

1. Це мезомасштабна система чисельного прогнозу погоди, що явно розв'язує конвективні атмосферних процеси з AROME і негідростатичною динамікою на модельній сітці з 2.5 кілометровим просторовим розділенням по горизонталі й 65 вертикальними рівнями.
2. Опис процесів на підстильній поверхні виконується за допомогою моделі SURFEX
3. Тривимірна варіаційна асиміляція даних у верхній атмосфері з 3-годинними циклами для засвоєння стандартних спостережень і AMSUA AMSUB/MHS супутникової інформації.
4. Аналіз на підстильній поверхні заснований на оптимальній інтерполяції з використанням модуля CANARI для просторових атмосферних змінних і SODA для змінних на підстильній поверхні.
5. Відповідний набір утиліт для попередньої обробки спостережень, модельної діагностики, моніторингу і верифікації.
6. Повний набір допоміжних утиліт для управління роботою і контролем взаємодії окремих блоків моделі, а також графічний інтерфейс.

Головні зміни в HARMONIE-38h1

Головні зміни версії циклу 38h1.1 у порівнянні з попередніми версіями моделі наступні.

Фізика атмосферних процесів:

- SURFEX 7.2;
- Використання ECOCLIMAP 2.2;
- Вдосконалена статистична схема хмарності;
- Використання різних розмірів хмарних крапельок залежно від підстильної поверхні (суша/море/місто);
- Зміни в комплексній обробці хмарних змінних;
- Вдосконалення у фізичному описі ALARO.

Динаміка процесів:

- Опціонане застосування граничних умов у спектральному просторі.

Асиміляція даних:

- Тригодинна циклічність;
- RTTOV V10;
- Асиміляція ATOVS за замовчуванням;
- Додана підтримка для OPLACE структури даних спостережень;
- Модернізація обробки даних у підпрограмах: RADAR, GPS і Varbc, ATOVS і AMV.

Технічні вдосконалення:

- Вивід результатів модуля SURFEX у файлах *fa*-формату для поліпшення масштабованості;
- Виклик підпрограми SODA усередині підпрограми CANARI;
- Оптимізація ІО-Сервера для покращення масштабованості;
- Доступність коефіцієнтів файлу RTTOV для інших блоків моделі;
- Різні вдосконалення у візуалізації результатів.

Верифікація результатів:

- Представлені нові способи оцінювання якості результатів;
- Додаткова верифікація мінімальних і максимальних значень температури, видимості й опадів з різними періодами акумуляції;
- Можливість поділу результатів при різних датах ініціалізації та тривалості прогнозу на один фізичний момент часу;
- Діагностика і постпроцесінг;
- Повністю інтегрований вбудований постпроцесінг;
- Розширений список змінних постпроцесінгу і зміни в таблиці GRIB1.

Harmoneps -

- Кілька технічних модифікацій для більш ефективного представлення чисельної реалізації коду.

Зміни HARMONIE-38h1.1 у порівнянні з HARMONIE -38h1.2

Спостереження і асиміляція даних:

- Автоматичне ретроспективне оцінювання помилки короткострокового прогнозу;
- Модернізація керування GNSS + установка списку VARBC;
- Вбудований блок видалення перешкод радарів;
- Відновлення для нового формату BUFR;
- Додане розпізнавання суднових даних ECMWF BUFR;
- Новий файл вагових коефіцієнтів для супутників Meteosat 10, Sevir;
- Для LSMIXBC, використання даних HOST (ECMWF) на масштабах більш, ніж ~100 км;
- Корекція даних про температуру поверхні моря під льодом в модулі CANARI;
- Коректування профілів вологості шляхом використання даних MSG;
- Файли супутникових спостережень у форматі BUFR, декодовані в Bator і оброблені в накопичувачах;
- Замість модуля ATOVS, для обробки предикторів використовується модуль VARBC;
- Внесені виправлення для обробки даних у модулях RADAR, GPS і Varbc, ATOVS і AMV;
- Модуль збурювання спостережень;
- Попередня обробка в модулі GNSS.

Фізика атмосфери:

- Використання змішаних фаз хмарності та насичення біля поверхні води;
- Використовуються різні розміри хмарних крапель залежно від хмарності над сушею/морем/містом;
- Виправлення для одержання прямого/розсіяного короткохвильового випромінювання за радіаційним даними ECMWF;
- Виправлення короткохвильових потоків радіації. Додаткові оцінки їх напрямку;
- Включення впливу сніжного покриву і крижаної кірки на

радіацію;

- Зміна вагових коефіцієнтів між сушею/морем для діагностики температури на висоті 2 м;
- Удосконалення ініціалізації для визначення початкового стану підстильної поверхні;
- Зміна інтерфейсу ALARO0 для підстильної поверхні.

EPS

- Оцінка погрешностей спостережень на поверхні та у верхніх шарах атмосфери.

Покращення чисельного розв'язку:

- Спектральна обробка граничних умов;
- Зменшення ефекту просочування для завихреності;
- Застосування умов релаксації Девіса для верхніх границь і відключення спектрального пристосування.

Інші основні модифікації:

- Установка цифрового фільтра для модуля ALARO;
- Зміна уяви даних на поверхні (під впливом змін у глибоких шарах);
- Установлення погодженості між атмосферою й орографією підстильної поверхні;
- Зміна зовнішнього режиму змінних бази даних спостережень, що визначають збої в модулі Canari.

Постпроцесінг:

- Модифікація діагностики видимості;
- Опис підтримки декількох вихідних потоків результатів;
- Новий блок моніторингу спостережень;
- Нова версія верифікації полів;

MUSC:

- Перехід формату MUSC в ASCII, для спрощення управління профілями.

Технічний:

- Платформа CCA в режимі « за замовчуванням »;
- msms сервер, що здійснює зв'язок з головним комп'ютером через інтернетпорти замість файлів;
- Можливість виконання паралельних завдань Makegrib і Fldextr.

Асиміляція даних підстильної поверхні:

- Зміни в аналізі сніжного покриву;
- Зміна уяви даних на ґрунті (під впливом змін у глибоких шарах).

Діагностика:

- Введення температури для морської підстильної поверхні з файлів граничних умов, для моделювання клімату;
- Спрощена діагностика двовимірних полів.

Динаміка:

- Застосування введення бічних граничних умов у спектральному просторі.

Технічний:

- Зміна і оптимізація ІО-Сервера;
- Набір інструментів для перетворень файлів у форматі FA для підстильної поверхні;
- Можливість безпосереднього керування модулем SODA у модулі CANARI;
- Додаткові директиви Openmp у модулі SURFEX;
- Зміна зовнішнього режиму змінних бази даних спостережень що визначають збої в модулі Canari.

Перевірені конфігурації

Були перевірені і використовуються в ECMWF і деяких інших linux кластерах наступні конфігурації модулів (сумісність використання):

- AROME_3DVAR - фізика AROME із тривимірною варіаційною асиміляцією даних підстильної поверхні, типова конфігурація;
- AROME - фізика AROME з асиміляцією даних на підстильній поверхні і у верхніх шарах атмосфери;
- AROME_MUSC - Проста кліматична модель (MUSC) з фізикою AROME;
- ALARO_3DVAR_OLD - фізика ALARO з попереднім ISBA і тривимірною варіаційною асиміляцією даних;
- ALARO_OLD - фізика ALARO з попереднім ISBA і асиміляцією даних на підстильній поверхні і верхніх шарах атмосфери;
- ALARO: ALARO + SURFEX;
- AROME_CLIMSIM - моделювання клімату з фізикою AROME;
- AROME_EPS - установка Harmoneps;
- AROME_EKF : AROME з SODA+EKF;
- AROME_3DVAR_FA_IO_SERVER - така ж як AROME_3DVAR але з активованим ІО-Сервером.

Установка HARMONIE-38h1

У Європейському центрі середньострокових прогнозів погоди, контрольна версія harmonie-38h1.2 доступна як,

`ecgate:/home/ms/spsehlam/hlam/harmonie_release/tags/harmonie-38h1.2`

Або через пакет Subversion:

svn з <https://svn.hirlam.org/tags/harmonie-38h1.2>

- Або <https://hirlam.org/portal/download/harmonie-38h1.2.tar.gz>
- Тестові установки даних, що включають файли з границями, спостереженнями, кліматом і супутня статистика для асиміляції можуть бути завантажені з того ж джерела.
- Кліматичні дані для циклу 38h1 можуть бути знайдені за посиланням https://hirlam.org/portal/download/harmonie_climate/38h1.1.tar.gz

Константи RTTOV для 38h1.2 можуть бути знайдені за адресою https://hirlam.org/portal/download/sat_const/sat_const_cy38h1.2.tar.gz

Інсталяція моделі та конфігурація експерименту

Версія для старту експерименту доступна на esgb, як:

~h1am/harmonie_release/tags/harmonie-38h1.2/config-sh/Harmonie setup

Установка Rootpack

Gmkrack – це утиліти моделі ALADIN для компіляції ARPEGE/IFS, які включають:

- Ручне введення (виключення/підключення модулів);
- Ручне керування опціями;
- Компіляція машинного коду;
- Побудова бінарного коду.

Основний пакет встановлює і будує повну версію моделі HARMONIE (моделі ALADIN/HIRALD/ALARO/AROME) генерацією пакета попередніх бібліотек (rootpack) і модулів, доступних для використання. Допускається створення власного "цільового" пакета, який синхронізує локальні модифікації з довідковими бібліотеками.

gmkrack призначена для окремої установки і підтримки. В HARMONIE це - частина системи і використовується в командах Build_gmkrack, Build_rootpack and Build_pack

Підтримувані платформи і компілятори:

- IBM power 7, xlf95;
- Intel (g95, gfortran, intel);
- NEC;
- Cray, ftn.

Конфігурація системи

Щоб запустити побудову програми, треба створити директорію експерименту \$HOME/hm_home/trunk і включити пуск

PATH_TO_HARMONIE/config-sh/Harmonie setup -r

PATH_TO_HARMONIE -h YOURHOST

Ця команда створює наступні каталоги і файли

```

config-sh/hm_rev          # забезпечує шлях до установки
довідкових бібліотек, подібно модулю hl_rev у програмі synoptic-hirlam
config-sh/Main            # команда, що дозволяє старт програми
Harmonie, подібно команді Start в synoptic-hirlam
Env_system -> config-sh/config.YOURHOST # команда, що описує вашу
систему, подібно команді Env_system в synoptic-hirlam
Env_submit -> config-sh/submit.YOURHOST # команда, що описує ваші
підлеглі команди, порівнянна з командою submission.db в synoptic-hirlam
sms/config_exp.h          # визначає ваш експеримент, подібно
команді Env_expdesc в synoptic-hirlam
В sms/config_exp.h необхідно ідентифікувати опції, що посилають у модуль
gmkrack.
## Визначення, дані в gmkrack, повинні відповідати з hm_rev
BUILD_ROOTPACK=${BUILD_Rootpack-yes} # Побудувати свій
власний ROOTPACK, якщо його ще не існує (так|ні)
# Це, можливо, займе декілька годин!
# Переконайтеся, що ваші записи в директорію
ROOTPACK, визначені в Env_system
REVISION=38h1             # Установка версії моделі
BRANCH=trunk
VERSION=01                # Версія revision/branch для використання
OPTION=x                  # Описує, який з файлів
gmkrack/arch/SYSTEM.HOST.OPTION буде використовуватися
OTHER_PROGRAMS="soda pgd blend odbtools bator ioassign odbsql
blendsur addsurf surfex mandalay prep lfitools sfxtools" # Інші модулі для
компіляції gmkrack
Ідентифікація системи визначається у файлі конфігурації config-sh, який,
зокрема, містить:
COMP CENTRE    # ПК повинен бути де-небудь, крім ECMWF
HM_DATA        # дата початку експерименту
HM_LIB         # місце знаходження копії вихідного коду і компільованих
бібліотек
ROOTPACK       # місце, де ви звертаєтесь/поміщаєте ваші rootpack
установки
HARMONIE_CONFIG # ідентифікує вашу конфігурацію
AUXLIBS/EMOSLIB # шлях до ваших зовнішніх бібліотек
Потрібна також ідентифікація системи для gmkrack в:
util/gmkrack/arch/YOURMACHINE.HARMONIE_CONFIG

```

Вихідний код для утиліт, не компільованих в gmkrack, перебуває в util. Повинно бути п'ять файлів конфігурації створення/редагування.

```
util/gl/config/config.HARMONIE_CONFIG
util/gl_grib_api/config/config.HARMONIE_CONFIG
util/monitor/config/config.HARMONIE_CONFIG
util/oulan/config.HARMONIE_CONFIG
util/conrad/config.HARMONIE_CONFIG
```

Файли, створені самостійно, не редагуються.

Правила підпорядкування

Потім необхідно ідентифікувати завантажувальний файл в config-sh. Цей файл повинен визначати, як завантажувати робочу програму в batch систему. Підпрограма get_job викликається з модуля [submission.db](#) і повинна повернути відповідну batch команду, що включає деякі зміни, що визначають паралельне розкладання процесу. Ця команда буде різною при різних умовах, доти, поки не буде отримана підходяща команда.

В есгб-сса повинні бути створено три командні записи:

- backg_list для запуску програми як фонові в есгб;
- scalar_list розрахунки одиночного експерименту в сса;
- par_list для паралельних розрахунків в сса.

scalar_list – режим, прийнятий «за замовчуванням», означає, що будь-яка неспецифікована програма буде запущена як єдина програма в HPCE. Величини, прийняті «за замовчуванням» визначаються для кожного списку. Спеціальні установки для спеціальних програм можуть установлюватися в такий спосіб:

```
$job_list{'Prep_ini_surfex'}{'RESOURCES'} = $submit_type.'resources' =
Consumablecpus(1) Consumablememory(6000 MB);
```

Інсталяція

Запуск компіляції rootpack :

```
PATH_TO_HARMONIE/config-sh/Harmonie install
```

Файл із набором параметрів, необхідних для установки, перебуває в Install_rootpack.tdf. Установка подібна запуску експерименту.

Порядок виконання дій:

- Побудова_gmkrack;
- Побудова_rootpack;
- Формується rsync з модулів HM_REV, HM_CMODS, HM_LIB;
- Виконується cleanpack;
- складається компілятор ODB;
- компілюється IFS;
- закривається пакет.

Build_pack:

- Виконується все, описане в модулі OTHER_PROGRAMS. Це робиться всередині модуля HM_DATA/gmkpack_build;
- Створення утиліт (gl/verobs/oulan).

У випадку помилки ics_* може бути запущена з ROOTPACK або директорією \$HM_DATA/gmkpack_build directory. При цьому:

- Відключається компіляція і з'єднання модулів;
- Створюються бібліотеки, шляхом запуску файлу ics_* вручну;
- Директорія BUILD_ROOTPACK=no, вносить виправлення до помилкового коду у вашому експерименті;
- Повторна установка HARMONIE.

Головне завдання установки – компіляція модуля rootpack. Однак, створені бінарні коди не можуть бути використані в інших експериментах.

Запуск HARMONIE під (m)SMS

Вступ

Для успішного завершення експерименту, система HARMONIE повинна пройти кілька кроків. Даний ланцюжок кроків можна представити у вигляді:

- Конфігурація і запуск експерименту. На цьому кроці визначається область дослідження, вибираються необхідні установки і задаються часові рамки вашого експерименту. Потім можна запустити систему і почати створювати основну інфраструктуру.
- Установка необхідних директорій і копіювання потрібних системних файлів.
- Компіляція необхідних для запуску експерименту бінарних файлів.
- Створення постійних кліматичних файлів для області дослідження.

Після основної установки програми й файлів можна приступитися до їхнього інтегрування, яке можна розбити на три стадії:

- Підготовка граничних умов і даних спостережень;
- Асиміляція даних і прогноз;
- Постпроцесінг і архівація результатів.

Для поліпшення продуктивності програми необхідно послідовно розв'язати три завдання.

Загальне конфігурування й відносини між різними його частинами, якими управляє планувальник [mini-SMS](#), з графічним інтерфейсом mxcdp. Ця документація описує, як почати перший експеримент. Опис додержується правил установки в ECMWF, і локальні системи установки подібні їй, хоча звичайно простіше. Довідкова система HARMONIE на платформі ECMWF робить установку дублюючих компонентів, використовуючи [mini-SMS](#). За замовчуванням, msms сценарій використовує зовнішній комп'ютер esgb для

конфігурації і запуску експерименту, тоді як комп'ютер c2a/cca використовується для всіх обчислення крім тих, які мають відношення до верифікації спостережень і їх контролю.

Наступний приклад показує покроковий запуск експерименту HARMONIE my_exp від esgb.

Конфігурація власного експерименту

Створіть директорію експерименту під іменем \$HOME/hm_home, використовуючи стандартні скрипти HARMONIE для мінімізації умов експерименту.

```
mkdir -p $HOME/hm_home/my_exp
cd $HOME/hm_home/my_exp
~hlam/harmonie_release/tags/harmonie-38h1.2.beta.2/config-sh/Harmonie setup
-r ~hlam/harmonie_release/tags/harmonie-38h1.2.beta.2 -h esgb-cca
де
```

--r показує, яка версія використовується.

--h показує, які файли використовуються для конфігурації.

В ECMWF за замовчуванням використовується файл config.esgb.

Це дає установку, що у даний момент використовується фізика AROME з модулем CANARI+OI_MAIN для опису підстильної поверхні, і модулем 3DVAR для асиміляції атмосферних даних з дискретністю 3 години на території з горизонтальним розділенням 2.5 км і 65 рівнями по вертикалі.

Після цього можна відредагувати основний файл конфігурації sms/config_exp.h, для конфігурації сценарію експерименту. Можна змінити специфікації для різних версій моделі (AROME, ALARO), розташування даних, установки для динаміки, фізики, області дослідження, приєднання інших моделей, і т.п..

В деяких випадках необхідно відредагувати загальний системний файл конфігурації, [Env_system](#) або правила по використанню робочого модуля esgb/cca. Для асиміляції даних необхідно також змінити модуль scr/include.ass.

Початок експерименту

Запустити експеримент необхідно, задавши час початку, DTG, час закінчення, DTGEND, і тривалість експерименту, LL

```
~hlam/Harmonie start DTG=YYYYMMDDHH DTGEND=YYYYMMDDHH
LL=12 # e.g., ~hlam/Harmonie start DTG=2012122400 DTGEND=2012122406
LL=12
```

Якщо, наприклад, ви прагнете дати тривалий прогноз на 00/12 UTC і короткостроковий (3 год) в 03/06/09/15/18/21, ви можете

використовувати для більш тривалого прогнозу специфікацію LLMAIN.

```
~hlam/Harmonie start DTG=2012122400 LLMAIN=24
```

Якщо цей етап пройде успішно, mini-sms ідентифікує ім'я експерименту, почне створення бінарних кодів і запустить прогноз. А якщо ні, то, потрібно за допомогою msms перевірити сумісність файлу \$HM_DATA/msms.log.\$HM_DATA із системним файлом Env_system. В ECMWF це робиться за допомогою директорії \$\$HM_DATA=\$SCRATCH/hm_home/\$EXP, де \$EXP - ім'я вашого експерименту.

Продовження експерименту

Якщо експеримент успішно завершився і ви прагли б продовжити його протягом іншого періоду часу, ви повинні задати команду

```
~hlam/Harmonie prod DTGEND=YYYYMMDDHH LL=12
```

Використовуючи специфікацію prod, ви повідомляєте систему, що продовжуєте експеримент і використовуєте конфігурацію з попереднього циклу. У цьому випадку початкова дата береться з файлу progress.log створеного директорією \$HOME/hm_home/my_exp. А якщо ви використовуєте специфікацію start, початкові дані були б інтерпольовані із граничних умов.

Запуск/повторний запуск mxcdp

Щоб запустити графічне вікно для msms для модуля esgb, задайте директорію

```
~hlam/Harmonie mon
```

Графічне вікно mxcdp запуститься незалежно від роботи msms і може бути запущене і перезапущене знову з тією ж командою. З графічним інтерфейсом ви можете контролювати і переглядати logfiles кожного завдання.

Внесення локальних змін

Дуже скоро вам знадобиться зробити зміни в скриптах або у вихідному коді. Як тільки ви ідентифікували, який файл вам необхідно редагувати, ви поміщаєте його в поточну директорію \$HOME/hm_home/my_exp, точно з тою же структурою підкаталогу, як у посиланні, наприклад, якщо ви прагнете змінити namelist, встановіть

```
~hlam/Harmonie co nam/harmonie_namelists.pm # retrieve default  
namelist harmonie_namelists.pm
```

```
vi nam/harmonie_namelists.pm # modify the namelist
```

У наступному вашому експерименті, буде використаний змінений файл. Ви можете також внести зміни в поточний експеримент. Для цього внесіть зміну, яку ви бажаєте й запустите знову Initrn у вікні mxcdp. Модуль Initrn копіює

всі файли з директорії вашого локального експерименту в робочу директорію \$HM_DATA. Як тільки поточне завдання Initrun завершиться, ви можете запустити завдання, що знову цікавить вас. Якщо ж ви бажаєте що-небудь перекомпілювати, вам доведеться виконувати повторно створення HARMONIE.

Директоріальна структура експерименту

У випадку використання esgb, ви можете простежити процес виконання завдання за допомогою директорії \$SCRATCH/hm_home/my_exp. Більш повні результати і основні дані доступні в директорії c2a:\$SCRATCH/hm_home/my_exp. В цих директоріях ви знайдете наступне.

Дані на c2a:

- Усі бінарні файли в пакеті bin;
- Бібліотеки IFS, об'єктні файли й вихідний код у пакеті gmcrack_build, якщо ви створювали експеримент за допомогою пакета gmcrack або в пакеті lib/cca, якщо ви використовували ручне введення;
- Скрипти, файли конфігурації, sms і msms визначення в пакеті lib/;
- Утиліти, як, наприклад, gmcrack, gl і пакет верифікації в пакеті lib/util;
- Файли клімату в пакеті climate;
- Робочу директорію для поточного циклу при даних YYYYMMDD_HH; якщо в експерименті з'явилася помилка, корисно перевірити IFS файл NODE.001_01 у робочому каталозі поточного циклу (\$HM_DATA/YYYYMMDD_HH). Помилку можна виявити в директорії типу: Failed_this_job;
- Архівні файли в пакеті archive;
- Структуру даних YYYY/MM/DD/HH для кожного циклу;
- ICMSHHARM+NNNN і ICMSHHARM+NNNN.sfx — вихідні прогностичні файли для атмосферної підстильної поверхні;
- Верифіковані вхідні дані у файлі extract. Вони також зберігаються на постійному диску
/perm/\$GROUP/\$USER/HARMONIE/archive/\$EXP/archive/extract.

Дані на esgb:

- Робоча директорія для поточного циклу при даних YYYYMMDD_HH;
- На esgb/cca log файли для кожного завдання перебувають у директорії
/cca/perm/ms/\$COUNTRY/\$USER/HARMONIE/my_exp. Усі log файли також збираються в html файлах під назвами типу

HM_Date_YYYYMMDDHH.html і потім архівуються в пакеті archive/log на esgb;

- Архівні файли в пакеті archive;
- Структуру даних YYYY/MM/DD/HH для кожного циклу;
- Дані верифікації, доступні на постійному диску /cca/perm/\$GROUP/\$USER/HARMONIE/archive/\$EXP/archive/extract;
- Усі log файли в пакеті archive/log.

Якщо процедура верифікації включена, робоча директорія буде перебувати в пакеті esgb:\$SCRATCH/hm_home/\$EXP/archive/extract/Webgraf

Дані на ECFS:

а) Оскільки диски на c2a/esgb чистяться регулярно, необхідно постійне запам'ятовування даних і файлової системи ЕС на ECFS. Для цього в ECFS є дві опції: ectmp і ec. Остання – для постійного зберігання, а перша обновляється через 90 днів. Вибір відповідної опції визначається змінною в ECFSLOC. Наприклад,

els ectmp:/\$USER/harmonie/my_exp

б) Рівень архівування залежить від змінної ARSTRATEGY у директорії sms/config_exp.h. Значення, встановлювані за замовчуванням при заданій структурі YYYY/MM/DD/HH, містять:

- Аналіз підстильної поверхні ICMSHANAL+0000;
- Результати атмосферного аналізу MXMIN1999+0000;
- Узгодження між поверхневим/атмосферним аналізом і хмарністю в ANAB1999+0000;
- ICMSHHARM+NNNN і ICMSHHARM+NNNN.sfx - вихідні прогностичні файли для атмосфери біля підстильної поверхні;
- Файли PFHARM*, які проводяться вбудованим постпроцесором;
- Log файли у файлах logfiles.tar;
- База даних спостережень і інформація про зворотні зв'язки у файлі odb_stuff.tar;

в) Файли по клімату зберігаються в пакеті climate

г) По одному пакету, vfld і vobs відповідно, для верифікованих даних.

Метеорологічне забезпечення HARMONIE-38h1.2

HARMONIE -38h1 – це перша реалізація HARMONIE, яка супроводжується оперативними комплексами, що діють у формі Регулярного

Довідкового Циклу HARMONIE (HARMONIE-RCR) в оперативних центрах, а саме, Датському Метеорологічному Інституті (DMI, для району Данії, оперативну роботу почав після листопада 2013, як консультаційний центр використовується після березня 2014) і Metcoop (об'єднаний оперативний комплекс MET і SMHI, для області METCOOP25B, як консультаційний центр використовується після березня 2014). Крім того, Фінський Метеорологічний Інститут (FMI) на базі 38h1 створив оперативний центр для області SCANDINAVIA25 у січні 2014.

Раніше для апробації моделі 38h1.1, більшість тестів по валідації моделі і її чутливості виконувалися учасниками проекту HIRLAM, у розвиток її базової версії або версій alpha, beta і rc. Апробувалися різні варіанти програми, у тому числі для різних областей прогнозу, наприклад, що покривають Іспанію і Канарські острови, Нідерланди, Данію, Литву, Скандинавію, Ісландію, з використанням різних схем асиміляції даних (4DVAR, 3DVAR, 3DVAR-RUC, комплексні), різних баз даних (AMSU-A, AMSU-B/mhs, AMV, MODES, Radar, GNSS, ASCAT) спостереження, фізичної параметризації (AROME, ALARO), і конфігурації EPS.

Неповний список різних конфігурацій і оцінки метеорологічного супроводу для різних версій 38h1, можна знайти на wiki сторінці [Harmonie_38h1/ValidationTests](#). В основному, у порівнянні з попередньої офіційною версією 37h1.2, метеорологічне забезпечення нових версій було задовільним. За замовчуванням, у моделі 38h1 внесені наступні зміни:

- Покращений прогноз приземного вітру при більших швидкостях.
- Поліпшений прогноз для гірських областей, особливо по приземному вітру.
- Покращений прогноз приземної вологості.
- Поліпшений прогноз для поверхневої температури в літню пору.
- Зниження поверхневої температури в зимовий час, що, імовірно, пов'язане зі збільшенням/посиленням низької хмарності.
- Зменшення загального хмарного покриття.
- Покращений прогнозування інтенсивних опадів.

При аналізі тестування моделі було помічено, що спостережувані зміни в результатах метеорологічного прогнозу часто сильно пов'язані з базою фізико-географічних даних (ECCOCLIMAP2), налаштуваннях параметризацій у модулі SURFEX (canopy drag і subgrid - підсіткового масштабу параметризації орографії). Було відзначено, що подібні зміни не завжди дають позитивні результати, наприклад, коли використовуються для інших областей.

Завдяки вибору опцій LUNBC і LGRADSP, дана версія дозволяє поліпшити прогноз HARMONIE при розрахунках з більшим кроком в часі. Для версії RCR-38h1.2, верифікація показала граничну чутливість при зміні кроку за часом 60, 75 і 90 з у випадку вибору LUNBC+LGRADSP. Було отримано, що вибір опції LGRADSP дає переваги в деяких випадках для MSLP і верхніх шарів атмосфери.

4. ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ ДЛЯ МОДЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ

4.1 Використані обчислювальні засоби

Регулярна участь у міжнародних проектах по чисельному моделюванню прогнозів погоди, дозволило учасникам теми використовувати для розрахунків обчислювальні потужності Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF). Зокрема, використовувалися наступні обчислювальні засоби:

Суперкомп'ютер. Багатоплатформовий суперкомп'ютер ECMWF призначений для оперативного використання, який з метою підвищення надійності складається із двох комп'ютерів Cray XC30 (рис.4.1) і незалежних систем зберігання Cray Sonexion. Уся система складається із двох незалежних підсистем, розташованих в окремих залах, але з рівним доступом до оперативної пам'яті кожного кластера. Вони мають окремі джерела живлення й системи охолодження для захисту від широкого спектра можливих збоїв. Кожна підсистема Cray XC30 складається з 19 шаф, обладнаних процесорами Intel Ivy Bridge і близько 4600 двопроцесорних обчислювальних вузлів на кожен шафу з більш ніж 6 петабайт дискового простору і можливістю перетинання файлових систем між залами.



Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд одного із кластерів суперкомп'ютера Cray XC30.

Кожний обчислювальний вузол XC30 складається із плати з радіаторами для восьми чипів CPU. У задній частині плати знаходиться маршрутизатор Aries (рис.4.2).

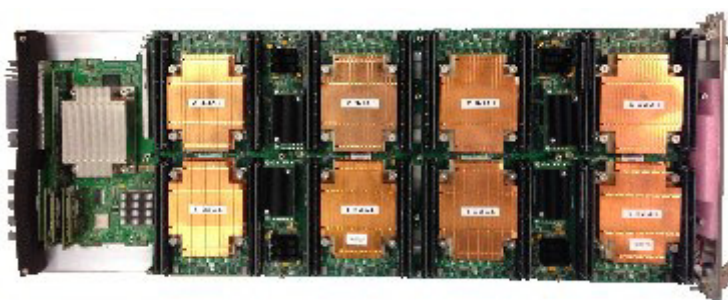


Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд обчислювальної плати комп'ютера Cray XC30.

Кожна обчислювальна плата підключається до загальної системи за новою технологією «бабка», розробленої в рамках проекту «Висока продуктивність обчислювальних систем» (HPCS) (рис.4.3). Особливістю цієї технології є відносно велика кількість локальних електричних з'єднань і невелика кількість оптичних з'єднань, що значно знижує вартість такої плати. Швидкість передачі інформації за допомогою подібних вузлів становить 16 гігабіт в секунду в кожному напрямку.

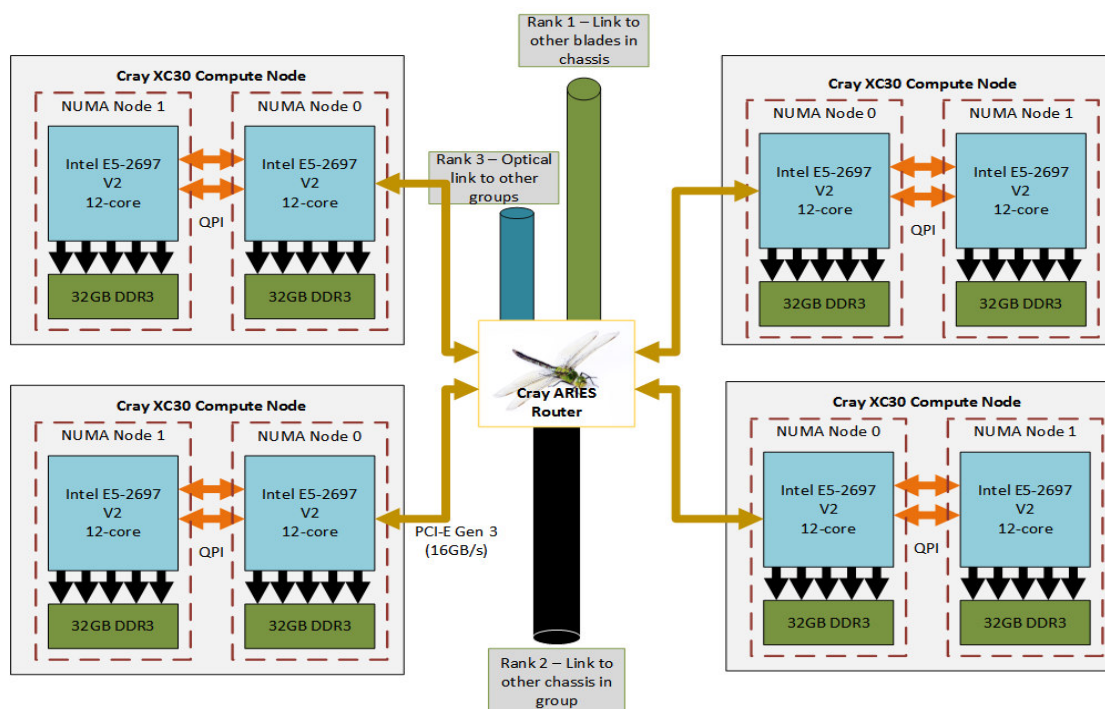


Рисунок 4.3 – Схема плати обчислювального вузла комп'ютера Cray XC30.

Кожний вузол системи оптимізований для виконання конкретної функції. Більша частина вузлів запущена в «екстремальному режимі масштабування». У цьому режимі кожний вузол працює як урізана версія операційної системи Linux. Зниження кількості операційних завдань, запущених на вузлі, до мінімуму, є ключовим елементом запуску додатка для забезпечення масштабованості середовища. Існує ще два типи обчислювальних вузлів. Перший – це так звані «сервіс»-вузли, а другі "Multiple Applications Multiple User (MAMU)" – вузли для декількох користувачів. Останні дозволяють запустити повні версії операційної системи Linux і виконувати більш одного пакетного додатка на вузлі. Кожний з обчислювальних кластерів Cray в HPCF обробляє більш 200 000 робочих місць у день. Більшість із цих робочих місць малі й вимагають менше, чим один повний вузол для роботи. Незважаючи на велику кількість цих малих робочих місць, на них доводиться менш 1% часу обробки, виконуваного системою.

Висока продуктивність робочої пам'яті для обчислювальних кластерів забезпечується файловою системою Lustre на вбудованих пристроях Cray Sonexion. Кожний кластер має дві основні бази зберігання, одну для обмеженої за часом оперативної роботи, іншу для науково-дослідної роботи. Поділ на обмежені за часом і дослідницькі завдання допомагає уникнути конфліктних ситуацій між різними користувачами. Кожний кластер має своє власне робоче сховище високої продуктивності і є самодостатнім, але він також має доступ до ресурсів зберігання іншого кластера, що дозволяє більш гнучко працювати на кожному кластері, що по суті означає в багатьох відносинах єдину систему. Кожна з XC30 систем має близько 6 петабайт дискового простору й забезпечує до 250 гігабайт у секунду пропускної здатності введення/виводу. Кожна файлова система Lustre має сервер метаданих, що забезпечує ієрархію каталогів і інформацію про окремі файли, таких як ім'я власника, особи, що мають до них доступ, а також назви об'єктів серверів, які надають місце для зберігання самих файлів. На рис.4.4 показаний пристрій зберігання Cray Sonexion. Стійка містить сервер метаданих і шість блоків для зберігання даних. Кожний блок забезпечує 120 терабайт пам'яті.



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд пристрою зберігання Cray Sonexion.

Другим типом зберігання в HPSCF є зберігання загального призначення, передбачене мережею Netapp і реалізоване за допомогою системи NFS. Це сховище забезпечує простір для домашніх файлових систем і зберігання додатків. У порівнянні з файловими системами Lustre, його потужність відносно невелика і становить 38 терабайт, але воно є дуже надійним і пропонує ряд додаткових функцій, таких як файлові системи моментальних знімків і реплікації, які система Lustre поки що не реалізує.

Ecgate

Ecgate є кластером з операційною системою Linux, доступним винятково для зареєстрованих користувачів із числа членів ECMWF, або тих держав, що співпрацюють з ними. Це універсальний обчислювальний засіб може бути використаний для графічної або іншої обробки, яка не виконується суперкомп'ютером, щоб одержати доступ до системи обробки даних (DHS), для обміну даними із зовнішніми сайтами і т.д. Системи зберігання Ecgate забезпечують близько 170 Тб дискового простору.

Система обробки даних

В ECMWF розроблена масштабна система обробки даних (DHS), де користувачі можуть зберігати і витягати дані, необхідні для виконання моделювання погоди, дослідження атмосферних процесів для моделювання й збору даних про погоду. DHS підтримує дві системи обробки даних, розроблені в ECMWF:

MARS, (the Meteorological Archive and Retrieval System) дозволяє співробітникам одержувати доступ до метеорологічних даних, які були зібрані або згенеровані в ECMWF протягом більш 30 років. MARS включає дані у форматах GRIB і BUFR, не розкриваючи користувачам усіх деталей фізичного розташування, що стосуються внутрішньої організації цих даних.

ECFS навпаки, надає користувачам повну уяву про дуже велику файлову систему, і використовується для даних, які не підходять для зберігання в MARS. Команди в системі UNIX дозволяють користувачам копіювати файли цілком і з будь-якої обчислювальної платформи ECMWF. ECFS використовує ієрархію зберігання дисків і касет в HPSS ([High Performance Storage System](#)) для зберігання файлів і пов'язаних з ними метаданих (власника файлу, структуру директорій і т.д.).

Підтримка ECFS і тим більше MARS є основним компонентом архівації файлів в HPSS, яка відслідковує збережені файли, забезпечує їхнє ієрархічне керування і управляє діяльністю, пов'язаної з дисками, стрічками, стрічковими накопичувачами і автоматизованими стрічковими бібліотеками (рис.4.5).



Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд системи зберігання й обробки даних HPSS.

HPSS використовує систему керування базами даних високої продуктивності DB2, розроблену фірмою IBM з передовими методами передачі даних, для гарантії безпеки, захисту і цілісності даних. Крім того вторинні копії найбільш важливих даних зберігаються на стрічкових картриджах для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій у системі (DRS). Можна привести деякі цифри (весна 2014)

В середньому в день система обробляє запити на 9000 монтувань стрічки (6000 в 2010 році), а в деякі дні може бути пік на рівні близько 15000. В звичайний день архів росте приблизно до 65TB. Дані MARS становлять близько 75% від обсягу даних, що зберігаються в DHS, але тільки близько 10% від загальної кількості файлів. Дані ECFS складають залишкові 25%, що відповідає 90% усіх файлів. DHS надає доступ до більш ніж 59 PB первинних даних (в 2010 році було 15 PB).

Додаткове зберігання резервних копій становить 14.5 PB (було 5PB в 2010 році). У системі ECFS зберігаються 134 млн файлів (було 67000000) і більш 12 млн у системі MARS (було близько 5 мільйонів).

Локальна мережа

Локальна мережа (LAN) зв'язує всі обчислювальні системи і ділиться на високопродуктивну мережу (HPN) і мережу загального призначення (GPN) (рис.4.6).

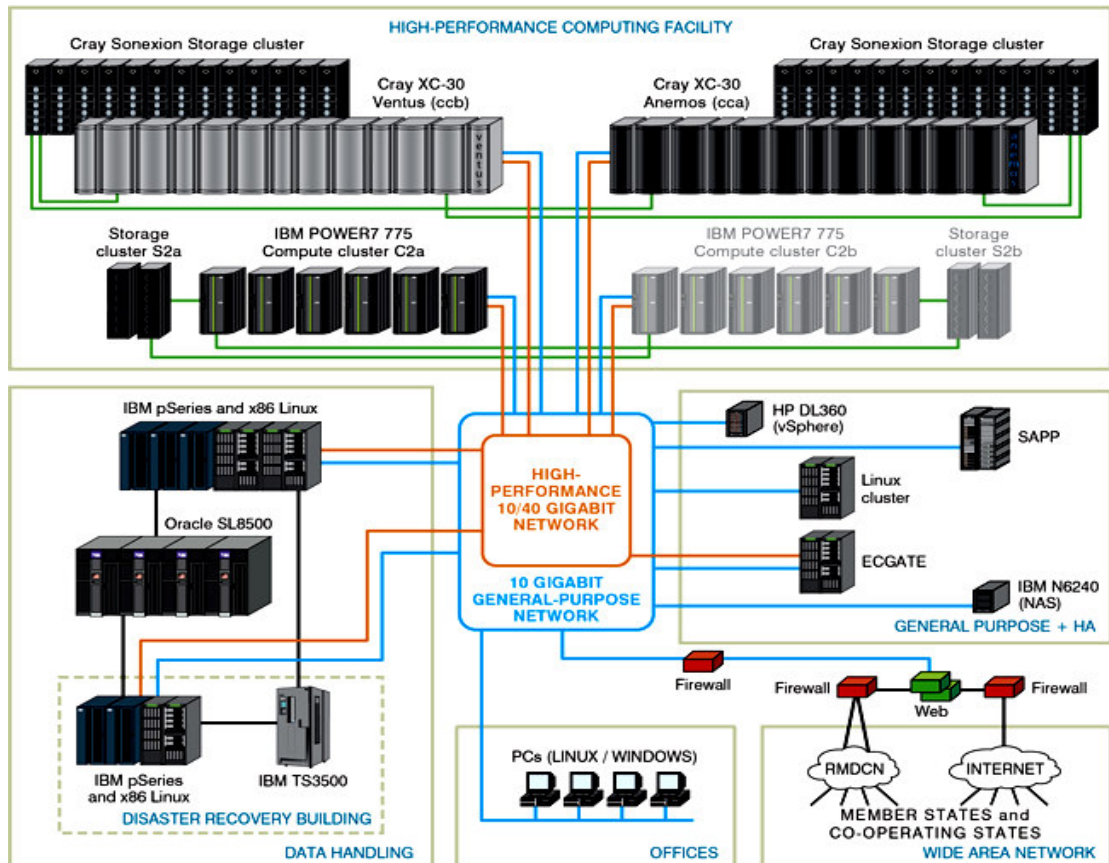


Рисунок 4.6 – Схема локальної мережі (LAN).

HPN використовується для обміну великими обсягами оперативних даних. GPN використовується для всього іншого трафіку і забезпечує підключення до суперкомп'ютера систем обробки даних інших великих серверів, користувачів ПК і ноутбуків, а також через брандмауери, і з зовнішнім світом. З погляду всієї локальної мережі, поділ на HPN і GPN робить малоімовірним, що порушення в одній області вплине на іншу. Крім того, існує фізичний поділ між двома ядрами кожної мережі. Ці заходи забезпечують те, що несправності компонентів будуть визначені протягом короткого періоду часу і потоки інформації будуть автоматично перенаправлятися.

Підключення до мережі Інтернет здійснюється через подвійну 10 Гбіт систему JANET, наукову і освітню мережу Об'єднаного Королівства. Ця

мережа забезпечує високу швидкість зв'язку між більшістю науково-дослідних мереж у Європі і США.

Інтернет-з'єднання використовується для проведення різних заходів:

- Поширення прогностичної продукції для організацій і держав, що не є членами ECMWF
- Прийом метеорологічних спостережень і супутникових даних
- Безпечного доступу до систем обчислень і обробки даних
- Підтримки науково-дослідних і оперативних заходів співробітників ECMWF

Передачі великих обсягів оперативних даних між суперкомп'ютером і системою обробки даних.

4.2 Асиміляція радарних даних у чисельних моделях прогнозу погоди

Основні метеорологічні виміри, у яких використовуються радары – це вимір відбивної здатності атмосфери і визначення характеристик вітру. Величина відбивної здатності визначається характеристиками радарного променя, відбитого від якого-небудь об'єкта в напрямку радара. Характеристики вітру оцінюються по фазі затримки променя радара, відбитого від предмета, що рухається, згідно з ефектом Доплера. Характеристики вітру можуть бути отримані тільки доплеровськими РЛС і оскільки визначення характеристик вітру не входить до числа завдань нашого дослідження, надалі вони розглядатися не будуть. Обробка даних радарних вимірів відбивної здатності атмосфери відбувається в такій послідовності:

Визначається величина $C_{\max}$, яка є максимально можливим значенням відбиттів від усіх перешкод для даного числа пікселів

Фактичне число відбиттів від перешкод для даного числа пікселів – загальний обсяг даних

Оцінюється загальна кількість опадів

Оцінюється кількість опадів від купчастої хмарності

Інтерполяція якого-небудь параметра у вузли регулярної сітки

Необхідно, однак, помітити, що промінь радара буде відбиватися не тільки від досліджуваних об'єктів, але й від будь-яких перешкод на своєму шляху (об'єкти орографії, птахи, комахи), що робить необхідним додаткову обробку даних (за допомогою різних фільтрів, коректувань, і т.п.). Ці процедури тут не деталізуються, але відповідна література може бути знайдена за адресою (<http://erad.2008.fmi.fi/.html>).

Наступна схема (рис. 4.7) дає короткий огляд існуючих схем радарної асиміляції даних.

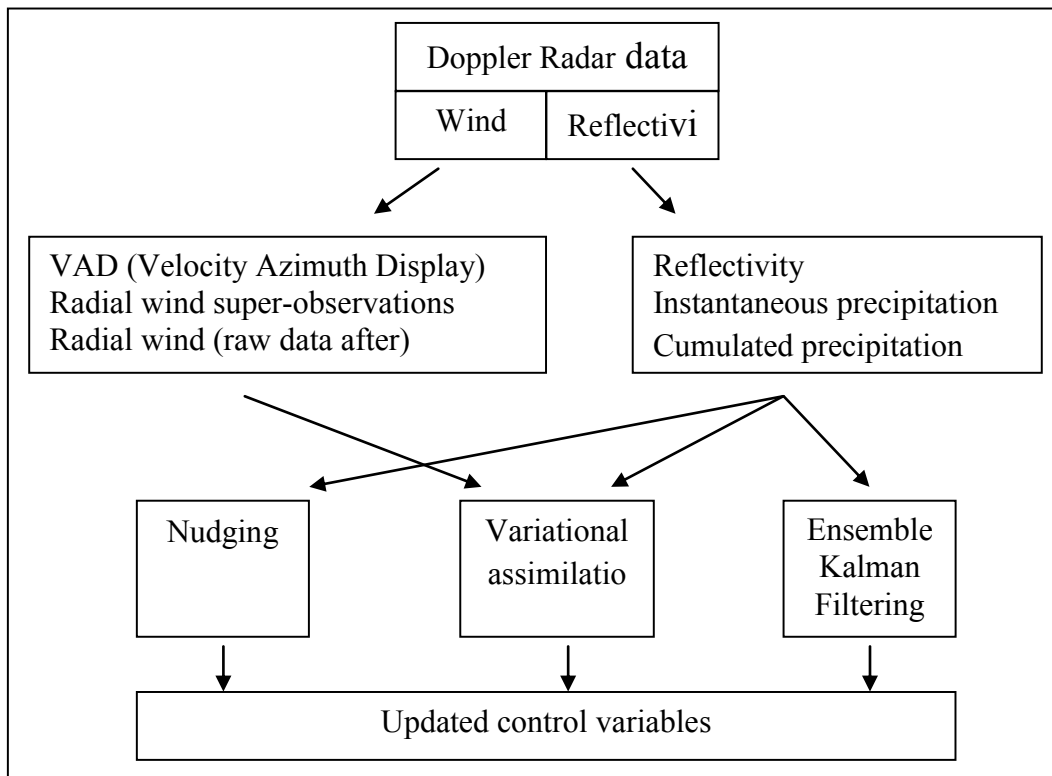


Рисунок 4.7 – Схема асиміляції радарної інформації.

Асиміляція даних по відбивній здатності атмосфери. В різних чисельних моделях використовуються різні підходи до засвоєння радарних даних по відбивній здатності атмосфери. При цьому основні операції – це наджинг (*nudging*), варіаційний аналіз і фільтрування по ансамблю Калмана. Засвоєння радарних даних для визначення відбивної здатності атмосфери вимагає ускладнення цих операцій шляхом включення мікрофізичних процесів.

Наджинг. Основна мета наджинга – це підготовка наявних даних до інтеграції в модель. Це виконується шляхом введення величини релаксації, яка являє собою різницю між спостереженими значеннями і модельними. Схема наджинга не засвоює безпосередньо величини відбивної здатності атмосфери але дозволяє оцінити кількість опадів. Відомий, наприклад, так званий спосіб Наджинга Прихованого Тепла (LHN) для одержання інформації про опади [14]. Градієнт температури LHN додається до рівняння термодинаміки для оцінки прихованого нагрівання атмосфери, подібно нагріванню у фізичних моделях утворення дощу:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = F(T) + \frac{\partial T}{\partial t_{LHN}}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t_{LHN}} = (\alpha - 1) \Delta T_{LH} \quad \alpha = \frac{RR_o}{RR_m}$$

де $F(T)$ означає зміну температури по фізичній моделі, $\partial T / \partial t_{LHN}$ означає зміну температури внаслідок LHN, і ΔT_{LH} – необхідна кількість прихованого тепла для наближення кількості опадів, поліченого по моделі (RR_m) до фактичної кількості опадів (RR_o). Схема має на увазі, що модельна і фактична кількість опадів рівняються в містах спостереження, тобто даний оператор складається з кількості вологи згідно з фізичними закономірностями, інтерпольованими до спостережених значень. Слід зазначити, що використовуються звичайні фізичні закони і немає ніякої необхідності в їх доповненні. Інші схеми наджинга регулюють профіль вологості замість температури [15]. Тут коректування пропорційне різниці між модельними і фактичними опадами і відрізняються по типу опадів (внутрішньомасові або конвективні).

Варіаційна асиміляція. При варіаційному засвоєнні даних (трьох- або чотиривимірному), інформація про відбивну здатність атмосфери сприймається за допомогою введення нової величини J_o , яка являє собою різницю між фоновими значеннями параметра і вимірюваними за допомогою радара (відповідно, дощу, профілю температури або вологості). Існують, однак, відмінності між операторами, що показують різницю між змодельованими і фактичними полями в залежності від способу виконання.

- Пряма асиміляція: деякі моделі використовують безпосередньо відбивну здатність у тривимірному просторі. Це, наприклад, моделі MM5 і WRF. Контрольною змінною тут є загальний вміст вологи q_t , яке потім у моделі розподіляється на дощову вологу (q_r), хмарну вологу (q_c) і водяний пар (q_v) згідно із законами фізики атмосфери. Прийнятий вміст дощової вологи (q_r) потім використовується для обчислення модельної відбивної здатності. J_o потім обчислюється в «просторі відбивних здатностей» і його градієнт обчислюється відповідно цього простору. Потім обраний оператор, що показує відбивну здатність використовується для обчислення градієнта контрольної змінної q_t , тобто $\text{grad } J_o$ і $\text{grad } J_b$ складаються і заново проводять мінімізацію.
- В Meteo-France (AROME) застосовується двоступінчастий підхід. Спершу за спостереженнями відбивної здатності будуються одномірні псевдопрофілі вологості, а потім вони трансформуються в тривимірне

поле, як при спостереженнях радіозондом. Побудова псевдопрофілей вологості в AROME проводяться за допомогою Байєсовського методу. Одномірний Байєсовський метод забезпечує побудову псевдопрофілів вологості y_{po} як лінійної комбінації профілів (x_i) на околицях радарного профілю здатності, що відбиває (y_z).

$$y_{po} = \sum_i x_i \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} J_{po}(x_i)\right)}{\exp\left(-\frac{1}{2} J_{po}(x)\right)} \quad \text{де}$$

Недолік одномірного Байєсовського методу полягає в тому, що, якщо немає яких-небудь опадів поблизу спостережуваної відбивної здатності, то немає ніякої можливості знайти задовільну лінійну комбінацію сусідніх профілів вологості, тобто буде запропоновано "занадто сухий" псевдопрофіль вологості. Зараз відбувається спроба позбутися цього недоліку, використовуючи насичені профілі вологості в пунктах, які перебувають на околицях спостережуваних профілів відбивної здатності [16,17].

- В ECMWF також використовується двоступінчастий підхід [18,19]. Там щогодинні спостереження опадів радарми і на станціях використовуються для обчислення одномірного загального вмісту водяного пару (TCWV) стовпа атмосфери шляхом одномірної мінімізації. Потім отримані шляхом спостережень профілі температури і вологості за допомогою операторів, що включають їхню інтерполяцію і лінеаризацію, трансформуються в опади і знаходять різницю між отриманими по цій моделі кількістю опадів і фактично спостереженим тобто J_0 . За допомогою одномірної мінімізації спершу будується профіль вологості, який відповідає як фону, так і спостереженням у варіаційному сенсі, потім цей профіль інтегрується в TCWV. Згодом TCWV використовується для чотиривимірної асиміляції. Слід відмітити, що цей метод має такий самий недолік, як і попередній у випадку низької вологості. У цьому випадку функція, використовувана в одномірній моделі має вигляд:

Зменшується до

$$A = \frac{1}{2} R(v)$$

яка вже не залежить від модельної вологості і температури. Іншим недоліком цього методу є те, що фонові значення використовуються двічі протягом аналізу (спочатку в одномірному, а потім у чотирьохвимірному), що приводить до відносно слабких градієнтів.

Фільтрація Калмана по ансамблю.

Enkf (Фільтр Калмана по ансамблю) і метод ETKF (Трансформований фільтр Калмана по ансамблю) були перевірені в Університеті Оклахоми і в NCAR [20,21]. В цих тестах модельні радарні спостереження були використані у випадках злив і зосереджувалися по більшій частині на залежності величини помилки від фонових спостережень.

Таким чином, LHN і наджинг покращують прогноз опадів головним чином на перші 6 годин [15, 22]. ECMWF також відзначив деяке уточнення прогнозів завдяки покращенню асиміляції даних про опади [19]. Кілька випадків проаналізованих в Meteo-France також показують поліпшення прогнозу положення і структури мезомасштабних хмарних систем при асиміляції даних по відбивній здатності [18].

Місце AROME в асиміляції даних радара.

Асиміляція даних спостережень відбивної здатності атмосфери за допомогою радарів у моделі AROME технічно можлива починаючи з версії CY33T1 і була вже протестована для декількох випадках в Meteo-France. Опис методології і результати можна знайти в статтях [18,23]. Подальший розвиток цього напрямку полягає в удосконаленні одномірного Байєсовського методу, контролі якості і також слід звернути увагу на вплив горизонтальних кореляцій спостереження і фонові помилки. Є також інформація, що по даним Meteo-France, урахування спостережень відбивної здатності, добре застосовується і для візуальної верифікації випадків опадів. А саме, вони забезпечують «модельну відбивну здатність», яка більш порівнянна зі спостережуваною, чим модельні опади (які ми поки ще використовуємо для порівняння).

Таким чином, ключовим питанням асиміляції радарних даних, є попередня обробка цих даних для того, щоб використовувати цю систему в

моделі ALADIN/AROME. А саме, вона повинна бути забезпечена вертикальними профілями відбивної здатності, на регулярній сітці з високим розділенням. Можливість одержання такої інформації від існуючої мережі радарів необхідно досліджувати якнайшвидше. Як зараз, наприклад, робиться в Угорщині, де профілі відбивної здатності на регулярній сітці доступні з дискретністю 15 хвилин і з 8 хвилинною затримкою для обробки даних. Ця інформація доступна для кожного з 3 радарів окремо, однак на даний момент об'єднаної інформації поки немає.

Для дослідження відповідного внеску радарних вимірювань, тестування засвоєння радарних даних могли бути запущені з попередньо підготовленими даними із Франції. Однак такі тестування носили б скоріше пізнавальний характер, ніж реальні дослідження, тому що ніякої корисної інформації мережа радарів у Франції дати не може.

Іншої корисною підготовкою до моделювання технічних деталей при засвоєнні радарних даних виявилось б використання оператора відбивної здатності спершу для цілей верифікації моделі. Це не вимагало б даних радарних спостережень, і дозволило б навчитися робити оператор, що генерує графіки «модельної відбивної здатності».

Важливо також відзначити, що такому оператору потрібна мікрофізика. Це говорить про те, що і для ALARO і для AROME необхідно використовувати радарну інформацію в початкових умовах. Поки тільки в моделі AROME в Meteo-France була перевірена атмосферна мікрофізика. Необхідно спробувати встановити, що для одномірного Байесовського методу може дати використання мікрофізики ALARO.

4.3 Загальні алгоритми функціонування системи

Опис блок схеми загального алгоритму функціонування системи. Система використовує набір атрибутів, що перебувають в HDF5 файлах у різних групах. При побудові блок схеми алгоритму деякі назви змінних ідентичні назвам атрибутів зчитуваних з файлів. Значення цих змінних наведено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - Опис змінних алгоритму

Назва змінної	Секція розташування атрибуту	Опис
lat	Секція "where" у файлі	Географічна широта розміщення радара
lon	Секція "where" у файлі	Географічна довгота розміщення радара
gain	Секція "what" у наборі даних dataset у файлі	Коефіцієнт у перетворенні цілого значення даних в dataset
offset	Секція "what" у наборі даних dataset у файлі	Вільний член у перетворенні цілого значення даних в dataset
undetected	Секція "what" у наборі даних dataset у файлі	Показник невизначеності даних
Nbins	Секція "where" у наборі даних dataset у файлі	Кількість точок на промені, значення яких фіксуються радаром
Nrays	Секція "where" у наборі даних dataset у файлі	Кількість променів в одному розгорненні
Rscale	Секція "where" у наборі даних dataset у файлі	Відстані між двома сусідніми точками на промені радара
Rstart	Секція "where" у наборі даних dataset у файлі	Відстань від центру радара до першої точки на промені, що фіксується радаром

На рис. 4.8 наведений основний алгоритм функціонування системи. На початковому етапі користувач виконує завдання обробки всіх необхідних команд з відповідними параметрами. У блоці 3 виконується перевірка необхідності виконання обробки аномалій в даних. При необхідності виконання такої обробки система зчитує задані команди, кожна з яких відповідає певній аномалії. Команди задаються з усіма заздалегідь даними параметрами і в залежності від їх значень система виконує обробку певного виду аномалій.

Процедури обробки цих перешкод розглядаються далі в даній роботі. По закінченню обробки аномалій система записує в HDF5 файли секції якості даних, на основі яких можливе одержання відкоректованого зображення без аномалій. При відсутності необхідності обробки даних на предмет неточностей в блоці 4 виконується перевірка необхідності завдання проекції джерела даних і результуючих даних. Система працює з бібліотекою `map1.4`, тому при завданні проекції необхідно дотримуватись синтаксису цієї

бібліотеки [24]. При відсутності в командному рядку опцій завдання проекцій система використовує проекцію за замовчуванням. У блоці 9 виконується перевірка необхідності масштабування вихідного зображення. Користувач може задавати розміри вихідного зображення в пікселях, тобто визначається площа поверхні, яку відбиває один піксель зображення. За замовчуванням вихідне зображення має розміри 500x500 пікселів. Такі значення обрані з урахуванням того, що радіус сканування радара становить приблизно 250 км, тобто за замовчуванням кожний піксель передає в дійсності квадратний кілометр місцевості. Ширині і висоті зображення відповідають змінні `Framewidth` і `Frameheight`.

Предбачається, що в системі дані можуть оброблятися багатьма способами, тобто можуть застосовуватися різні методи осереднення даних. У блоці 13 виконується перевірка вибору методу осереднення даних. Користувач сам вибирає метод, задає його назву у вхідних параметрах. За замовчуванням використовується метод `OVERWRITE`.

Як відзначалося раніше, на початковому етапі роботи системи передбачається обробка аномалій, за результатами якої в `HDF5` файл записується секція якості даних. У блоці 16 виконується перевірка наявності таких секцій якості й фіксуються результати даної перевірки в змінній `QUALITY`. Серед функцій системи передбачається можливість побудови тільки одного розгорнення даних, необхідність виконання цієї операції перевіряється в блоках 19 і 20. При побудові зображення з одиничного набору даних, користувач має можливість задати шлях до цього набору у файлі. При обробці всього файлу зчитуються всі набори даних.

Змінна `Do` відбиває кількість наборів даних для обробки. Якщо необхідна якісна обробка даних, тобто з урахуванням усіх неточностей, то з файлу зчитуються секції якості даних. На наступному кроці в блоці 27 організується цикл по всіх зазначених наборах даних. У блоці 28 відбувається виклик підпрограми обробки даних. Після обробки виконується побудова необхідного набору зображень.

Розробка підпрограми обробки даних. Блок схема алгоритму обробки даних наведено на рис 4.9.

На початковому етапі в блоці 2 необхідно визначити геометрію зображення. На рисунку 4.10 представлена блок схема алгоритму визначення геометрії зображення.

Змінні `xll`, `yll`, `xur` і `yur` визначають горизонтальну і вертикальну координати нижнього лівого і верхнього правого кутів зображення відповідно. На початковому етапі ці змінні ухвалюють значення

максимальних цифр у системі. У блоці 3 установлюється крок у градусах для визначення координат кутів і змінна range, що визначає відстань від центру зображення до самої крайньої точки на даному промені.

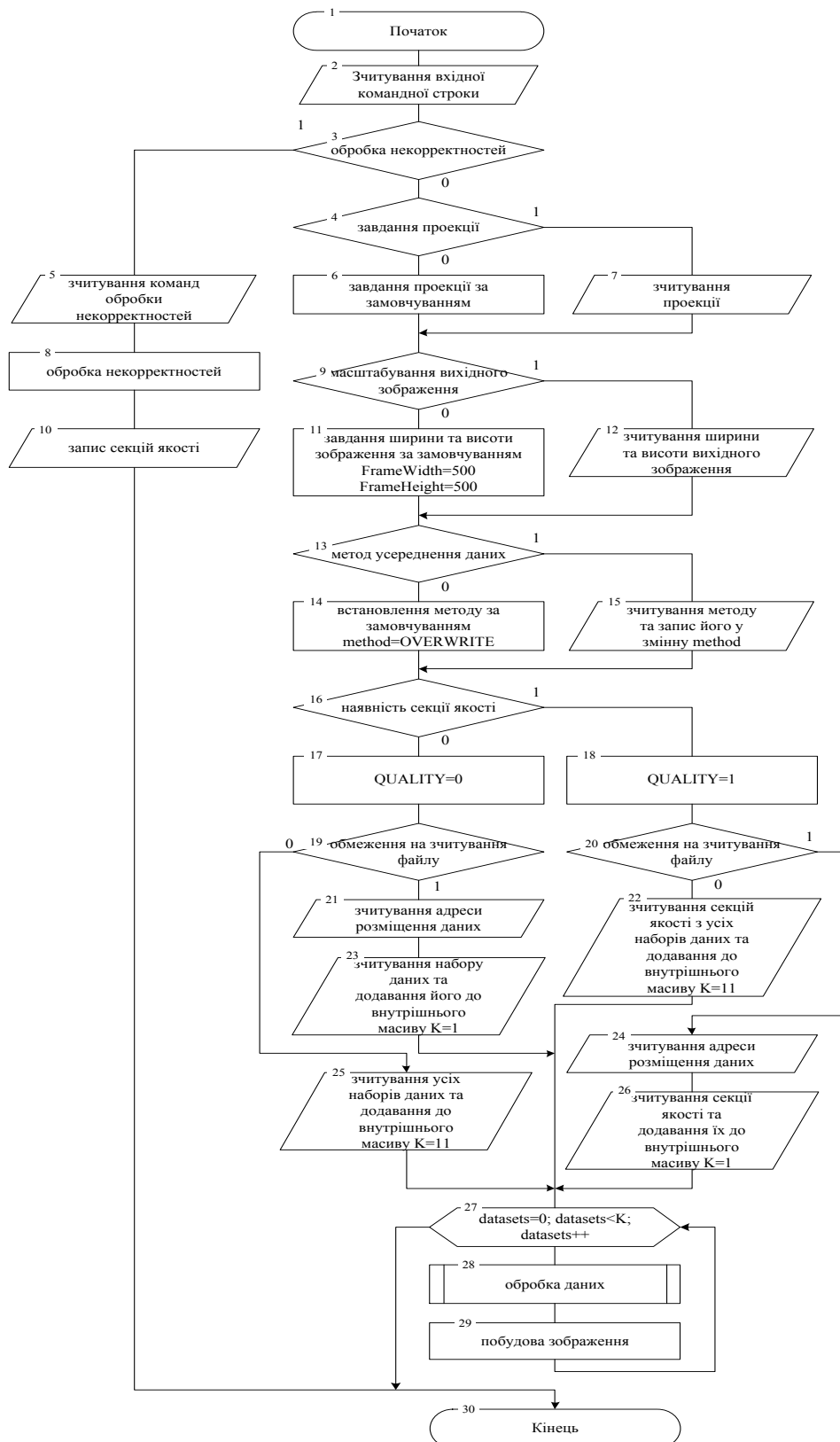


Рисунок 4.8 – Блок схема основного алгоритму функціонування системи.

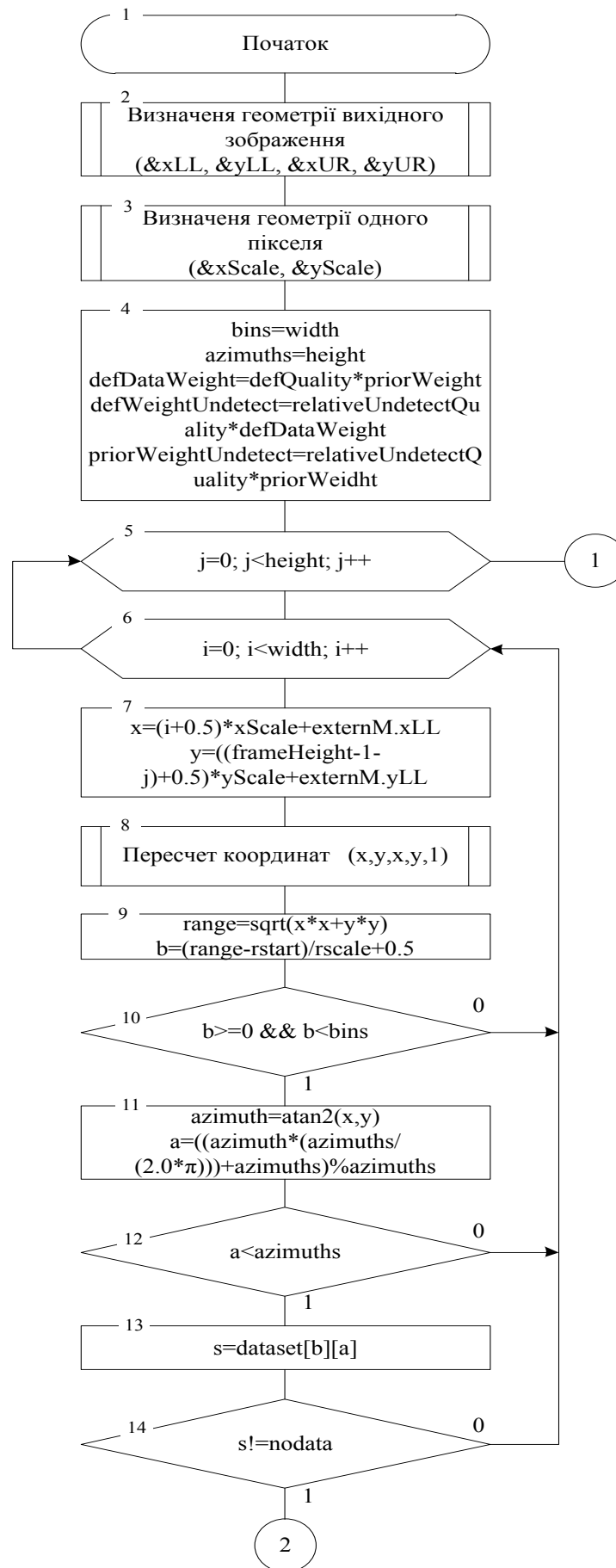


Рисунок 4.9 – Блок схема алгоритму обробки даних, аркуш 1.

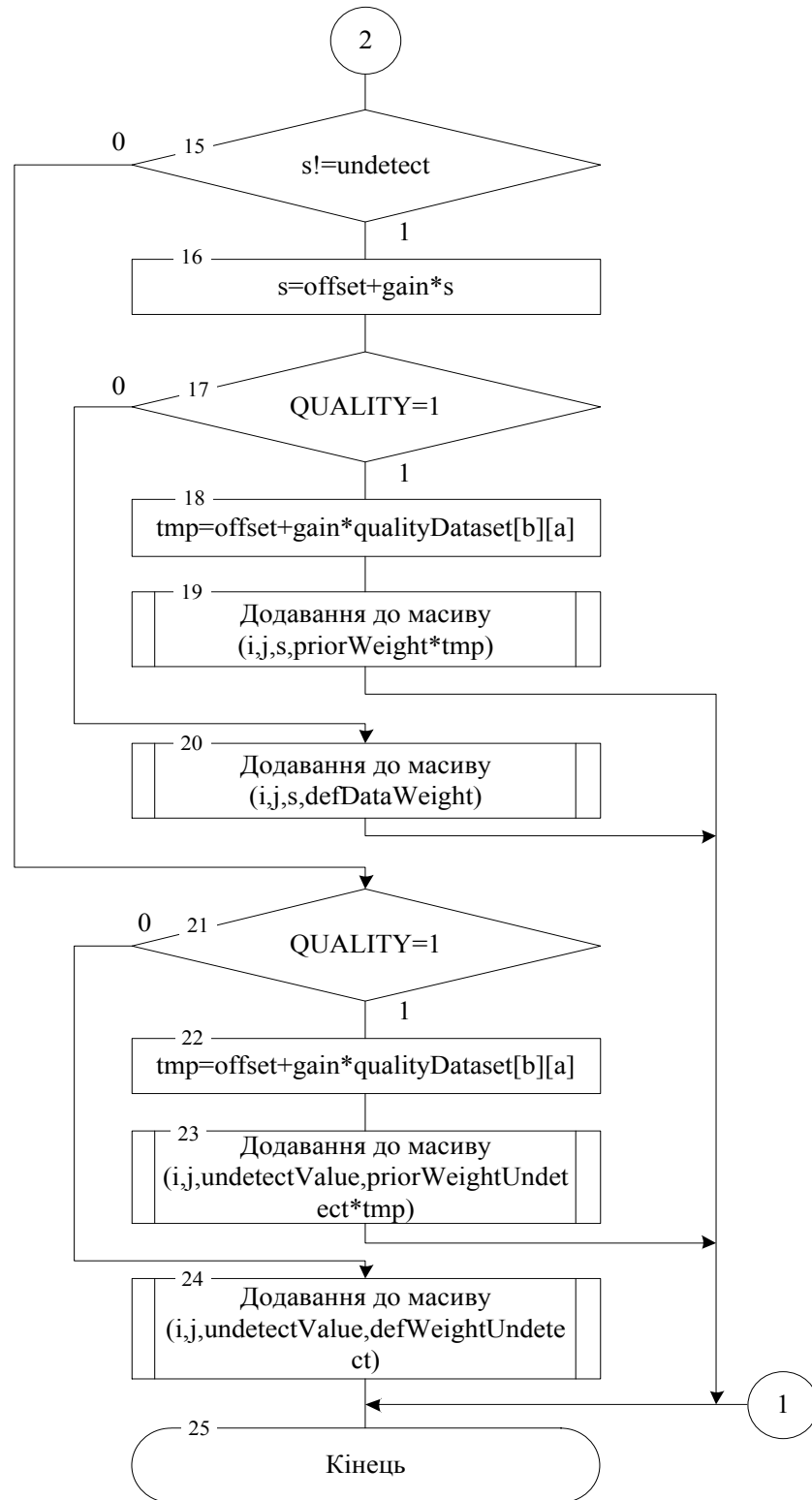


Рисунок 4.9, аркуш 2.

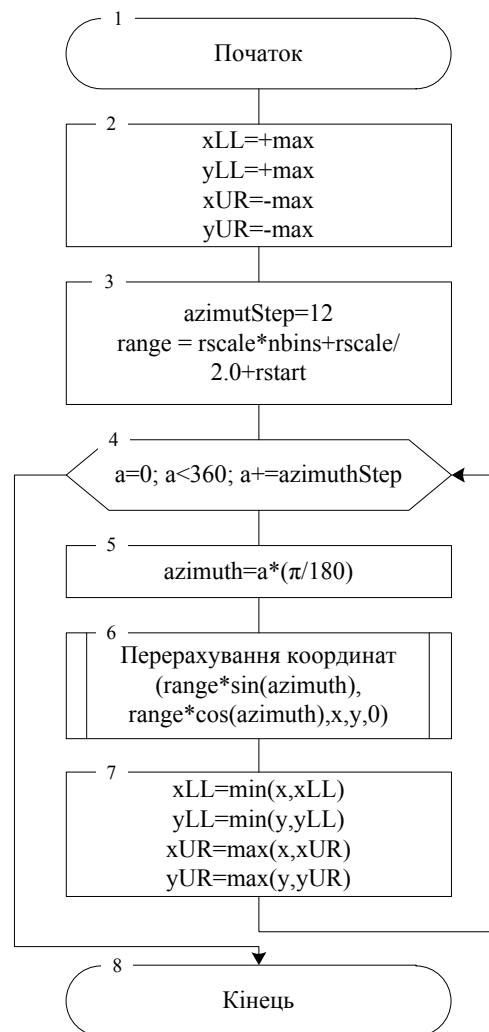


Рисунок 4.10 – Процедура визначення геометрії зображення.

У циклі виконується перерахування координат до крайніх точок по периметру. І на кожному кроці змінним xll, yll привласнюється значення мінімального результату, а змінним xur і yur максимального отриманого результату. Процедура перерахування координат здійснює перетворення між вхідною і вихідною проекціями. Це необхідний крок, оскільки, вхідні дані представляються в полярних координатах, а вихідні в декартових. В основу цієї процедури покладене використання бібліотечної функції, яка аналогічна функції `rj_transform` у бібліотеці Proj4, що має наступні параметри:

- Вхідна система координат;
- Вихідна система координат;
- Кількість точок, що вимагають обробки;
- Крок відстані від значення до значення;
- Безпосереднє значення, що вимагає обробки;

На рис. 4.11 представлено процедуру перерахування координат.

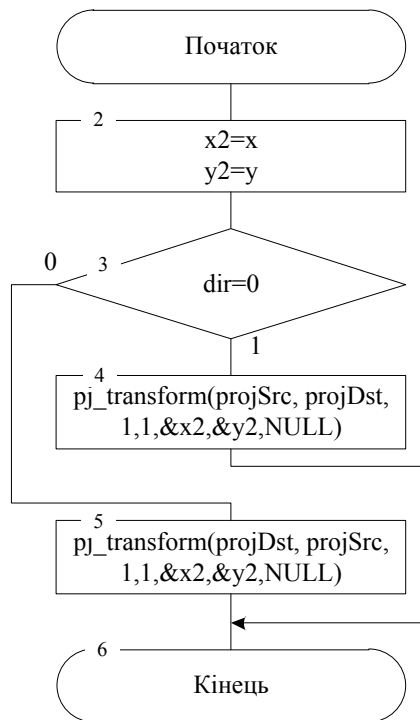


Рисунок 4.11 – Процедура перерахування координат.

Змінна *dir* відповідає за напрям обробки координат. При *dir* = 0 відбувається перетворення із вхідної системи координат у вихідну а якщо ні, то з вихідної системи координат у вхідну.

Блок 3 блок схеми обробки даних викликає процедуру визначення геометрії одного пікселя. Алгоритм цієї процедури представлено на рисунку 4.12 Блоки 2 і 3 виконують перерахування координат крайніх точок у географічні координати місцевості. Блоки 4 і 5 виконують конвертацію між вхідною і вихідною проекціями. У блоці 6 розраховується геометрія одного пікселя зображення. *xscale* відповідає за розмірність по горизонталі, а *yscale* за розмірність по вертикалі.

Блок 4 графічної схеми обробки даних визначає ряд важливих параметрів. Тут задається кількість точок на промені і кількість променів при скануванні в змінні *bins* і *azimuths*. Визначаються змінні *defdataweight*, *defweightundetected* і *priorweightundetected*, що визначають вагу даних за замовчуванням, вагу невизначених даних за замовчуванням і пріоритетну вагу невизначених даних. На наступному кроці організують цикли за всіма значеннями одного вхідного набору даних. Для кожного окремого пікселя розраховується певна точка на місцевості у блоці 7. У блоці 9 виконуються розрахунки відстані від центру зображення до обраної точки і обчислюється номер позиції значення відбивної здатності на промені, якій відповідає обрана точка місцевості.

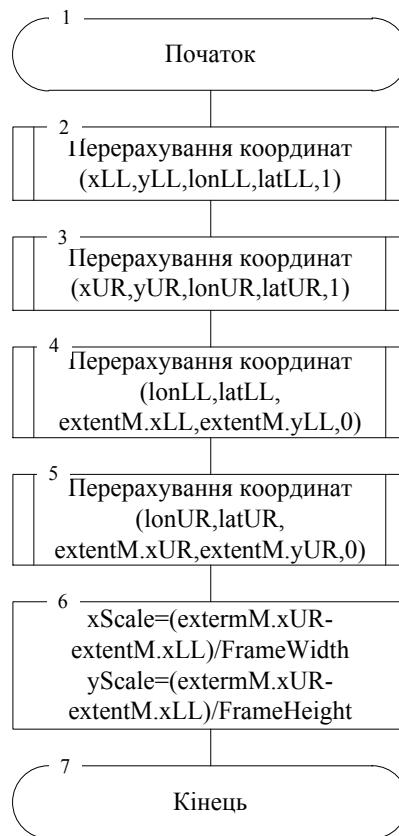


Рисунок 4.12 – Процедура визначення геометрії одного пікселя.

Блок 10 виконує перевірку чи дійсне значення позиції відбивної здатності точки на промені. При розрахунках у блоці 9 можна одержати більші значення оскільки розрахунки виконуються виходячи із квадратної геометрії вихідного зображення, а в дійсності таке зображення буде відображати місцевість певного радіуса, тобто буде мати форму кола. При дійсному значенні номера позиції на промені, виконуються розрахунки номера променя, блок 11. Обчислюється кут у радіанах між нульовим і променем, на якому лежить обрана точка з координатами x і y за допомогою бібліотечної функції atan2 . Далі обчислюється число a , що відповідає номеру променя, на якому перебуває обрана точка. У блоці 12 виконується перевірка дійсності цього значення. В змінну s зчитується значення відбивної здатності для обраної точки з координатами x , y з набору даних файлу блок 13.

Зчитані значення порівнюються зі значенням невизначеного даного блок 14 і перевіряється ознака присутності даних. При позитивному результаті порівняння в блоці 14 виконується перетворення зчитаного результату із цілочисленного типу до типу із плаваючою точкою по формулі:

$$S = \text{offset} + \text{gain} * s, \quad (4.1)$$

де s - зчитане з набору даних,

$offset, gain$ - коефіцієнти перетворення, отримані з атрибутів файлу.

У блоці 17 виконується перевірка наявності секцій якості даних у файлі за допомогою змінної $QUALITY$. Якщо доступна якісна обробка даних, то до змінної tmp привласнюється значення із секції якості, представлене в типі із плаваючою точкою по формулі 4.1 блок 18. Далі відбувається виклик процедури додавання до масиву. Вона ухвалює в якості параметрів координати i і j , а також перелічене значення і вагу цього даного. У блоці 19 у якості ваги даного передається добуток змінних $priorweight$ і tmp . При відсутності секцій якості даних процедурі додавання до масиву в якості параметра ваги даних передається значення змінної $defdataweight$ блок 20.

Якщо в блоці 15 було встановлено, що розраховане значення відповідає невизначеному значенню, то відбувається перехід до блоку 21, де перевіряється можливість виконання якісної обробки даних. Блок 22 аналогічний блоку 18. У блоці 23 процедура додавання до масиву викликається з параметрами $undetctvalue$ у якості відбивної здатності і добутку $priorweightundetct$ з tmp у якості ваги даних.

При відсутності секцій якості даних і відбивної здатності зі значенням невизначеного даного функція додавання до масиву викликається з параметрами $undetctvalue$ у якості відбивної здатності й $defweightundetct$ якості ваги даних.

На рисунку 4.13 зображена блок схема процедури додавання до масиву.

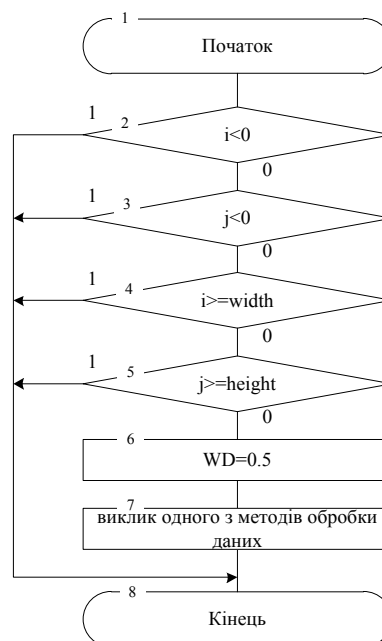


Рисунок 4.13 – Блок схема процедури додавання до масиву.

В блоках з 2 по 5 виконується перевірка переповнення границь. В блоці 6 змінної WD встановлюється вага даних за замовчуванням. В блоці 7 відбувається виклик одного з методів осереднення даних.

Блок-схеми алгоритмів осереднення даних.

У розроблювальній системі передбачено 7 методів осереднення даних:

- метод AVG,
- метод WAVG,
- метод WEAVG,
- метод MAX,
- метод MIN,
- метод MAXW,
- метод OVERWRITE.

При розрахунках по даних методах застосовується одне зі співвідношень:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}; \quad (4.2)$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N q_i x_i}{\sum_{i=1}^N q_i}; \quad (4.3)$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}; \quad (4.4)$$

$$x = \max x_i \quad (4.5)$$

$$q = q_i \quad (4.6)$$

$$x_i: q_i = \max \quad (4.7)$$

$$q = q_i \quad (4.8)$$

Якісне (p,r) середнє:

$$x = \sqrt[p]{\frac{\sum_{i=1}^N q_i^r x_i^p}{\sum_{i=1}^N q_i^r}} \quad (4.9)$$

$$q = \sqrt[r]{\frac{\sum_{i=1}^N q_i^r}{N}} \quad (4.10)$$

Блок-схеми цих методів наведено на рис 4.14 – 4.20. Кожний метод обробляє дані по одній з формул 4.2 - 4.10 і записує їх у три двовимірні масиви.

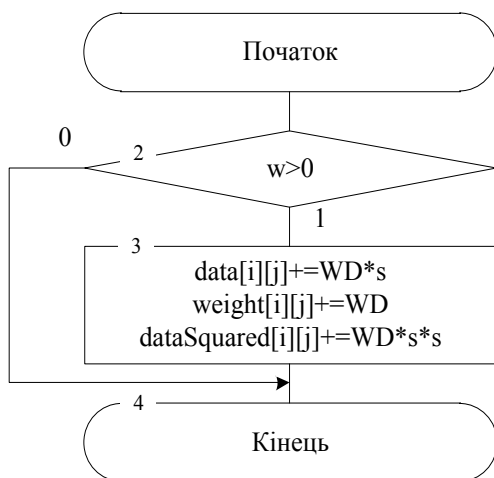


Рисунок 4.14 – Метод AVG.

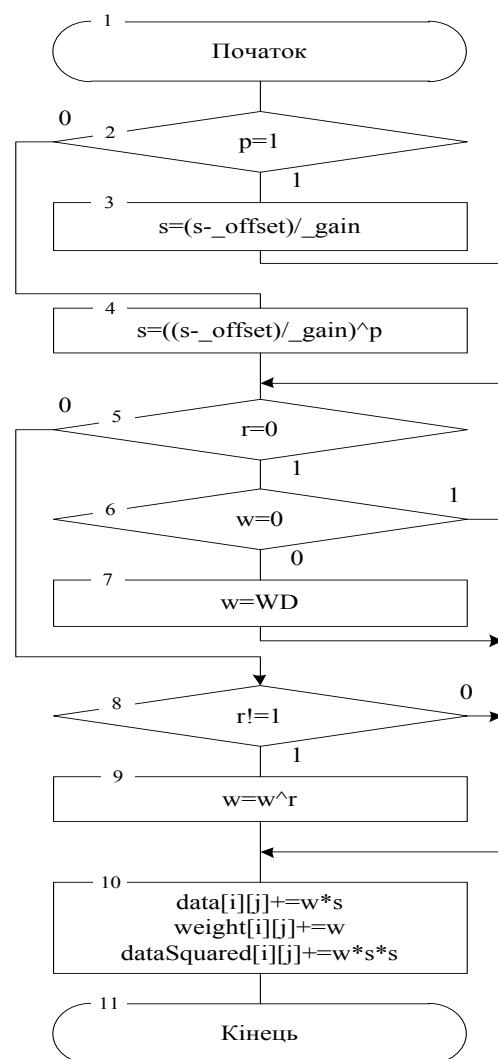


Рисунок 4.15 – Метод WAVG.

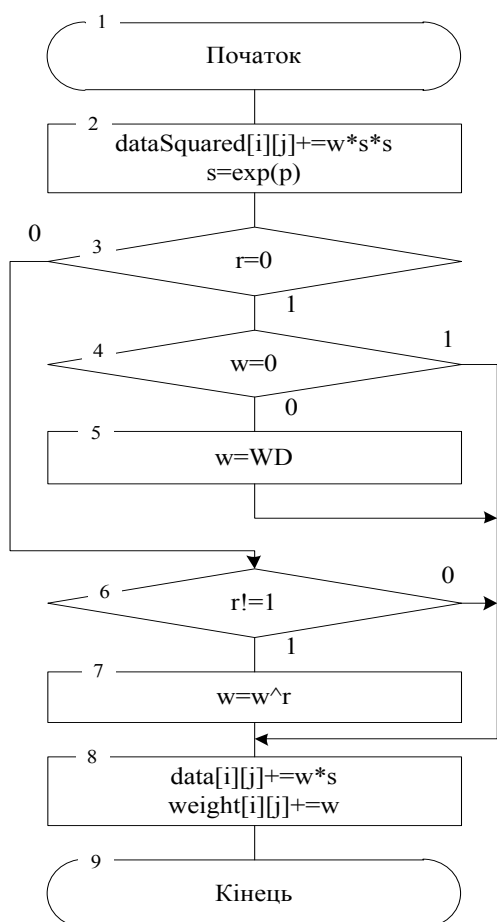


Рисунок 4.16 – Метод WEAVG .

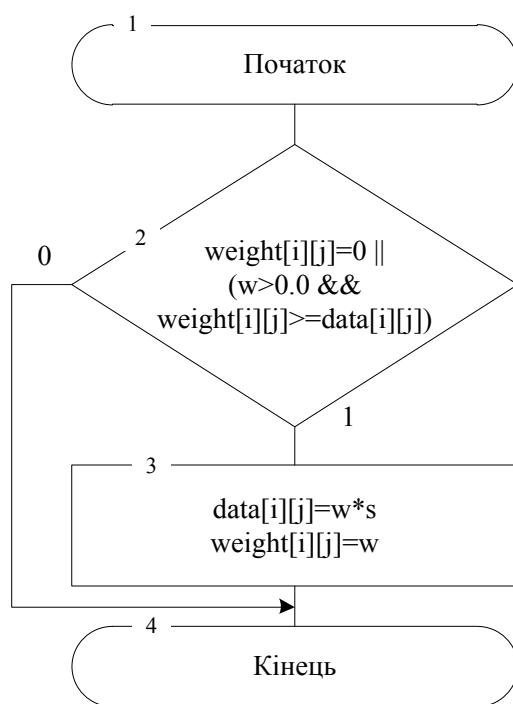


Рисунок 4.17 – Метод MAX.

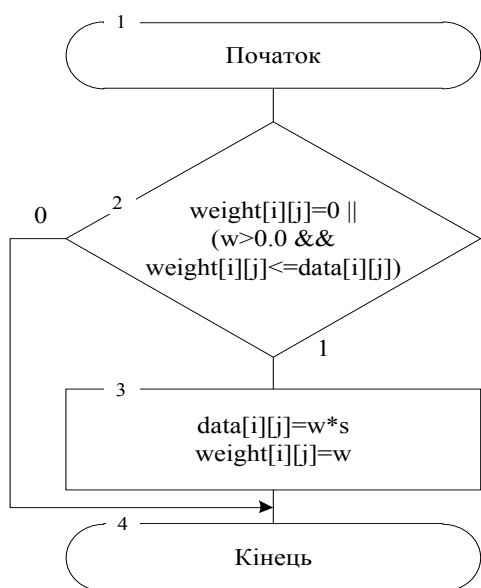


Рисунок 4.18 – Метод MIN.

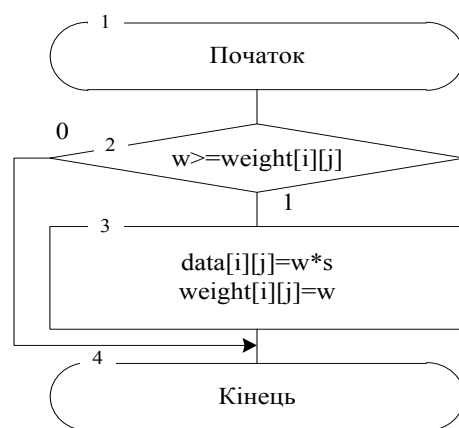


Рисунок 4.19 – Метод MAXW.

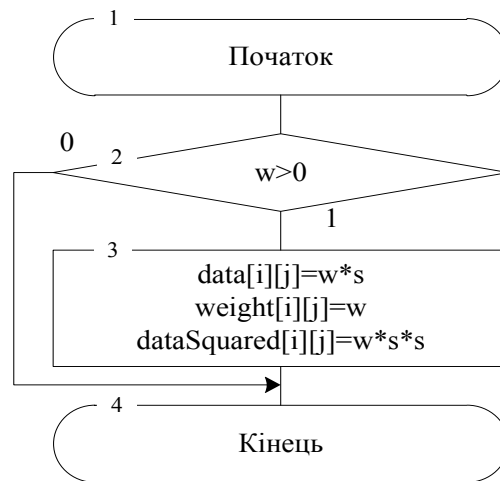


Рисунок 4.20 – Метод OVERWRITE.

4.4 Розробка алгоритмів обробки аномалій

Розробка алгоритму обробки птахів і комах. На рис.4.21 зображена блок-схема алгоритму обробки аномалій викликаних наявністю птахів і комах.

Користувачем задаються наступні параметри:

- Maxaltitude - максимальна висота;
- Devaltitude - параметр граничної функції, що визначає її крутість;
- Maxdbz - максимальна гранична інтенсивність;
- Devdbz - параметр крутості граничної функції.

У блоці 2 відбувається ініціалізація змінних вхідними параметрами. Змінна *max* висвітлює значення функції приналежності і за замовчуванням ухвалює значення 1. Блоки з 3 по 9 виконують ініціалізацію змінних, що брали участь у розрахунках двох функцій приналежності. Важливо відзначити, що значення змінної *maxd* ухвалює значення 253, щоб у випадку, коли дві функції приналежності мають значення 1, у секцію якості даних не відбувалося значення запису значення немає даних. Змінна *eta* відображає кут нахилу променя радара щодо поверхні землі.

У блоках 11 і 12 виконуються розрахунки висоти певної точки щодо поверхні, враховуючи кривизну землі. У блоці 13 відбувається виклик процедури фільтрації і виконуються розрахунки першої функції приналежності. На рисунку 4.22 зображена блок-схема алгоритму фільтрації. У загальному вигляді процедура фільтрації має такий прототип Фільтрація (&src, &dst, location, bias, scale, width). Знак "&" вказує на те, що параметр

передається процедурі по посиланню, тобто адреса змінної, при зміні такого параметра всередині процедури, зміни відбудуться і в основній програмі. Після розрахунків значення першої функції приналежності на наступному кроці виконується організація внутрішнього циклу блок 14. У блоці 15 дані зчитуються з набору даних і перевіряються на предмет невизначеності блок 16. У випадку коректності даних відбувається їхнє перетворення до типу з плаваючою комою, і викликається процедура фільтрації розрахунків другої функції приналежності. У блоці 19 виконуються розрахунки і запис у масив значення інтенсивності конкретної точки.

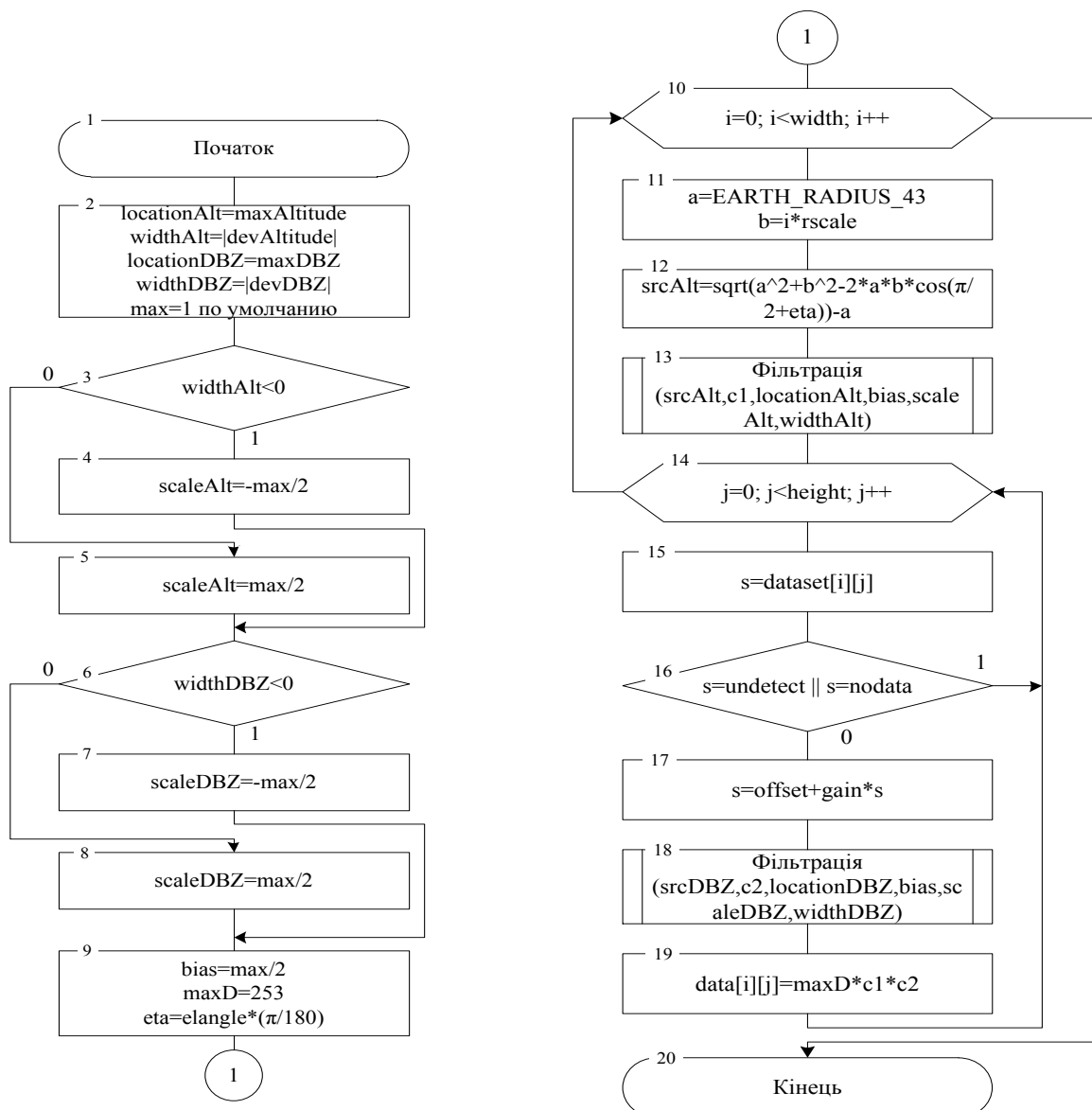


Рисунок 4.21 – Блок-схема алгоритму обробки аномалій, викликаних наявністю птахів і комах.

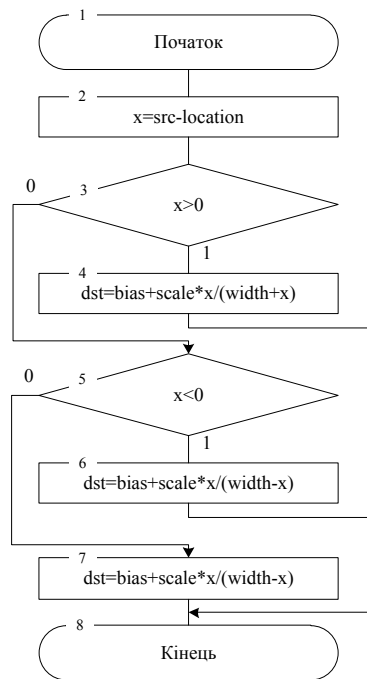
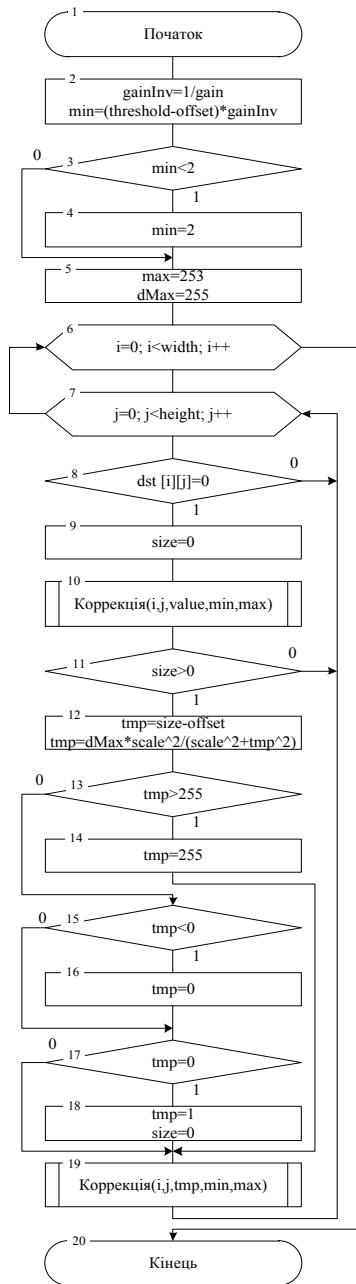


Рисунок 4.22 – Процедура фільтрації даних.

Розробка алгоритму обробки шумів. На рисунку 4.23 зображена блок-схема алгоритму обробки шумів і алгоритму корекції. У блоці 2 обчислюється зворотне значення коефіцієнта gain і визначається мінімальне граничне значення відбивної здатності. Значення змінної threshold задається користувачем. Важливо відмітити, що результуюче мінімальне значення не повинне бути нижче 2, оскільки тоді встановиться значення не даних. Коректне питання мінімального значення виконують блоки 3 і 4. Максимальне значення встановлюється константою і дорівнює 253. Далі організує два цикли з розмірністю набору даних.

Граф-схема алгоритму обробки шумів:



Граф-схема алгоритму процедури корекції:

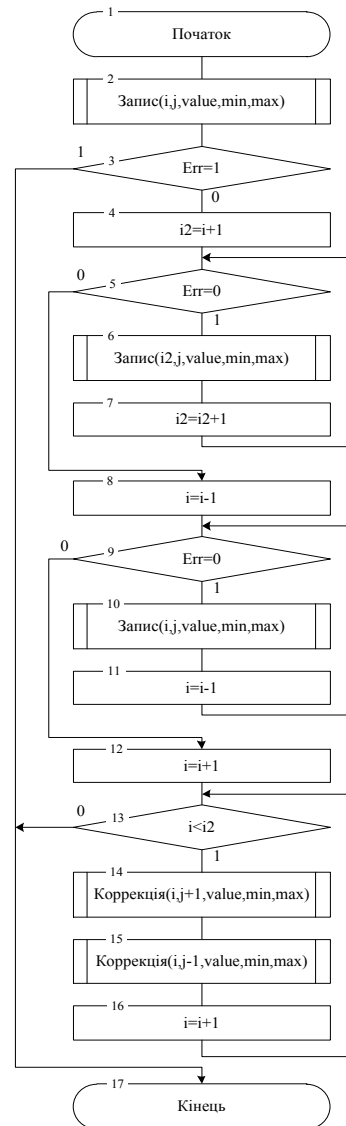


Рисунок 4.23 – Блок-схема алгоритму обробки шумів і алгоритму корекції.

У блоці 8 виконується перевірка значення вихідного масиву по координатах i, j . Змінна $size$ застосовується в якості індикатору. Вона показує скільки значень інтенсивності необхідно змінити. У блоці 10 викликається процедура корекції. Вона має наступну сигнатуру $\text{Корекція}(i, j, \text{value}, \text{min}, \text{max})$. До неї передаються значення поточної позиції в наборі даних i, j , значення, що необхідно записати, і значення мінімальної й максимальної інтенсивностей по яких відбувається фільтрація.

У процедурі корекції викликається процедура *Запис* із сигнатурою, що відповідає сигнатурі процедури корекції. Ця процедура наведена на рисунку 4.24.

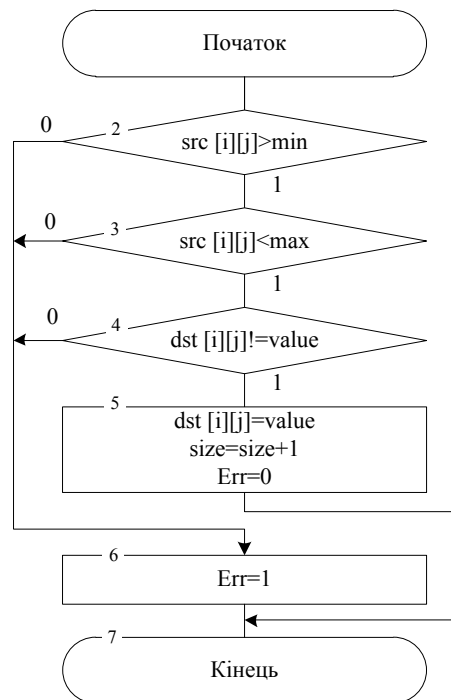


Рисунок 4.24 – Блок-схема алгоритму процедури запису.

Функція даної процедури полягає в перевірці значень відбивної здатності у вхідному файлі на предмет приналежності проміжку ($\min$; $\max$) у блоках 2 і 3. У блоці 4 виконується перевірка значення відбивної здатності у вихідному масиві до заданого значення в змінній *value*. Якщо ці значення відрізняються, то у вихідний масив записується значення, що передано в процедурі, при цьому зміни фіксуються в змінній *size* і успішне виконання процедури фіксується нулем у змінній *Err*.

При успішному виконанні процедури записи в блоці 2, процедура запису викликається в циклі для кожного сусіднього праворуч значення відбивної здатності у вхідному й вихідному масивах, доти поки значення змінної *Err* не стане дорівнювати одиниці. Далі подібна процедура виконується у зворотному напрямку щодо поточних координат у масивах, тобто вліво у блоках з 8 по 11. Процедура корекції носить рекурсивний характер, тобто у своєму тілі викликає саму себе, але з іншими параметрами у блоках з 13 по 16. Головний принцип процедури зводиться до виділення областей у вхідному й вихідному масивах навколо значень, що не входять до інтервалу ($\min$; $\max$).

На рисунку 4.25 зображений приклад виділення областей у вхідному наборі даних.

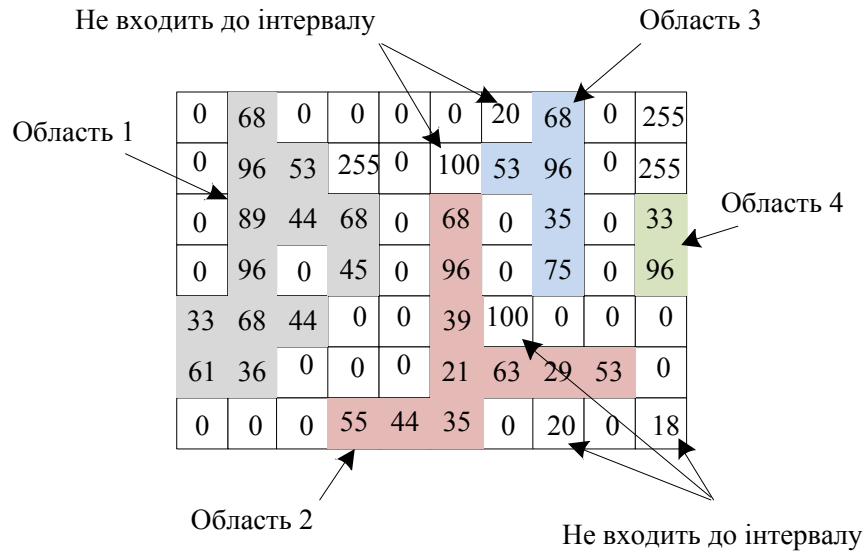


Рисунок 4.25 – Виділення областей у вхідному наборі даних.

У блоці 11 блок-схеми обробки шумів виконується перевірка значення змінної *size*, якщо її значення відмінне від 0, то це вказує на знайдену виділену область, яка вимагає корекції. У блоці 12 відбувається визначення змінної *tmp*, яка несе в собі значення, яке можливо буде записано у виділену область. У блоках з 13 по 18 відбувається перевірка значення змінної *tmp*, воно повинне перебувати в інтервалі від 1 до 255. В 19 блоці знову викликається процедура корекції, але до неї вже передається розраховане значення *tmp*.

4.5 Розробка алгоритму осереднення даних в одному dataset

Алгоритм грубого дешифрування.

Ідею алгоритму грубого дешифрування можна окреслити за допомогою рисунку 4.26. Припустимо, що задана деяка точка в полярній системі координат з кутом α і відстанню від центру координат до точки $range$ і величина R , яка задає радіус окружності з центром у точці $(\alpha, range)$. Потрібно визначити величину $d\alpha$, яка визначає максимально можливе відхилення в кутовій координаті точки, що ще попадає в площину обмеженою даною окружністю.

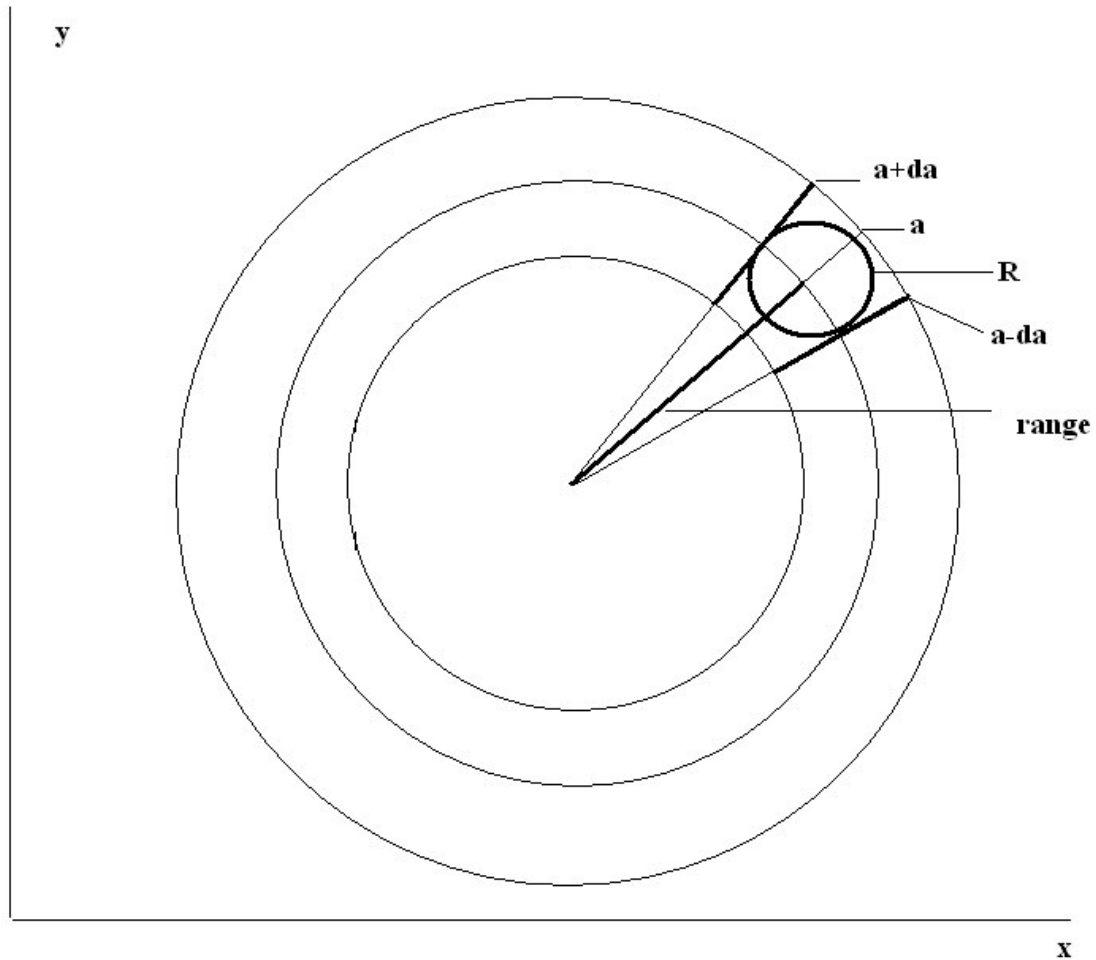


Рисунок 4.26 – Алгоритм грубого дешифрування.

При цьому додатковою вимогою є мінімальна кількість операцій які необхідно виконати для розв'язку даного завдання.

У розроблювальній системі дане завдання пропонується вирішувати табличним методом. Для цього була складена програма яка дозволила розрахувати оцінні значення da залежно від двох параметрів $range$ і R . Підсумок даних обчислень наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Таблиця грубого дешифрування

$\frac{range}{500}$	$R = 100$	$R = 200$	$R = 300$	$R = 400$	$R = 500$	$R = 600$	$R = 700$	$R = 800$	$R = 900$	$R = 1000$	$R = 1100$
1	11	20	25	30	33	36	38	39	41	43	44
2	5	10	14	18	22	25	28	31	33	36	37
3	3	7	11	14	17	19	22	25	27	30	32
4	2	5	8	11	13	16	18	20	23	25	28

Продовження табл. 4.2

5	2	4	6	9	11	13	15	17	20	22	24
6	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
7	1	3	4	6	8	9	11	13	14	16	18
8	1	2	4	5	7	8	10	11	13	14	15
9	1	2	3	5	6	7	8	10	11	12	14
10	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12
11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	0	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9
14	0	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9
15	0	1	2	3	3	4	5	6	6	7	8
16	0	1	2	2	3	4	5	5	6	7	7
17	0	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7
18	0	1	1	2	3	3	4	5	5	6	7
19	0	1	1	2	3	3	4	4	5	6	6
20	0	1	1	2	2	3	4	4	5	5	6
21	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6
22	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
23	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5
24	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5
25	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5
26	0	0	1	1	2	2	3	3	3	4	4
27	0	0	1	1	2	2	2	3	3	4	4
28	0	0	1	1	2	2	2	3	3	4	4
29	0	0	1	1	1	2	2	3	3	3	4
30	0	0	1	1	1	2	2	3	3	3	4
31	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	4
32	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	3
33	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	3
34	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	3
35	0	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3
36	0	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3
37	0	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3
38	0	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3
39	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3
40	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3
41	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	3

Продовження табл. 4.2

42	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	3
43	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2
44	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2
45	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2
46	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2
47	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2
48	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2
49	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2
50	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2
51	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2
52	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2
53	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2
54	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2
55	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2
56	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2
57	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2
58	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
59	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
60	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
61	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
62	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
63	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
64	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
65	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
66	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
67	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
68	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
69	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
70	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
71	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
72	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
73	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
74	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
75	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
76	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
77	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
78	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

Продовження табл. 4.2

116	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
122	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Відзначимо, що на перетині кожного рядка і стовпця стоїть величина da в градусах.

Алгоритм осереднення

В даній системі для розв'язку завдання осереднення даних і заданим користувачем радіусом осереднення пропонується доповнити блок 16 у блок схемі алгоритму обробки даних представленого на рис. 4.8.

В даному блоці проводиться перерахування даних згідно з формулою (4.1).

Алгоритм перерахування в цьому випадку можна описати за допомогою наступного псевдокоду, який представлено в лістингу 4.1.

Лістинг 4.1. – Алгоритм перерахування даних dataset з урахуванням радіуса осереднення.

```

s=0; n_s=0;
for iu=-db:1:db
    for ju=-da:1:da
        b_temp=b+iu; a_temp=(a+ju/360);
        if (b_temp>=1) && (b_temp<=bins)

```

= зчитування значення s_temp dataset з індексами b_temp і a_temp;
якщо виконується умова точного дешифрування тоді

```
s=s+s_temp;
```

```
n_s=n_s+1;
```

```
    end;
```

```
end;
```

```
= визначення середнього значення =
```

```
u=s/n_s;
```

Визначення да відбувається по радіусу осереднення і відстані до точки з таблиці грубого дешифрування.

5 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Моделі якості повітря і хімічного прогнозу погоди (CWF) використовують метеорологічні поля і зовнішні граничні умови, як драйвери для моделювання хімічних перетворень і переносу в атмосфері [1]. Комплексний аналіз оперативних регіональних CWF моделей у Європі наведено в роботі [25]. В цьому огляді було обрано 18 моделей, які широко використовуються в практиці і забезпечені відповідною науково-технічною документацією. Однак, тільки три з них, Enviro-Hirlam, Wrf-chem і Sk-Iron/Dust мають вбудовані блоки із двосторонніми взаємодіями, що дозволяє розглядати зворотні зв'язки між хімічними і метеорологічними процесами на кожному часовому кроці інтеграції моделі.

Складність чисельних моделей атмосфери, через намагання якомога і детальніше і ширше обчислювати атмосферні процеси, дає певну впевненість в тому, що вони дуже близькі до реальних умов. Докладні розробки різних блоків моделі, таких як покращення параметризації фізичних процесів часто є перспективним способом одержання додаткової точності опису атмосфери. Тоді як недостатнє розуміння природних процесів в комбінації з неврахуванням нелінійних взаємодій між різними блоками моделі іноді призводить до погіршення справджуваності прогнозів. Інакше кажучи, вдосконалення в області моделювання дрібних деталей конкретного процесу може змінити загальну продуктивність моделі на гірше.

В мезомасштабних чисельних моделях прогнозу погоди (ЧМПП), підходи до моделювання ефектів впливу аерозолів суттєво відрізняються від ситуації в глобальному моделюванні клімату. В останньому, аерозольна параметризація опирається на інформацію про аерозолі в статистичному і кліматологічному вигляді. Більш правильне уявлення аерозольних ефектів в чисельних моделях прогнозу погоди вимагає докладного опису властивостей аерозолів поряд із тривимірними масивами концентрацій аерозолів з високим просторовим розподілом. Засвоєння в моделях прогнозу погоди інформації про хімічні домішки/елементи, у тому числі і аерозолі, являє собою додаткову проблему [26].

Модель HARMONIE є одним із самих потужних інструментів для чисельних прогнозів стану атмосфери на мезомасштабах. Це негідростатична спектральна модель, здатна описувати процеси конвекції, в якій за умовчанням розподіл по горизонталі складає 2,5 км. Динамічне ядро, створене робочою групою ALADIN, базується на дворівневій напівнеявній напівлагранжевій схемі дискретизації повністю пружних рівнянь (у

відповідності до теорії пружності), з використанням гібридної координатної сітки з 65 рівнями по вертикалі. Різні фізичні процеси підсіткового масштабу враховуються за допомогою різних схем параметризації. Крім того, модель містить хімічний і аерозольний блоки з різними схемами врахування/обчислення аерозолів, а також фонові значення кліматологічних концентрацій аерозолів [27]. Модель використовує пряму інформацію про формування і розмивання хмарності з Інтегрованої Прогностичної Системи Європейського Центру Середньострокових Прогнозів Погоди (ІПС ЄЦСПП) IFS з урахуванням складних взаємодій між хмарними процесами, багатокомпонентною хімією і змінами вологості. Модель може відтворювати високу часову і просторову мінливість розподілу мас аерозольних часток, але для розрахунків радіаційних ефектів необхідно також знати розподіл цих часток в залежності від їх розмірів.

Останнє зауваження перебуває в зоні особливої уваги консорціуму HIRLAM. Крім того, кількість і розмір первинних аерозолів залежать від їхнього початкового розподілу по розмірах, типів джерел, процесів росту і їх видалення. В моделі HARMONIE є параметр, що відображає концентрацію аерозолів, розроблений для пилових часток і для морських аерозолів. Опис концентрації аерозольних часток для сульфатів і вторинної органіки набагато складніший, оскільки розподіл їх розмірів залежить від гранулометричного складу аерозолів, які були присутні до конденсації і від мікрофізичних процесів, що протікають у хмарах. Однак, в цілому, модель дає можливість вивчити роль аерозолів в атмосфері і оцінити їхній вплив на фізичні процеси, у тому числі на радіацію та опади.

5.1 Методологія

Загальний підхід. Для вивчення впливу аерозолів на зміни атмосферної мезомасштабної циркуляції і дослідження основних фізичних механізмів дії аерозолів на розвиток тривимірних метеорологічних структур з використанням моделі HARMONIE (Hirlam Aladin Regional/Meso-scale Operational NWP In Europe) виконуються наступні практичні кроки: (I) установка, настроювання внутрішньої конфігурації та ініціалізація моделі для регіону, що охоплює позатропічні широти; (II) вибір періоду(-ів) активного опадоутворення і інтенсивного їхнього випадання; (III) підготовка граничних умов для метеорологічних і аерозольних полів; (IV) підготовка спостережень для паралельного порівняння з результатами моделювання;

(V) запуск моделі HARMONIE в системі ECMWF HPC з трьома режимами для аерозолів: їх аерозолі в атмосфері задані кліматичними полями, атмосфера без аерозолів і моделювання з модифікованими концентраціями аерозолів; (VI) візуалізація, аналіз і оцінка результатів моделювання в порівнянні з спостережуваними величинами атмосферних полів (температури повітря, вертикальної складової швидкості вітру, опадів, турбулентної кінетичної енергії, питомої вологості) і аерозольних полів (морських і органічних аерозолів), і (VII) вивчення тривалості життя конвективних осередків з особливою увагою на процеси зворотних зв'язків між аерозолями і фізичними змінними, фізичні і динамічні механізми, відповідальні за прямі і непрямі аерозольні ефекти.

Чисельні експерименти. В моделі HARMONIE (версія 38h1.2) ініціалізація містить в собі виділення областей, що охоплюють європейські позатропічні регіони з горизонтальним розділенням 2,5 км, 65 рівнями по вертикалі, і кроком за часом 60 сек. Завчасність прогнозу варіюється від 24 до 72 годин із проміжним виведенням результатів кожні 1 або 3 години. Граничні і початкові умови ґрунтуються на тривимірних полях ІПС ЄЦСПП, які обновлюються кожні 3 години. Щоб уникнути можливих додаткових збурювань прогностичних полів від спостережених величин, асиміляція даних відключена. При моделюванні динаміки вибирається опція негідростатичного прогнозу і AROME пакет для розрахунків фізичних параметрів. Пакет SURFEX забезпечує інтерфейс для моделювання поверхневих процесів. Базовий набір параметрів моделі дозволяє розрахувати мезомасштабні конвективні атмосферні процеси з високим розділенням. В пакеті опису фізики AROME [28] у відкритому доступі перебувають схеми більш ніж 25 мікрофізичних процесів. Опис турбулентності заснований на прогностичних рівняннях турбулентної кінетичної енергії (ТКЕ) запропонованих у роботі [29]. ТКЕ рівняння поєднується з діагностичним шляхом перемішування. Схема, що відображає "дерево" фізичних процесів у блоці AROME показано на рисунку 5.1.

(<https://www.gmes-atmosphere.eu/>), коли дим від вогню розповсюдився на значну частину Європейського континенту. Результати моделювання візуалізуються та аналізуються по основних метеорологічних параметрах (температурі повітря, турбулентній кінетичній енергії та питомої вологості на різних висотах, конвективної доступної потенційної енергії, потокам коротко- і довгохвильової радіації на верхній границі атмосфери та біля підстильної поверхні; опадів біля поверхні) для обраної дати. Подальший аналіз впливу аерозолів на атмосферні характеристики ґрунтується на розрахованих відмінностях між результатами різних типів експериментів.

У модельних експериментах був використаний регіон, що охоплює Північну Атлантику, Європу й Північну Африку. Розміри цього регіону становлять 450 x 360 вузлів сітки з горизонтальним розділенням 25 км. Завчасність прогнозу становила 120 годин з кроком за часом 120 секунд. Початкові та граничні умови задавалися по глобальній моделі ІПС ЄЦСПП з інтервалом 3 години. Завдання граничних умов імітує поведінку оперативного прогону. Оскільки розрахунки виконувались на сітці грубого розділення, то застосовувалася фізика ALARO. Процеси на підстильній поверхні описувалися програмою SURFEX, реалізованою як блок моделі HARMONIE.

Для чисельного експерименту і аналізу впливу аерозолів був обраний період з 8 по 16 серпня 2010 року з активним опадоутворенням над Скандинавією (позатропічна зона Північної півкулі). Синоптична ситуація того періоду характеризувалася фронтальною системою, що швидко рухається, і просувається на північний схід (Рис. 5.2а,б). Активна улоговина області низького тиску, яка розширювалася, зберігалася в межах усієї тропосфери. Широкий гребінь високого тиску на більш низьких рівнях простягся від Азорського антициклону на північний схід до Європи. Інтенсивна взаємодія між областями високого і низького тиску спостерігалась від поверхні землі до верхньої тропосфери.

Другий ряд прогонів, який виконувався для вивчення взаємодії вуглецевих аерозолів (сажа) з фізичними процесами в атмосфері під час російських лісових пожеж 2010 року був проведений над регіоном Північної Європи в період з 8 по 10 серпня 2010 року. Ця область була обрана з декількох причин. По-перше, цей регіон регулярно використовується в оперативній роботі з вже підготовленими необхідними фоновими статистиками [30] для засвоєння даних.

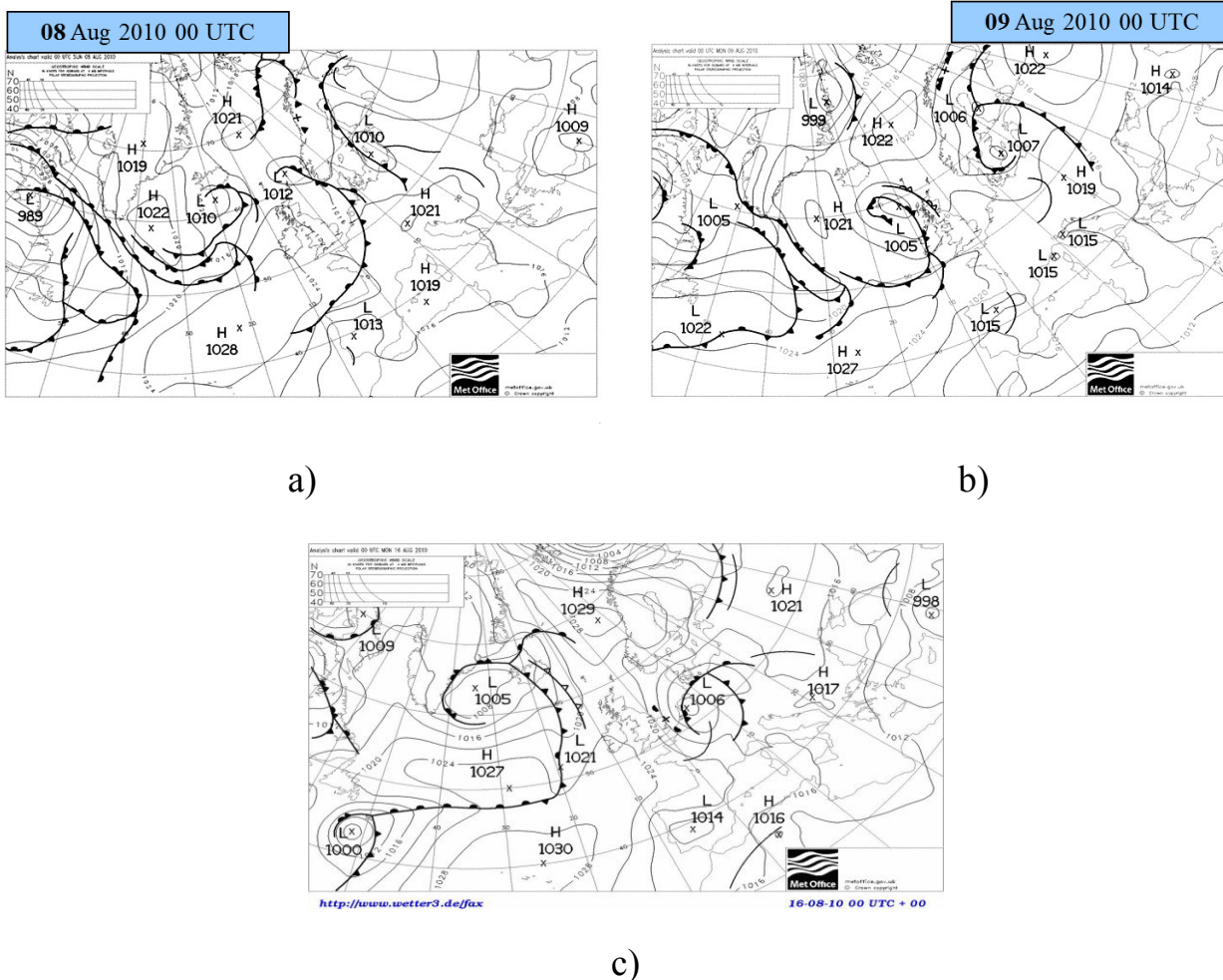


Рисунок 5.2 – Приземна карта метеорологічних умов 8-9 серпня (a,b) та 16 серпня (c) 2010, 00 по UTC (джерело: <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxsem.html>).

По-друге, над районом, що охоплює Балтійське море та всю Скандинавію проводився експеримент в рамках проекту BALTRAD (<https://baltrad.eu>) з інтенсивним радіолокаційним зондуванням. Висока роздільна здатність радіолокаційних даних, отриманих у ході експерименту, що містять дані про відбивну здатність атмосфери дозволяє здійснювати перевірку результатів моделювання та визначати систематичні помилки моделі для подальших досліджень. Як показують синоптичні карти, дим від лісових пожеж має адвективну тенденцію по напрямку на схід, але можна помітити також антициклонічну циркуляцію і його розповсюдження через Балтійське море на північні країни. Нарешті, деякі синоптичні структури супроводжувалися дощовими опадами різного ступеня і в цей період мали місце на всій досліджуваній області. Це забезпечило належну основу для чисельних експериментів по дослідженню життєвого циклу опадів при різних

зовнішніх умовах і для настроювання в моделі параметрів взаємодій аерозолі-фізика.

Чисельні експерименти були проведені з тими ж початковими і граничними умовами, що і у проєкті BALTRAD, але з різними концентраціями аерозолів. Вони включали як їхні нульові та кліматичні значення, так і збільшені вмісти сажі та органічних речовин. Крім того, була почата розробка частини коду програми і пов'язані з нею команди для послідовної асиміляції (засвоєння) даних про аерозолі із системи моніторингу MACC (<https://www.gmes-atmosphere.eu>).

Дослідження "морських аерозолів" було присвячено питанням документування їх ролі в атмосферних процесах шляхом порівняння прогностичних полів з ряду експериментів протягом 11-16 серпня 2010 р. над Північною Атлантикою і Європою. Літні атмосферні умови характеризувалися типовою синоптичною ситуацією (рис. 5.2с). Активна область низького тиску, з декількома локальними центрами біля поверхні землі, переважала у всій тропосфері. Відносно сухі та холодні арктичні повітряні маси були відділені полярним фронтом від теплого субтропічного повітря. Динамічна активність уздовж лінії фронту створювала сприятливі умови для циклогенезу над Західною Атлантикою. Поглиблення і поширення циклонічних баричних утворень викликало значне посилення вітру до 20-25 м/с поблизу поверхні океану та розвиток струминних течій у верхній тропосфері. Разом із фронтальними системами переміщувалися і пов'язані з ними області опадів.

Низхідний потік холодного і сухого повітря підсилює процеси на лінії фронту і загострює контрасти температури біля поверхні океану до $\sim 8-10^{\circ}\text{C}$ за лінією фронту. Тропосферна дивергенція створює сприятливі динамічні умови для подальшого поглиблення області низького тиску і його просування на північний схід. Однак, потужний антициклон над Росією блокує це поширення на схід. В результаті, високий циклон з приземним тиском в центрі 1006 гПа і відповідним йому холодним ядром (-20°C) на рівні 500 гПа стаціонує над Францією. Регулярний приплив холодного повітря в тилівій частині циклонів і теплий потік у східній частині регенованого вихору супроводжується рясними опадами (більш 8 мм/годину) над Центральною Європою, особливо в альпійському регіоні. Широкий гребінь високого тиску від Азорських островів поширюється на північний схід. Це створює сприятливі умови для переносу теплих субтропічних повітряних мас з Південної Європи, які згодом стали причиною пожеж в Іспанії і Португалії. Область зі значними градієнтами тиску створює спрямований до північного сходу потік повітря від східного узбережжя

Північної Америки. Інтенсивна взаємодія між повітряними масами із протилежними характеристиками відбувається в шарі від поверхні землі до верхньої тропосфери.

5.1.1 Аналіз отриманих результатів

Коротко - і довгохвильова радіація. Результати моделювання показали очевидний вплив аерозолів на результати чисельних експериментів для всіх метеорологічних параметрів. Аналіз проводився на основі різниці між прогностичними полями для двох прогонів моделі, тобто "контрольний прогін" (при "чистій" атмосфері) мінус "аерозольний прогін" (кліматична концентрація аерозолів).

Потоки короткохвильового випромінювання на верхній границі атмосфери (ВГА) після 24 годинного прогнозу більші в атмосфері з аерозолями. Від'ємні значення, величиною близько 1×10^6 Вт/м² переважають над усім регіоном (рис. 5.3а). Біля поверхні спостерігається протилежний ефект (див. рис. 5.3в), тут значення змінюються від 0,5 до 1×10^6 Вт/м² до максимального 3×10^6 Вт/м².

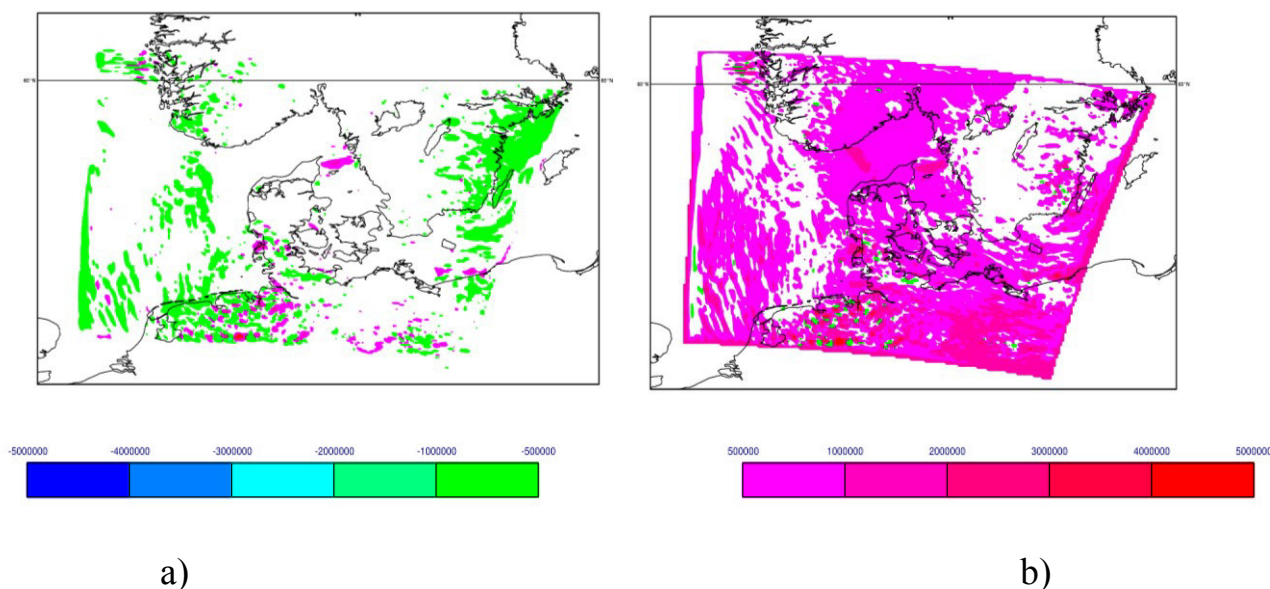


Рисунок 5.3 – Різниця в результатах моделювання по моделі HARMONIE ("контрольний" прогін мінус "кліматичний" прогін) потоків сумарної короткохвильової радіації (в Вт/м²) в (а) верхній атмосфері і (б) біля поверхні 8 серпня 2010, 21.00 за Гринвічем.

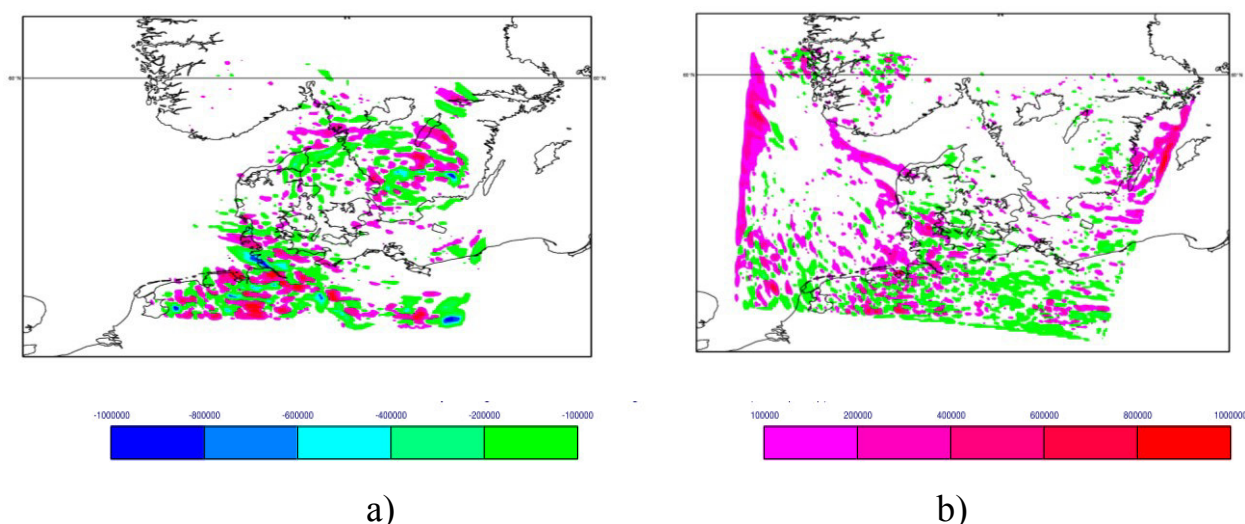


Рисунок 5.4 – Те, що і на рис. 5.3, але для довгохвильової радіації (в Вт/м²).

Різниця значень для довгохвильової радіації показує більш складну поведінку. Вона є менш однорідною у випадку наявності аерозолів. Зокрема, на ВГА і біля поверхні землі ця різниця проявляється у вигляді дрібномасштабних осередків протилежних знаків. Для ВГА, в середньому ця різниця коливається близько $\pm 4 \times 10^5$ Вт/м² (рис. 5.4) і найчастіше спостерігається в континентальних районах. Поблизу поверхні, осередки поширюються по всій розрахунковій області, і їх величина змінюється подекуди на кілька порядків.

Температура повітря й питома вологість. Максимальний вплив аерозолів на поля температури повітря спостерігається у верхній тропосфері (рис. 5.5a), де середня різниця температур міняється в межах від -2 до +2°C і в основному відноситься до континентальних районів. Найбільші додатні значення спостерігаються за фронтальною зоною в холодних повітряних масах з Арктики. Температура повітря в цьому шарі є більш теплою при наявності аерозолів. З іншого боку, цей ефект є зворотним і більш слабким в граничному шарі атмосфери (ГША), де перепади температур варіюються від -1 до +1°C, і переважають від'ємні значення, зокрема над півднем Швеції (рис. 5.5c). Області відхилення в ГША покривають лише близько 15% загальної площі у верхній тропосфері. Близьче до підстильної поверхні аерозольний вплив на температуру стає незначним: слабкі від'ємні значення відзначаються в південній частині регіону в континентальній зоні (рис. 5.5b-5.5d).

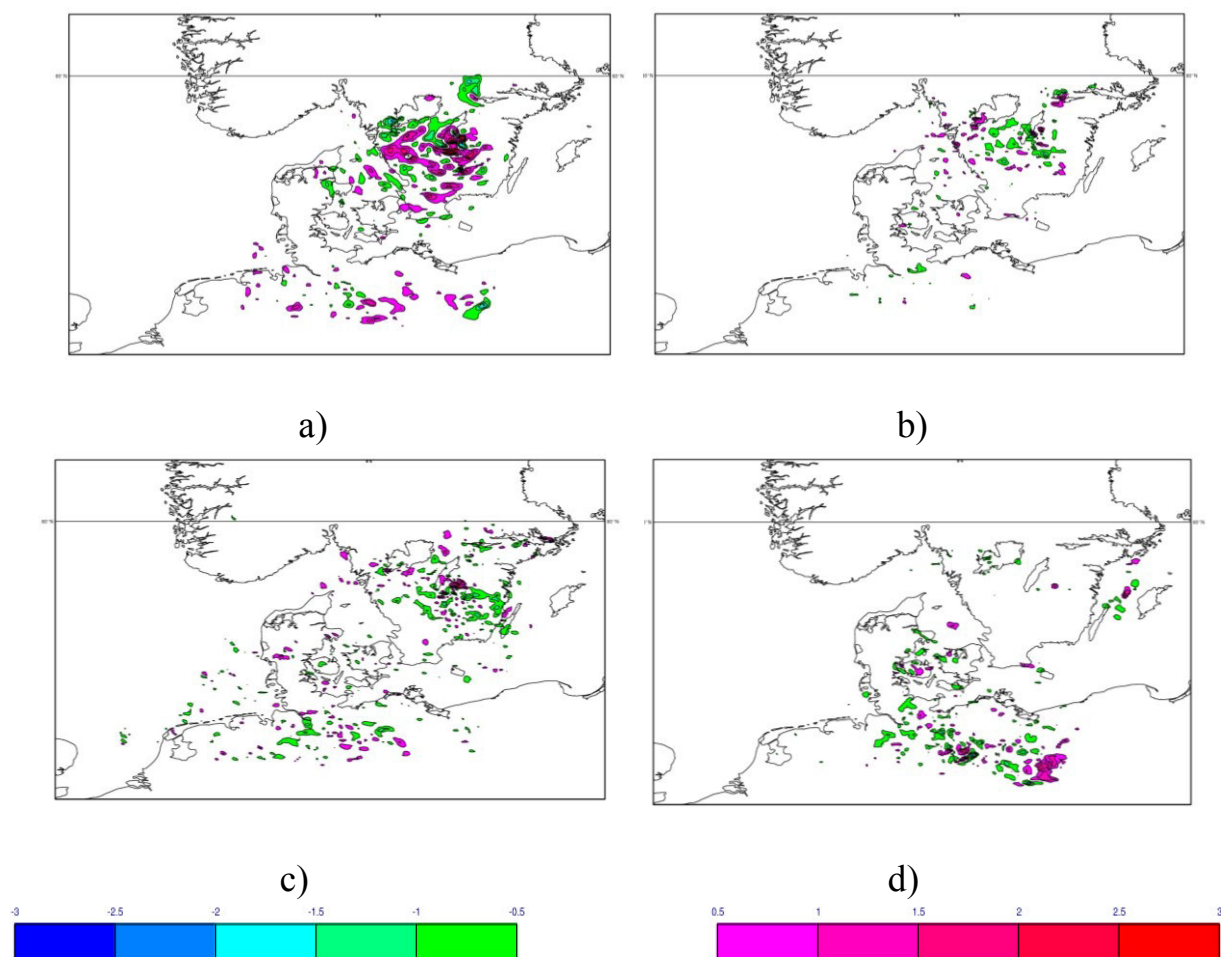


Рисунок 5.5 – Те, що і на рис. 5.3, але для температури повітря (в °C) на висотах (a) 10 км, (b) 5.5 км, (c) 1.5 км, і (d) 100 м

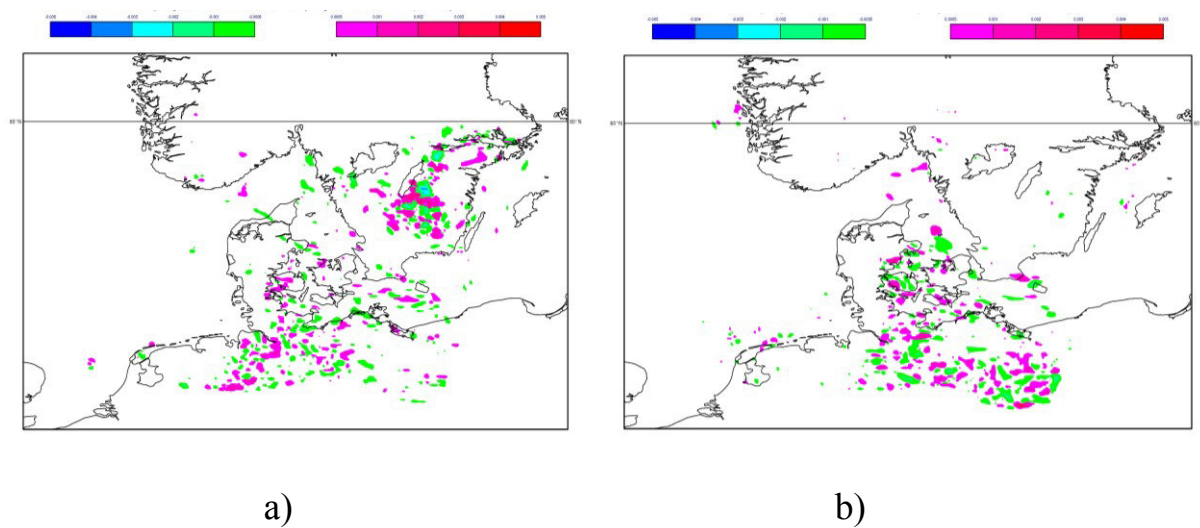


Рисунок 5.6 – Те, що і на рис.5.3, але для питомої вологості (в г/кг) на висоті (a) 1.5 км, (b) 100 метрів.

Модельне поле питомої вологості також чутливе до атмосферних аерозолів. Просторовий розподіл різниць питомої вологості над сушею і морськими акваторіями схожий на поведінку різниць температур у нижній тропосфері (рис. 5.6). Величина різниць вологості змінюється в межах від -1 г/кг до +1 г/кг і також чергується у вигляді мезомасштабних осередків протилежних знаків. В сусідніх областях над півднем Швеції з максимальними і мінімальними значеннями ця різниця досягає ± 4 г/кг і географічно співпадає з різницями температур.

На рис. 5.7а показана різниця між прогонами моделі для накопичених (сумарних) опадів. Як видно з рисунка, різниця в середньому становить близько 20 мм, а у зоні фронту вона збільшується до +60 мм. Така розбіжність може бути пояснена тим фактом, що аерозолі створюють умови для більш тривалого періоду опадоутворення, діючи в якості додаткових хмарних ядер конденсації, і змінюють час існування дощових осередків. В результаті виникає так звана "фазова помилка", яка зростає в процесі моделювання.

Вертикальна швидкість, кінетична енергія турбулентності і конвективна доступна потенційна енергія.

Вплив аерозолів на вертикальну швидкість поблизу підстильної поверхні дуже малий, але стає відчутним і зростає вище 300 метрів. Починаючи з цього рівня різниці висхідних потоків окремих осередків досягають додатних значень близько 1 м/с (рис. 5.7b). В середній тропосфері додатна різниця збільшується до +3 м/с і охоплює більші території. Від'ємні різниці з'являються в межах того ж шару, зменшуючись приблизно в три рази, але при цьому займаючи більші території. Варто відзначити, що найбільший вплив аерозолів спостерігається над Південною Швецією, де відбувається активна взаємодія холодних арктичних і теплих вологих субтропічних повітряних мас. Вище середньої тропосфери вертикальна швидкість не чутлива до присутності аерозолів.

Можна очікувати, що похідна характеристика атмосфери, така як конвективна доступна потенційна енергія (КДПЕ), повинна бути узгоджена з вертикальною швидкістю. Однак, зв'язок не такий очевидний. Зокрема, різниці для КДПЕ (рис. 5.8а) більш значні і займають більші площі в порівнянні з площами, зайнятими аналогічними різницями вертикальних швидкостей. Середні значення змінюються від -200 до +400 Дж/кг, і досягають +900 Дж/кг в інтенсивній фронтальній зоні.

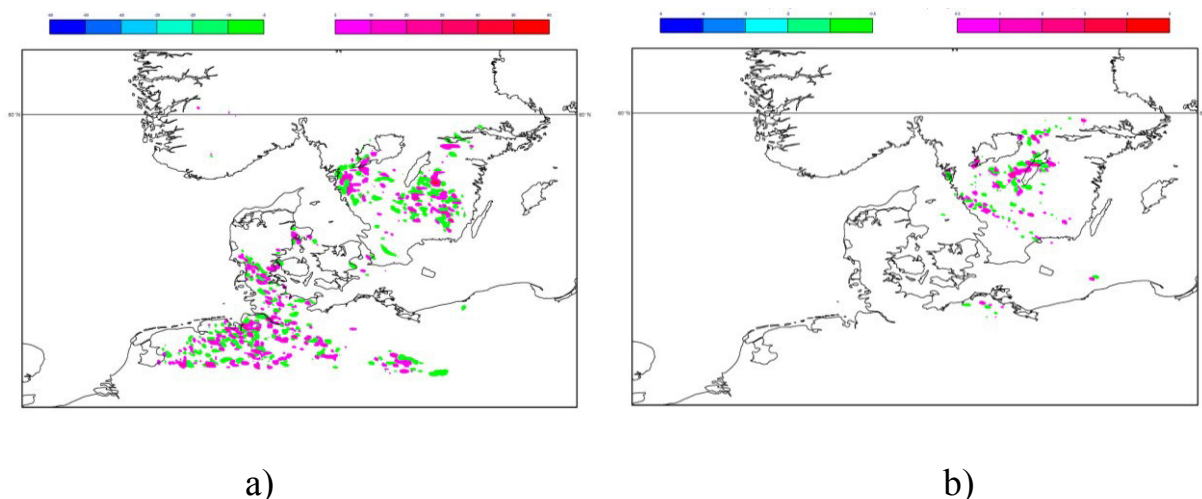


Рисунок 5.7 – Те, що і на рис.5.3, але для (a) суми опадів і (b) вертикальної швидкості (в м/с) на висоті 3 км.

Що стосується турбулентної кінетичної енергії (ТКЕ), різниця між двома прогонами становить приблизно $\pm 1 \text{ м}^2/\text{с}^2$ біля поверхні землі. Зі збільшенням висоти в ГША її значення виростає до $+3 \text{ м}^2/\text{с}^2$, але при цьому зменшуються просторові розміри (рис. 5.8b). Це доводить важливість впливу аерозолів на фізичні і динамічні механізми генерації ТКЕ в межах ГША. Однак, необхідно мати на увазі, що моделювання ТКЕ дуже чутливе до схем параметризації, які використовуються у відповідних програмних пакетах, що описують фізичні процеси. Таким чином, дані висновки підтверджують вплив аерозолів на фізику процесів, а саме, як на їх еволюцію, так і на кількісні оцінки.

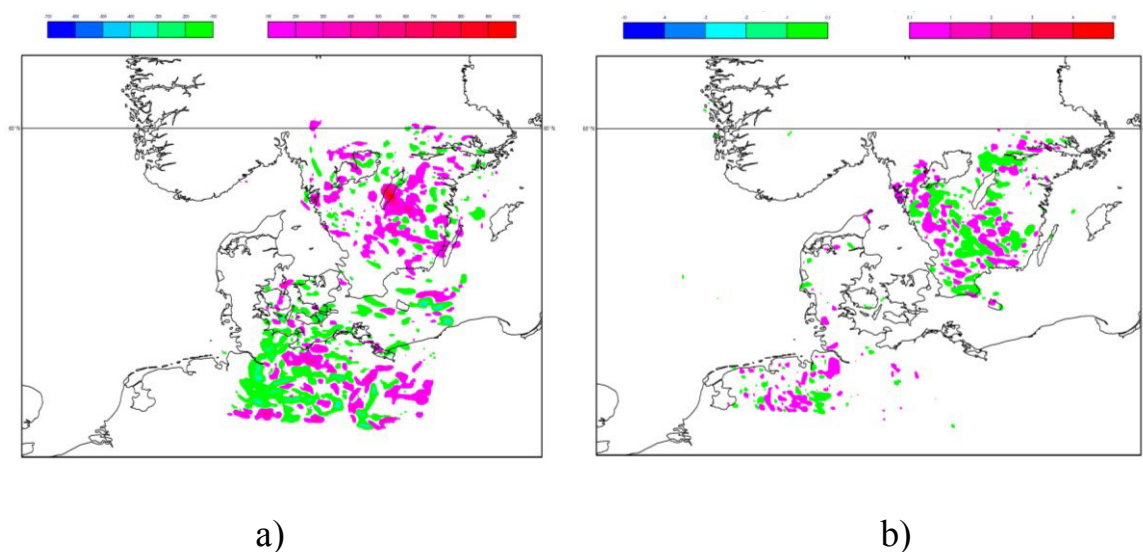


Рисунок 5.8 – Те, що на рис.5.3, але для (a) КДПЕ (в Дж/кг) і (b) кінетичної енергії турбулентності (в $\text{м}^2/\text{с}^2$) на рівнях вище 100 м

5.2 Вплив вуглецевих аерозолів

Результати розглянутого дослідження сильної лісової пожежі забезпечують основу для подальшого аналізу, який можна розділити на дві частини. По-перше, ці результати показують вплив аерозолів на більшість атмосферних змінних. Порівняння результатів, отриманих в експериментах з нульовими концентраціями аерозолів і кліматичними значеннями і їх концентрацій показують зміни в основних атмосферних полях, таких як температура, вологість, хмарність, опади, потоки короткохвильової і довгохвильової радіації в нижніх та середніх шарах атмосфери (рис. 5.9, 5.10, 5.11).

Найбільш видимий ефект проявляється в збільшенні хмарності в нижній частині тропосфери, яке супроводжується зниженням інтенсивності опадів. Це підтверджує загальновідомий факт, що аерозолі служать губкою, що накопичує водні маси, з наступними змінами радіаційних процесів. Варто відзначити, що подібний вплив спостерігається у вигляді мезомасштабних осередків, які неоднорідно покривають розглянуту область, і пов'язані з конкретними синоптичними структурами. Такий нелінійний і багатомірний відгук фізичних величин виникає внаслідок цілого ланцюжка взаємодій. Вихідна база даних моделі з годинним часовим розподілом дозволяє відслідковувати еволюцію і життєві цикли осередків, а також враховувати зміни в потоках тепла і маси внаслідок впливу аерозолів.

Друга частина чисельних експериментів показує відгук атмосферних полів на викид часток сажі внаслідок лісових пожеж в Росії 2010 року. Відповідно до синоптичної ситуації, що склалася в період 8-10 серпня 2010 року, смог досяг Скандинавського регіону. Підвищення концентрації вуглецю в атмосфері привело до аналогічних змін у метеорологічних полях у вигляді мезомасштабних структур з протилежними знаками (рис. 5.12, 5.13abc). На цьому етапі чисельних експериментів розподіл аерозолів ініціалізувався, як показано на рис. 5.13d. Слід зазначити, що ті зміни, які були викликані тривалим збільшенням аерозольної концентрації, не відповідали попереднім результатам. Частіше вони демонстрували протилежну поведінку. Таким чином, можна припустити, що аерозольний вплив на фізичні процеси в атмосфері відбуваються складними шляхами із численними позитивними й негативними зворотними зв'язками, які будуть вивчатися в подальших дослідженнях.

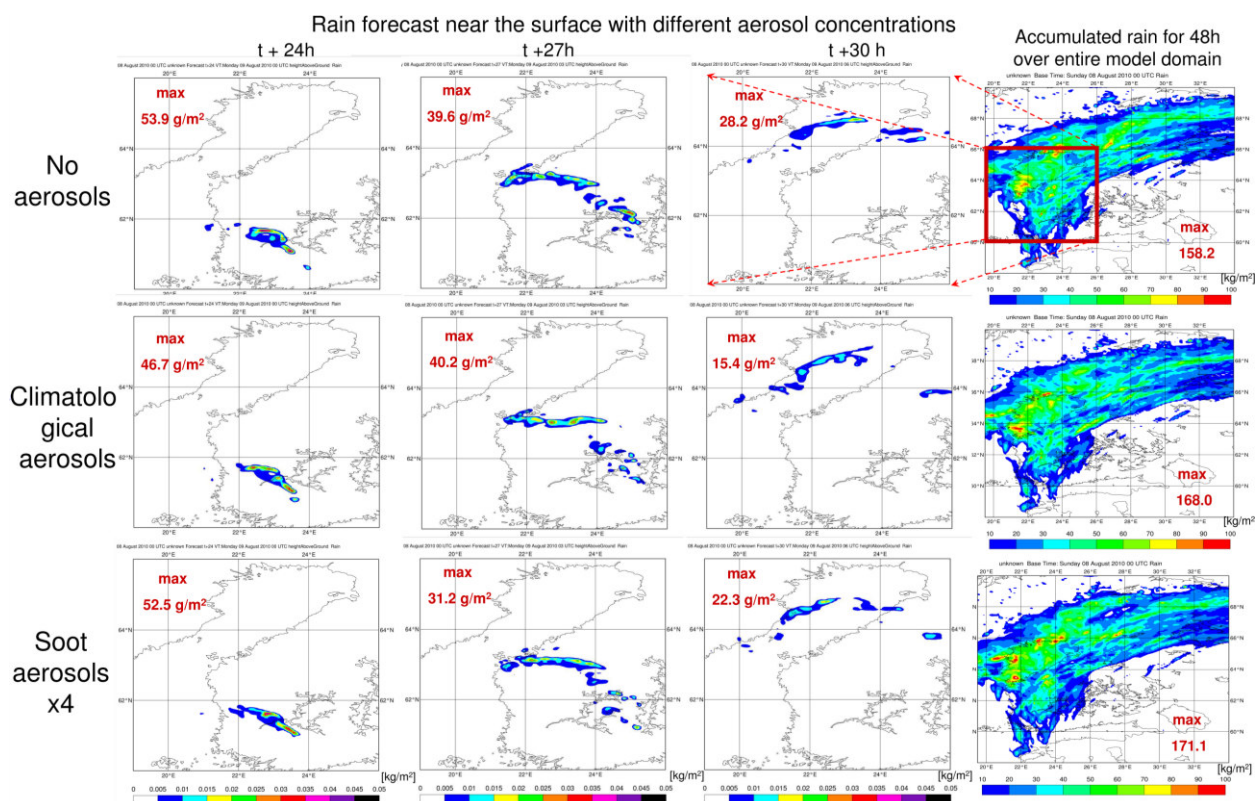


Рисунок 5.9. – Прогноз кількості опадів біля поверхні при різних заданих концентрації аерозолів в моделі HARMONIE на 8 серпня 2010, 21.00.

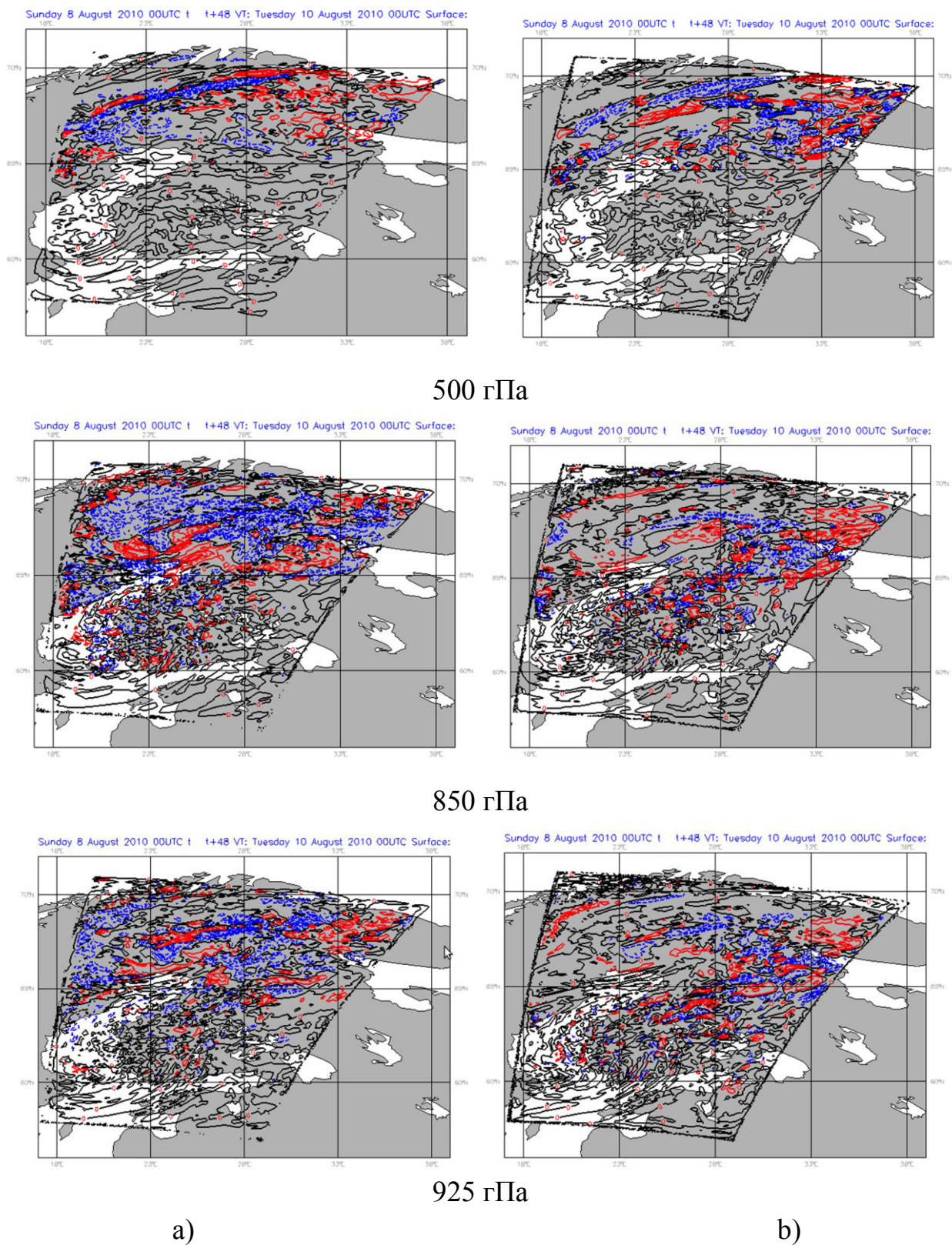


Рисунок 5.10 – Те, що і на рис.5.3, але для (а) температури (б) питомої вологості для нижніх і середніх шарів тропосфери над Фінляндією. Синій і червоний кольори відповідають від’ємним і додатним значенням відповідно.

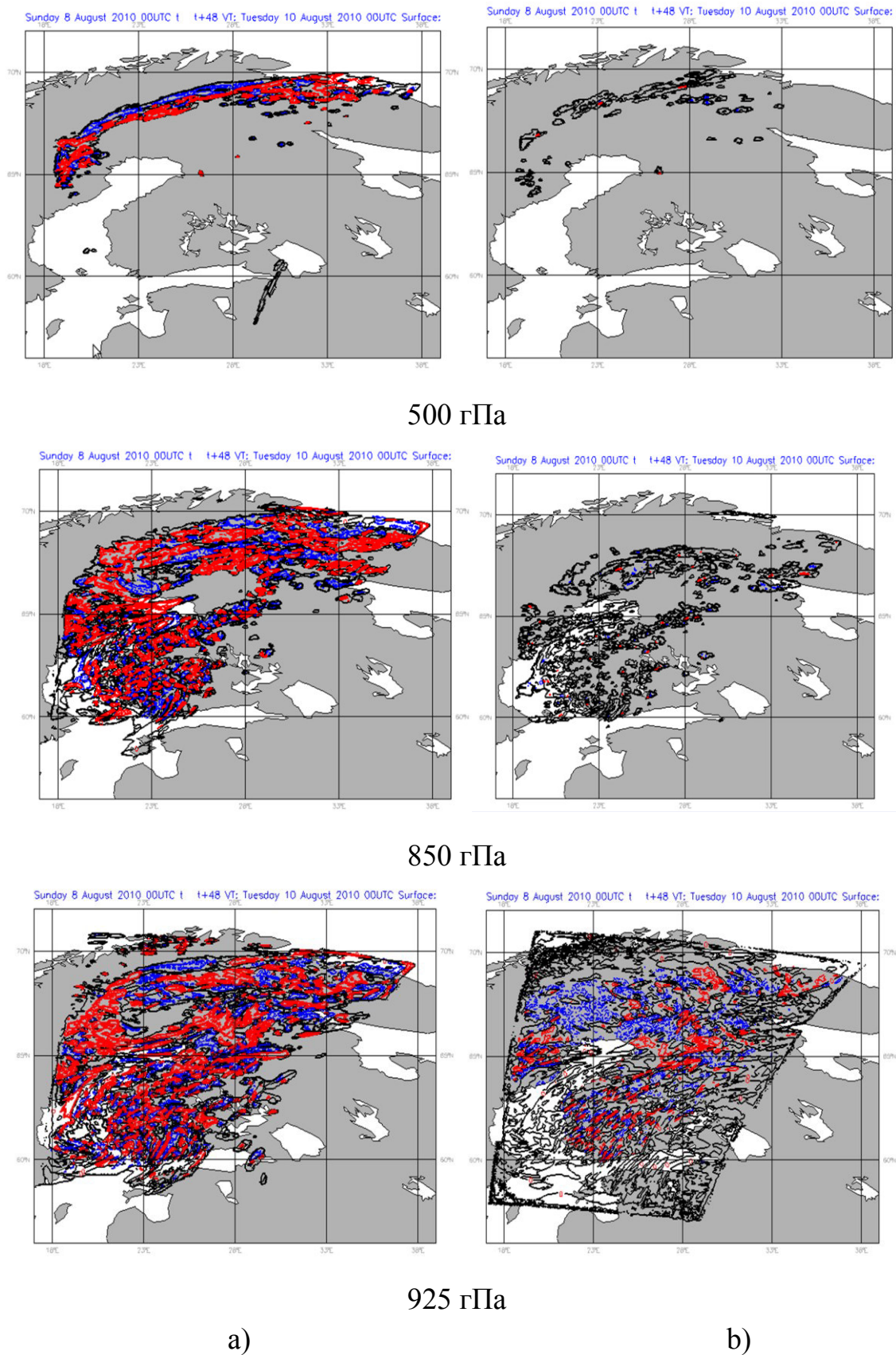
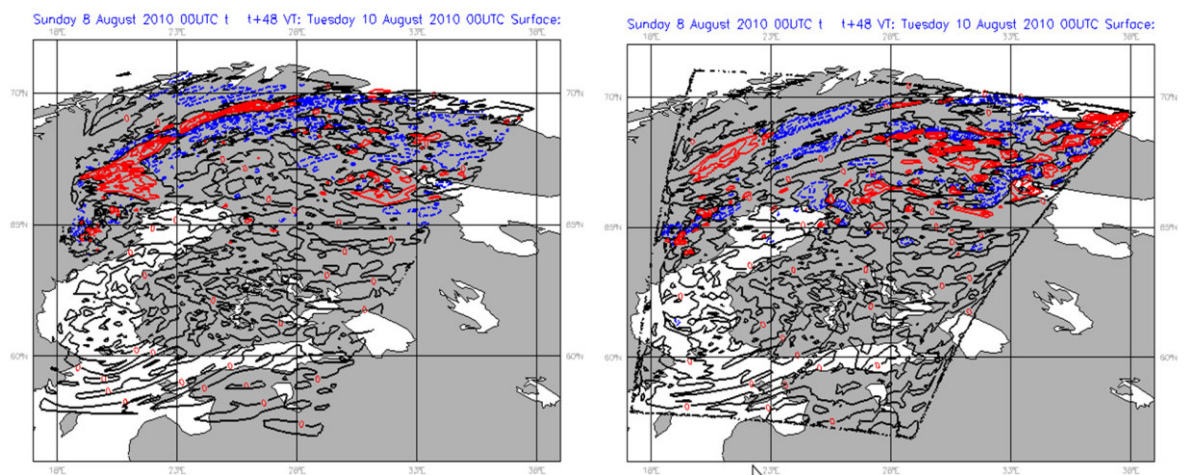
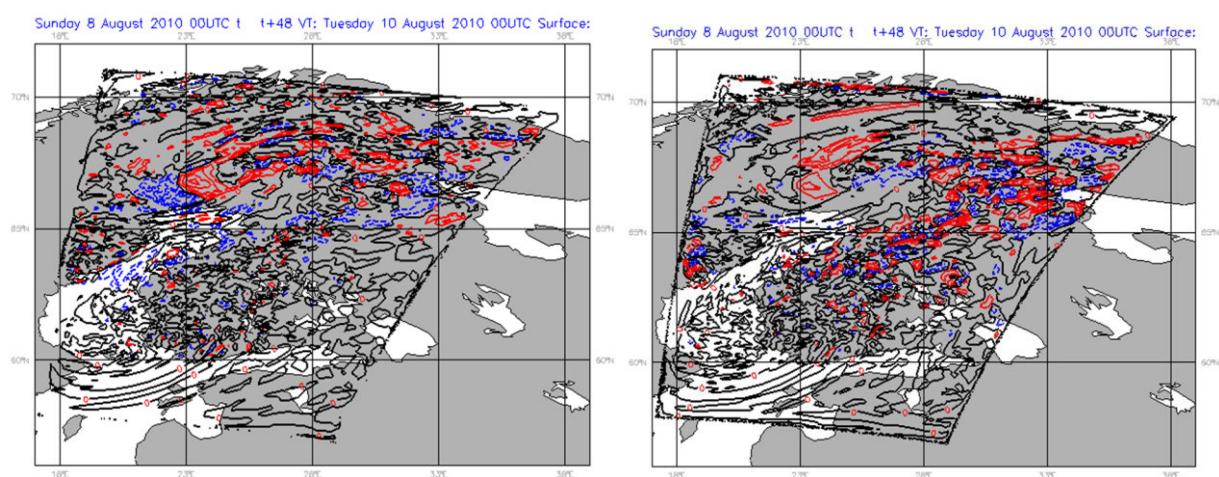


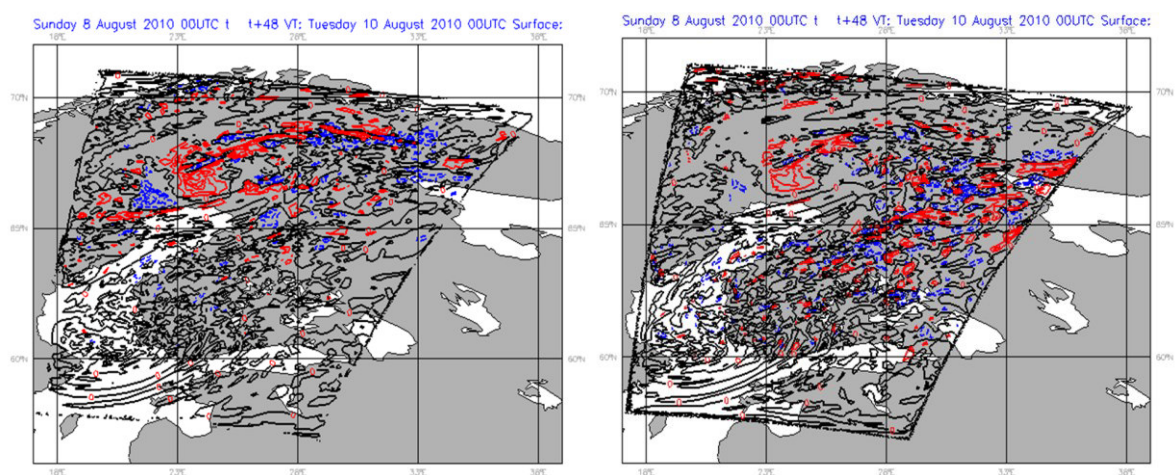
Рисунок 5.11 – Те, що і на рис.5.9, але для (а) хмарності і (б) дощової води в атмосфері.



500 гПа



850 гПа



925 гПа

a)

b)

Рисунок 5.12 – Те, що і на рис.5.9, але для прогонів з кліматичною і збільшеною після російських пожеж концентрацією аерозолів: (а) температура (б) питома вологість.

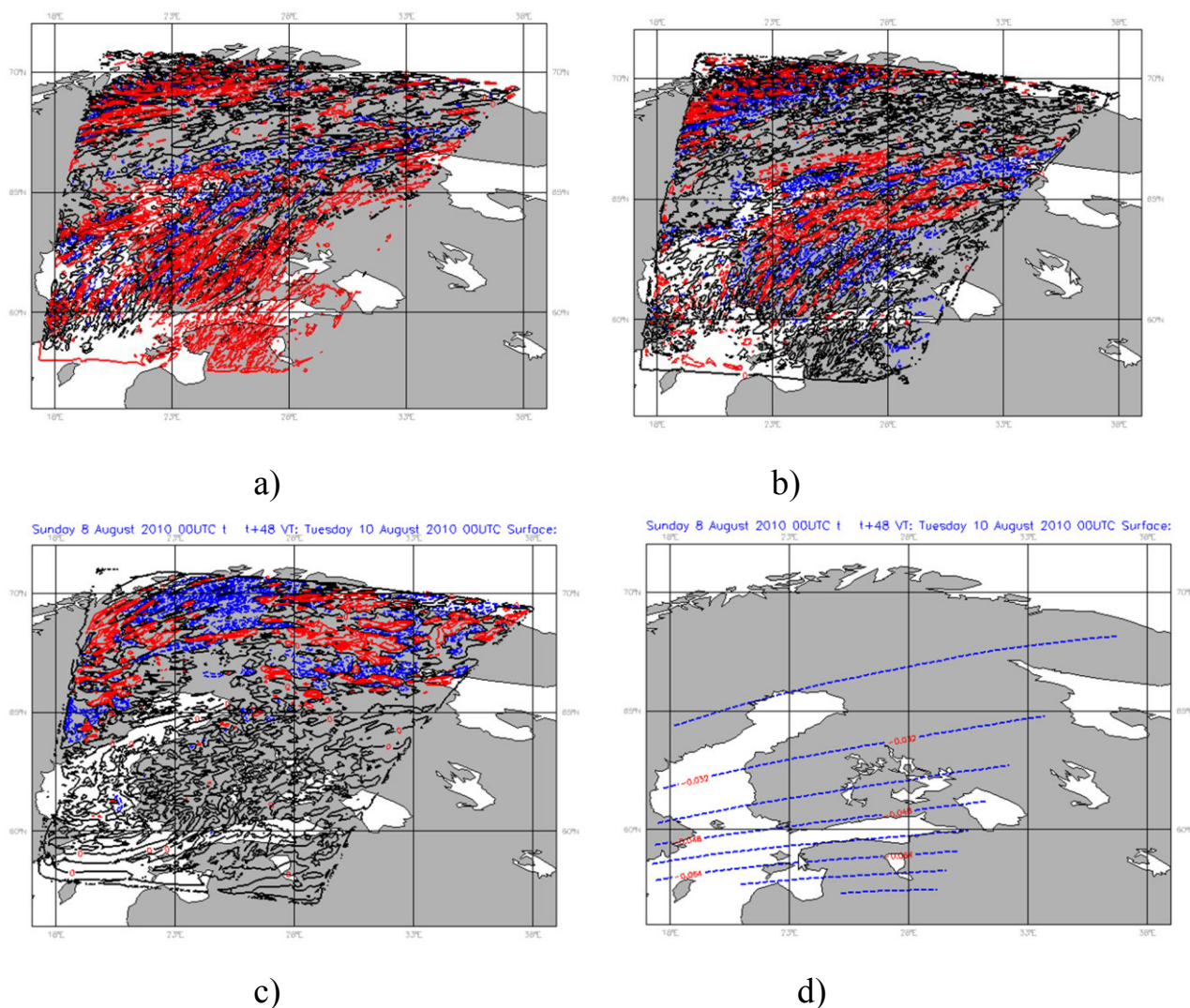


Рисунок 5.13 – Те, що і на рис.5.11, але для (а) короткохвильової радіації біля поверхні, (b) довгохвильової радіації біля поверхні, (c) потоків довгохвильової радіації у верхніх шарах атмосфери; і d) розподілу аерозолів в прогонах, що імітують російську лісову пожежу 2010 року.

5.4 Вплив морських аерозолів

Цей підрозділ присвячено питанням документування ролі морських аерозолів в атмосферних процесах шляхом порівняння полів по ряду експериментів протягом 11-16 серпня 2010 р. над Північною Атлантикою і Європою. Вплив морських сольових аерозолів на миттєві значення потоків короткохвильової радіації у верхніх шарах атмосфери, так само як біля поверхні дуже схожі в обох чисельних експериментах. Зокрема, на полях різниць потоків у двох експериментах видно великі області, покриті дрібномасштабними осередками протилежних знаків із середніми

значеннями близько $\pm 20 \text{ Вт/м}^2$. Збільшення або зменшення короткохвильового випромінювання в центрі осередків у верхніх шарах атмосфери приводить до подібних змін біля поверхні. Максимальне значення короткохвильового випромінювання, що виникає при наявності аерозольних часток досягає $114,5 \text{ Вт/м}^2$ у верхніх шарах атмосфери і 143 Вт/м^2 поблизу поверхні. Середня різниця потоків довгохвильової радіації на верхній границі атмосфери та біля поверхні становить $-0,078 \text{ Вт/м}^2$ і $-0,083 \text{ Вт/м}^2$ відповідно, тоді як для короткохвильового випромінювання вони приблизно рівні $0,12 \text{ Вт/м}^2$ і $0,17 \text{ Вт/м}^2$.

Найбільші відмінності в полях температури і питомої вологості спостерігаються в межах півтора кілометрового шару з максимумом в середніх широтах ледве вище ГША. Інша важлива деталь полягає в тому, що осереднені по площі регіону значення атмосферних характеристик суттєво не змінюються протягом періоду моделювання. Скоріше, вони осцилюють біля своїх середніх значень (Рис. 5.14). Різниці полів температури в двох експериментах після 5- денного моделювання сягають в сумі $\pm 3\div 5^\circ\text{C}$ і збільшуються до екстремальних значень $\pm 10^\circ\text{C}$ в окремих осередках, що пов'язані з певними географічними регіонами.

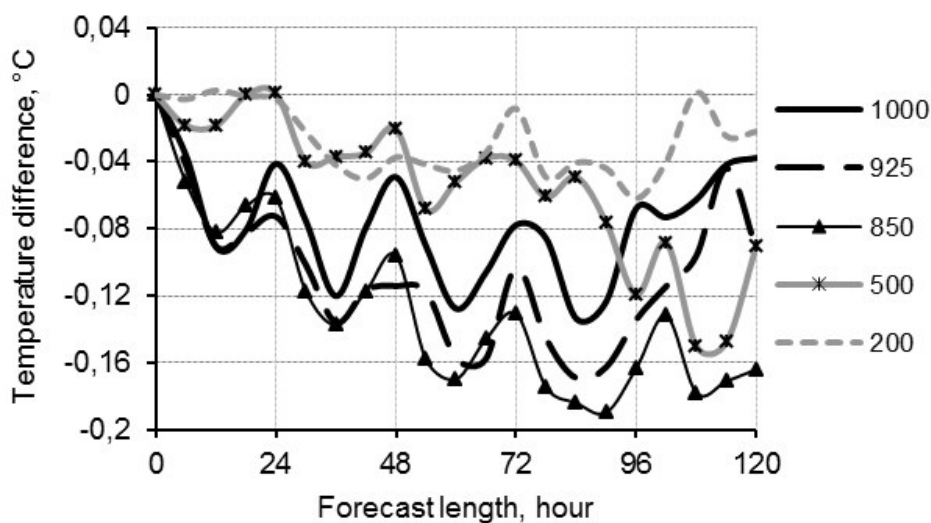


Рисунок 5.14 – Часова еволюція різниць температури повітря («модель без аерозолів» відняти «тільки морські аерозолі») з усередненням по всій області моделювання протягом 11-16 серпня 2010 як функція тиску на різних рівнях.

Морські аерозолі змінюють вертикальні профілі локальних потоків тепла відповідно до змін стратифікації і пригнічують або підсилюють конвекцію. Оскільки модель фізики процесу настраюється на параметри конвекції, відносна вологість варіюється від 10% для експерименту «з

аерозолями» відняти «без аерозолів» до 30% для експерименту «без аерозолів» відняти «морські аерозолі», в той час як різниця в кількості опадів становить $\pm 2,5 \text{ г/м}^2$. Моделювання різниць питомої вологості показало тенденцію до підвищення вологості в присутності аерозолів: до 0,05-0,1 г/кг для значень, осереднених по області, і $\pm 8-10 \text{ г/кг}$ для локальних значень. Така мезомасштабна мозаїчність розподілу водних мас є результатом розвитку місцевих висхідних і низхідних потоків. Збільшення в основному спостерігалось вздовж фронтальних зон над океанічною поверхнею в мезомасштабних осередках, зазначених вище, в центрі яких різниця вертикальних швидкостей досягає $\pm 1 \text{ м/с}$.

Вертикальні розрізи наочно показують сплески численних відхилень (рис. 5.15). Вони пов'язані з прямим впливом аерозолів; однак, необхідно також брати до уваги нелінійні динамічні процеси, що розвиваються в зонах атмосферних фронтів. Просторовий розподіл різниць в полях вологості, опадів і вертикальної швидкості суттєво залежить від географічного місця розташування і режиму атмосферних потоків.

Що стосується мікрофізики, то ефект від аерозолів проявляється в збільшенні хмарності в нижніх шарах тропосфери, яке супроводжується зменшенням інтенсивності опадів. Це також змінює умови формування, еволюції, руйнування, і тривалості існування хмар. Такий вплив пов'язаний, насамперед, з фронтальною зоною в північній частині Атлантичного океану.

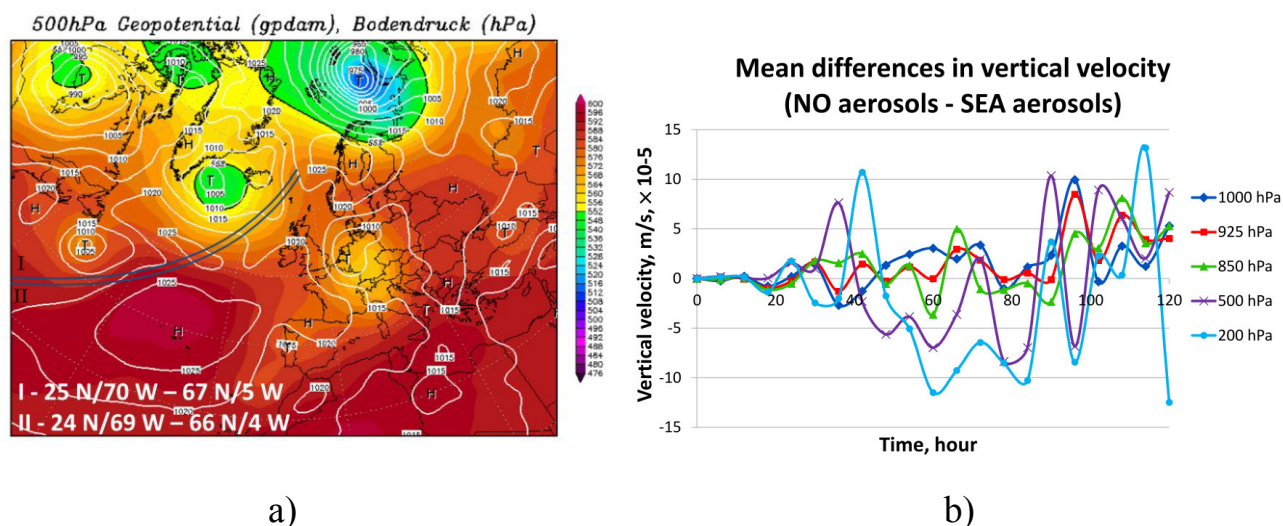


Рисунок 5.15 – Різниці (аерозолі: «всі» - «тільки морські») при моделюванні за допомогою моделі HARMONIE вертикальних швидкостей (б), температури (с) і питомої вологості (г) по двом перетинам (а) 8 серпня 2010, 21.00 за Гринвічем.

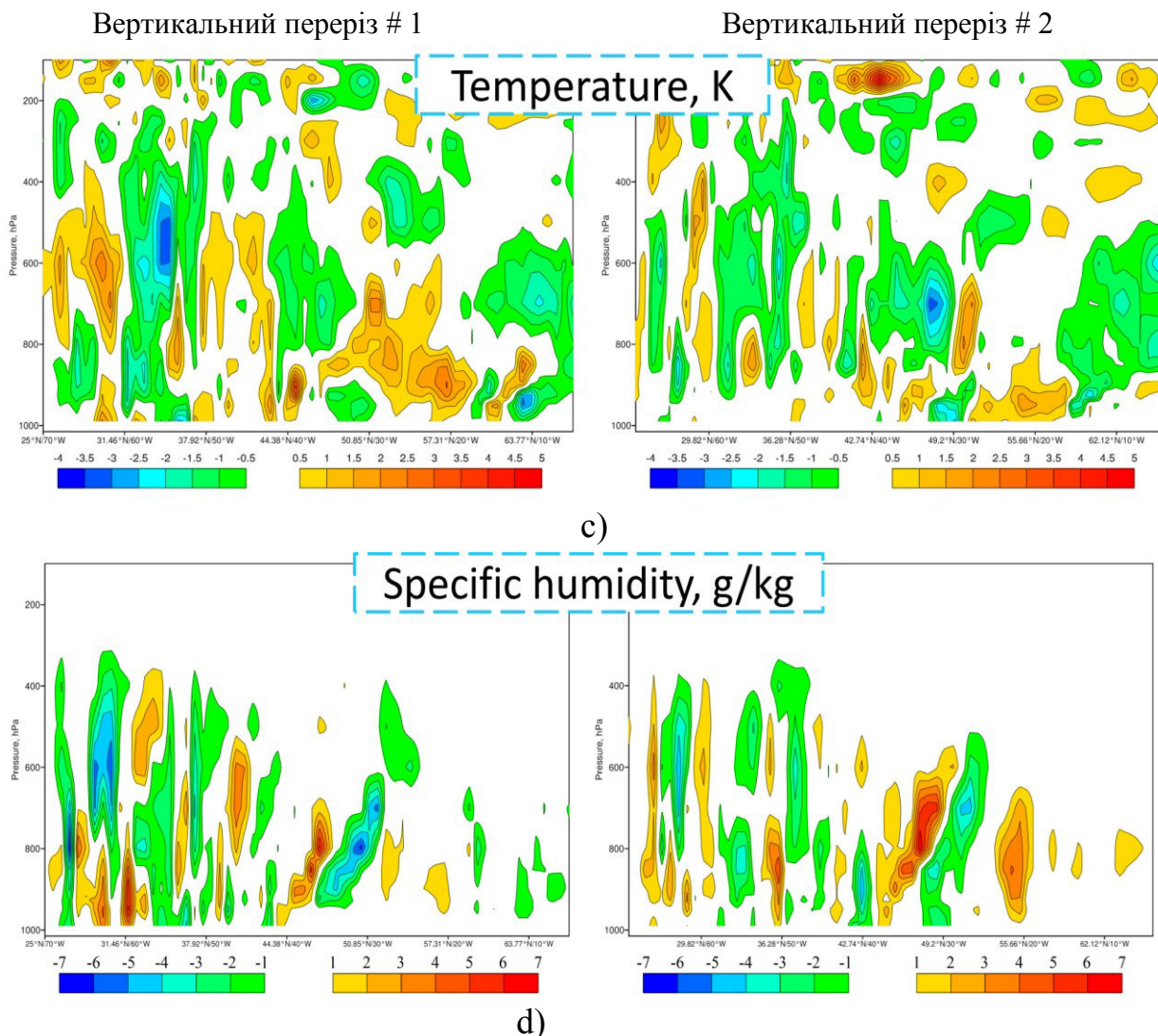


Рисунок 5.15 – Продовження.

Основна причина такої мезомасштабної мінливості впливає із внутрішньої динаміки атмосферних процесів, включаючи різноманітні нелінійні взаємодії між вертикальними профілями температури і вологості, висхідними і низхідними потоками, мікрофізичними та радіаційними процесами, які відбуваються на масштабах порядку 10-100 км.

Верифікація цих результатів ускладнюється через те, що нинішні бази даних не мають необхідний просторовий розподіл аерозольних полів на мезомасштабах. На сьогодні, тільки супутники можуть забезпечити необхідне глобальне покриття, однак за допомогою дистанційного зондування не вдається визначити повний діапазон хімічного складу. Плямистість джерел, поглинання і короткий строк існування тропосферних аерозолів значно ускладнюють завдання оцінки глобальних або навіть регіональних впливів аерозолів, яка, як правило, здійснюється за допомогою просторово-часового осереднення їх надзвичайно мінливих властивостей.

ВИСНОВКИ

За підсумками науково-дослідницької роботи можна зробити наступні висновки. Метеорологічні радари являються незамінним тривимірним інструментом з високою роздільною здатністю у просторі і в часі в задачах спостереження, аналізу і створення надкороткострокового прогнозу еволюції атмосферних структур, таких як опади. Переважаючими стратегіями при використанні радарних даних для прогнозу опадів є відстеження осередку і відстеження області з опадами. Чітке формулювання потреб користувача визначає підходи, тип стратегії та супровідні особливості, які залучаються для обробки радарної інформації. Використання радарних даних в єдиному форматі HDF5 (Hierarchical Data Format) суттєво спрощує створення і використання як локальних, так і міжнародних мереж обміну радарною інформацією, що надходить з різних джерел. HDF5 містить інтерфейс для зберігання та пошуку стиснутих/нестиснутих растрових зображень з палітрами кольорів, інтерфейс для зберігання та пошуку n-розмірних наборів наукових даних разом з інформацією про такі дані як мітки, одиниці вимірювання, формати та масштаби по всіх вимірах. Розгорнуто представлено процес/процедури зберігання і використання радарних даних в термінах основних типів даних HDF5: атрибути, набори даних, групи і структури. Графічно продемонстровано результати успішної інсталяції і використання програми RACK обробки радарних даних BALTRAD. Після зчитування даних в HDF5 форматі, ця вільна програма обробки даних метеорологічних радарів дозволила створити чорно-білі й кольорові зображення структур опадів і в полярних, і в декартових координатах. Поряд з виявленням і усуненням аномалій в радарних даних, однією з переваг застосування програми Rack є можливість одночасного представлення інформації з декількох радарів на одному рисунку композиційного зображення.

Інсталяція потужної чисельної моделі прогнозу погоди HARMONIE-38h1.2 на локальній платформі типу Linux-PC з операційною системою Ubuntu-14.10 можлива для граничної за розмірами області та нетривалих розрахунків. Робота з вищезгаданою моделлю на розрахунковій платформі ЕЦСПП дозволяє виконувати розрахунки по регіону з розмірами порядку 1 000 x 1 000 км з розділенням 1 км и 65 вертикальними рівнями з пакетом явного опису мікрофізики, системою засвоєння даних, підмоделлю підстильної поверхні і багатьма другими можливостями. Представлення вихідних даних радіолокаційного зондування в форматах BUFR и OBD

значною мірою зменшує об'єми масивів даних и час їх обробки на етапі пре-процесінгу. Розроблений алгоритм засвоєння даних радіолокаційного зондування показав можливість корекції атмосферних полів в початкових умовах на мезомасштабах.

Покращення розуміння ролі аерозолів в атмосфері пов'язане з поглибленням знань про радіаційний вплив аерозолів; про оцінку зворотних зв'язків між хмарами, вмістом водяної пари і її градієнтом; і про розвиток процесів опадоутворення. У зв'язку з цим, ланцюжок взаємодій між аерозолями, хмарністю і опадами є основним джерелом невизначеності в оцінках і інтерпретації мінливості енергетичного бюджету. Необхідна для адекватного опису аерозольного складу точність вимірів, на сьогодні ще не досягнута. Вплив аерозолів оцінюється в основному по змодельованих концентраціях аерозолів і їх передбачуваним властивостям. Результати моделювання, в свою чергу, опираються на уявлення про процеси формування і еволюції аерозолів в атмосфері, які представляються досить невизначеними. Інший аспект цієї проблеми полягає в необхідності трактувати мінливість аерозолів відповідним чином. Це вимагає раціоналізувати відмінності в просторовому і часовому розділенні мереж спостережень і моделей розрахункових сіток. На даний момент не встановлено задовільного підходу для оцінки внеску кожного елемента в ланцюжку взаємодій між фізичними і хімічними складовими в атмосфері.

Чисельні експерименти з моделлю HARMONIE показали значний вплив аерозолів на більшість атмосферних змінних. Їхній вплив відбувався по складному ланцюжку взаємодій між фізичними змінними, де аерозолі відіграють роль тригера. До того ж, вони діють різними способами залежно від типу аерозолів і синоптичної ситуації. Основний внесок відбувається в граничному шарі атмосфери і вздовж фронтальної зони високих градієнтів на всіх рівнях. Збурювання з'являються у вигляді мезомасштабних осередків, що зростають з часом, тоді як величини відхилень, осереднені по всій області коливаються навколо нульового значення. Наявність аерозолів збільшує хмарний покрив в нижній тропосфері, яке супроводжується зниженням інтенсивності опадів. Мезомасштабна мозаїчність у розподілі дощових мас відбувається в результаті розвитку місцевих висхідних і низхідних потоків, пов'язаних з наявністю мезомасштабних осередків. Ефективне урахування аерозолів в прогнозах опадів вимагає точної інформації про їх фізичні властивості, концентрацію, розподіл і еволюцію.

Отримані результати важливі як для кращого уявлення про внесок аерозолів в атмосферні процеси, що необхідно для покращення чисельних прогнозів погоди, так і для глибшого фізично якіснішого розуміння

аерозольних ефектів в атмосфері. В майбутньому планується проведення додаткових експериментів в окремій області для дослідження еволюції окремого осередку інтенсивних опадів в процесі його циклу розвитку за умов більш високого просторового і часового розподілу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Baklanov, A., Mahura, A., Ranjeet, S. Sokhi (eds.). Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, pp. 242. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-13980-2>.
2. Peura, M. and H. Hohti. Optical flow in radar images. Proceedings of the Third European Conference on Radar Meteorology (ERAD), Visby, Sweden, 6 - 10 September 2004, P.454–458.
3. Bowler, N. E. H., C. E. Pierce, and A. Seed. Development of a precipitation nowcasting algorithm based upon optical flow techniques. //Journal of Hydrology. -2004. -288, 74–91.
4. Li, L., W. Schmid, and J. Joss. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. //Journal of Applied Meteorology. -1995. -34. –P.1286–1300.
5. Grecu, M. and W. F. Krajewski, 2000: A large-sample investigation of statistical procedures for radar-based short-term quantitative precipitation forecasting. //Journal of Hydrology. -2000. -239, P.69–84.
6. Rinehart, R. E. and E. T. Garvey. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. //Nature. -1978. -273. P.287–289.
7. Veneziano, D., R. L. Bras, and J. D. Niemann. Nonlinearity and self-similarity of rainfall in time and a stochastic model. //Journal of Geophysical Research. -1996. -101, (D21), P.371–392.
8. Seed, A. W. A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. //Journal of Applied Meteorology. -2003. -42, P.381–388.
9. Паламарчук Ю.О. Діагноз систематичних помилок чисельних метеорологічних прогнозів атмосферної циркуляції на прикладі моделі MM5. Дисертація на здобуття вченого ступеня «Кандидат географічних наук», Одеса, 2013.
10. Peura, M. Computer vision methods for anomaly removal, Second European Conference on Radar Meteorology (ERAD02), Copernicus Gesellschaft, 2002. pp. 312–317.
11. Michelson, D. B., Lewandowski, R., Szewczykowski, M. and Beekhuis, H. EUMETNET OPERA weather radar information model for implementation with the HDF5 file format, version 2.1, Opera working document WD_2008_03, EUMETNET OPERA. 2011.

12. Peura, M.: Rack – a program for anomaly detection, product generation, and compositing, ERAD 2012 - THE SEVENTH EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR IN METEOROLOGY AND HYDROLOGY, 2012.
13. Peura, M. and Koistinen, J. Using radar data quality in computing composites and nowcasting products, 33rd Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society. CD-ROM. 2007.
14. Jones CD and Macpherson B., 1997: A latent heat nudging scheme for the assimilation of precipitation data into an operational mesoscale model., *Meteorological Applications*, 5, pp 1-16
15. Davolio S. and A. Buzzi, 2004: A Nudging scheme for the Assimilation of Precipitation Data into a Mesoscale Model, *Wea. Forecasting*, 19, pp 855-871
16. Xiao Q., Kuo, Y-H., Sun J., Lee W-C., Lim E., Guo Y. and Baker, D.M., 2005: Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3D-VAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case, *Journal of Appl. Meteor.*, 44, pp 768-788
17. Montmerle T., E. Watterlot, C. Faccani, O. Caumont, M. Jurasek, and G. Haase, 2007: Regional scale assimilation of radar data at Météo-France. Hirlam Tec. Report on Short Range Numerical Weather Prediction
18. Watterlot E., O. Caumont, S. Pradier-Vabre, M. Jurasek, G. Haase, 2008: 1D + 3Dvar assimilation of radar reflectivities in the pre-operational AROME model at Météo-France, *Proceedings of the ERAD 2008 conference* (http://erad2008.fmi.fi/proceedings/index/session_wednesday.html)
19. Lopez P. and P. Bauer: 2006: “1D + 4DVAR” Assimilation of NCEP Stage-IV Radar and Gauge Hourly Precipitation at ECMWF, *Mon. Wea. Rev.*, 135, pp 2506-2524
20. Marécal V. and JF. Mahfouf, 2003: Experiments on 4D-Var assimilation of rainfall data using an incremental formulation, *Q.J.R.M.S.*, 129, pp 3137-3160
21. Koizumi K, Y. Ishikawa and T. Tsuyuki, 2005: Assimilation of Precipitation Data to the JMA Mesoscale Model with a Four-dimensional Variational Method and its Impact on Precipitation Forecasts, *SOLA*, 1, pp 45 –48
22. Synder C. and F. Zhang, 2003: Assimilation of Simulated Doppler Radar Observations with an Ensemble Kalman Filter, *Mon. Wea. Rev.*, 131, pp 1663-1675
23. Tong M. and M. Xue, 2004: Ensemble Kalman Filter Assimilation of Doppler Radar Data with a Compressible Nonhydrostatic Mode: OSS Experiments, *Mon. Wea. Rev.*, 133, pp 1789-1807

24. Macpherson B., 1999: Operational experience with assimilation of rainfall data in the Met Office Mesoscale model, *Met. Atm. Phys.*, 76, 3-8
25. Kukkonen, J., Olsson, T., Schultz, D. M., Baklanov, A., Klein, T., Miranda, A. I., Monteiro, A., Hirtl, M., Tarvainen, V., Boy, M., Peuch, V.-H., Poupkou, A., Kioutsioukis, I., Finardi, S., Sofiev, M., Sokhi, R., Lehtinen, E. J., Karatzas, K., San Jos'e, R., Astitha, M., Kallos, G., Schaap, M., Reimer, E., Jakobs, H., Eben, K., 2012. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe, *Atmos. Chem. Phys.* 12, 1–87, <http://dx.doi.org/10.5194/acp-12-1-2012>.
26. Sporre, M. K., Swietlicki, E., Glantz, P., Kulmala, M., 2012. A study of how aerosols affect low-level clouds over the Nordic Countries using MODIS, ground-based, ECMWF and weather radar data. *Geophysical Research Abstracts*. 14, EGU2012-7983.
27. Driesenaar, T., 2009. General description of the HARMONIE model. <http://hirlam.org/index.php/documentation/harmonie>.
28. Seity, P., Brousseau, S., Malardel, G., Hello, P., Bénard, F., Bouttier, C., Lac, V., Masson. (2011) The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Monthly Weather Review* 139:3, 976-991.
29. Cuxart, J., P. Bougeault, and J.-L. Redelsberger, 2000: A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 1–30.
30. Lindskog, M. 2000. An estimate of the seasonal dependence of background error statistics in the HIRLAM 3-D Var, *HIRLAM Newsletter*, 35, 2000, 71-86.