

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Гідрометеорологічний інститут
Кафедра метеорології та кліматології

Магістерська кваліфікаційна робота

на тему: Процеси пилової адвекції над Європою

Виконала студентка 2 курсу групи МЗМ-19
спеціальності 103 - Науки про Землю
Бучко Ірина Романівна

Керівник к. геогр. н., доцент
Нажмудінова Олена Миколаївна

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

Одеса 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет гідрометеорологічний інститут

Кафедра метеорології та кліматології

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 103 - Науки про Землю

(шифр і назва)

Освітня програма Метеорологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Прокоф'єв О.М.

“26” жовтня 2020 року

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

Бучко Ірині Романівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Процеси пилової адвекції над Європою

керівник роботи Нажмудінова Олена Миколаївна к. геогр. н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти 124-С від 16.10.2020 р.

2. Строк подання студентом роботи 07 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи інформація метеорологічних штучних супутників Землі (МШСЗ); оперативна синоптична інформація (приземні та висотні карти погоди); карти розподілу опадів; карти струминних течій та максимального вітру; характеристики пилових потоків за даними Barcelona Dust Forecast Center та National & Kapodistrian University of Athens (концентрація пилу, пилова навантага тощо); дані ре-аналізу Національного центру передбачення клімату США NCEP/NCAR поля H500.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Вибір, аналіз та систематика наукової літератури за напрямком дослідження. 2) Створення вибірки вихідної інформації з випадків перенесення сахарського пилу до європейського сектору. 3) Аналіз супутникових знімків з ідентифікацією пилових потоків. 4) Визначення особливостей циркуляційних умов формування забарвлених опадів над Україною. 5) Дослідження сприятливих факторів транспортування сахарського пилу до Європи. 6) Аналіз блокуючих ситуацій.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень.) Рис. 4.1 (3)-(4) – поля індексу блокування $I(\lambda)$.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 26 жовтня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської роботи | Термін виконання етапів роботи | Оцінка виконання етапу | |
|-------|---|--------------------------------|------------------------|-----------------------|
| | | | у % | за 4-х бальною шкалою |
| 1. | <i>Аналіз сучасних публікацій за темою дослідження. Робота з Internet ресурсами.</i> | 26-31.10 2020 р. | 100 | відмінно |
| 2. | <i>Вибір випадків процесів пилової адвекції до Європи в останньому п'ятиріччі. Аналіз супутникових знімків хмарності.</i> | 01-08.11 2020 р. | 100 | відмінно |
| 3. | <i>Дослідження циркуляційних умов при транспортуванні сахарського пилу до Європи.</i> | 09-13.11 2020 р. | 100 | відмінно |
| 4. | <i>Розрахунки індексів блокування, побудова схем.</i> | 14-16.11 2020 р. | 90 | відмінно |
| 5. | <i>Рубіжна атестація</i> | 17.11.2020 | | |
| 6. | <i>Складання висновків. Прикінцева правка тексту.</i> | 18.11-02.12 2020 р. | 85 | добре |
| 7. | <i>Перевірка на плагіат, підписання авторського договору.</i> | 03-10.12.2020 | | |
| 8. | <i>Підготовка доповіді і презентації до захисту. Попередній захист магістерської роботи.</i> | грудень 2020 | | |
| | Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам) | | 95 | відмінно |

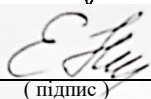
Студент



(підпис)

Бучко І.Р.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Назмудінова О.М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Процеси пилової адвекції над Європою».

Автор: Бучко Ірина Романівна.

Актуальність теми визначається змінами атмосферної циркуляції, які проявляються у транспортуванні сахарського пилу на величезні відстані, що зумовлює аномальні режими погоди та може призвести до порушень екосистеми.

Мета роботи: встановлення особливостей пилової адвекції з Африки до європейського регіону.

Відповідно до поставленої мети, розв'язано наступні **задачі**:

- встановлено характеристики пилової адвекції за даними МШСЗ;
- досліджено циркуляційні умови, сприятливі для транспортування пилу на Середземномор'я та європейський сектор;
- визначено чинники формування забарвлених опадів над східною Європою;
- проаналізовано процеси блокуючого антициклогенезу.

Об'єкт дослідження: пилова буря.

Предмет дослідження: циркуляційні умови транспортування сахарського пилу.

Методи дослідження: синоптико-кліматичний аналіз, просторово-часове узагальнення даних, чисельний експеримент.

Наукова новизна отриманих результатів. Досліджено випадки транспортування сахарського пилу до Європи в останні роки. Визначено додаткові типи процесів при винесенні сахарського пилу на східну Європу.

Практичне значення отриманих результатів. Зростання повторюваності випадків пилової адвекції до європейського сектору у загальному, та до території України, зокрема, може бути використане при прогнозах погоди, насамперед - видимості, вітру, опадів, а також для екологічних досліджень (забруднення повітря, поширення вірусів тощо).

Магістерська кваліфікаційна робота в об'ємі 56 сторінок складається з 4 розділів, висновків, переліку посилань з 31-го джерела, одного додатку, містить 19 рисунків в основному тексті.

Ключові слова: пилова буря, пилова адвекція, сахарський пил, концентрація пилу, струминна течія, циклонічна циркуляція, опади.

SUMMARY

Theme of master's qualification works «Processes of dust advection over Europe».

Author: Buchko Iryna.

The relevance of the study of the topic is determined by changes in atmospheric circulation, which are manifested in the transportation of Saharan dust over vast distances, which causes abnormal weather regimes and can lead to violations of the ecosystem.

Objective: installation of features of dust advection from Africa to the European region.

According to the stated goal, the **following tasks** were accomplished:

- the characteristics of dust advection have been established according to the data of meteorological satellites of the Earth;
- study of circulating conditions favorable for the transportation of dust to the Mediterranean sea and the European sector;
- the factors of formation of colored precipitation over Eastern Europe are determined;
- processes of blocking anticyclogenesis are analyzed.

Object of study: dust storm.

Subject of research: circulation conditions of Saharan dust transportation.

Research methods: synoptic-climatic analysis, space-time generalization of data, numerical experiment.

The scientific novelty of the obtained results. Cases of transporting dust from the Sahara to Europe in recent years have been studied. Additional types of processes have been identified when bringing Saharan dust to Eastern Europe.

Practical significance of the obtained results. Increasing the frequency of cases of dust advection in the European sector as a whole, and on the territory of Ukraine, in particular, can be used in weather forecasts, first of all - visibility, wind, precipitation, as well as for environmental research (air pollution, spread of viruses, etc.).

Master's qualification work in volume 56 pages consists of 4 sections, conclusions, list of references from 31 sources, one annexes, contains 19 figures in the main text.

Keywords: dust storm, dust advection, Saharan dust, dust concentration, jet stream, cyclical circulation, precipitation.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 6 |
| 1 Пилові бурі..... | 8 |
| 1.1 Основні характеристики..... | 8 |
| 1.2 Класифікації та умови формування пилових бур..... | 11 |
| 1.3 Моделювання процесів транспортування пилових бур та їх концентрації..... | 13 |
| 1.4 Вплив пилових бур сфери діяльності..... | 16 |
| 2 Режим утворення пилових бур над Північною Африкою..... | 19 |
| 3 Особливості циркуляції атмосфери над східною Європою..... | 24 |
| 3.1 Загальні відомості..... | 24 |
| 3.2 Блокуючі процеси | 27 |
| 4 Дослідження процесів пилової адвекції над Європою..... | 31 |
| 4.1 Формування забарвлених опадів..... | 31 |
| 4.2 Аналіз процесів пилеутворення у 2019 р..... | 41 |
| Висновки..... | 51 |
| Перелік посилань..... | 53 |
| Додаток А. Довідка | 56 |

ВСТУП

У роботі досліджуються особливості загальної циркуляції атмосфери, що проявляються у перенесенні пилових потоків з пустель Африки у періоди сильних пилових і піщаних бур до Європи, часто досягаючи території Кавказу та Кубані.

Для території України такі процеси є аномальними з погляду віддалення африканського континенту, а для регіону Середземномор'я ситуації є невинятковими; пилові аерозолі впливають погоду і клімат у великих масштабах, що підвищує потребу у моделюванні транспортування пилу і його концентрації в атмосфері. В рамках ВМО проект по піщаним і пиловим бурям ініційований у 2004 р., а з 2007 р. функціонує система консультування й оцінки по попередженню піщаних і пилових бур (SDS-WAS) для північної Африки, Близького Сходу і Європи [31]. Зони пилу, що переносяться місцевими вітрами, прогнозуються в Barcelona Dust Forecast Center [27].

В останні роки процеси пилової адвекції підлягають посиленому вивченню і детальному дослідженню через збільшення випадків пилових бур з африканського континенту, зумовлених змінами глобального та регіонального клімату, а також, антропогенною діяльністю. Пил частково осідає в Середземномор'ї й західній Європі, а основна частина рухається через Атлантику. Коли над обома регіонами знижується атмосферний тиск, потік повітря із Сахари разом з частками пилу зміщується на Іспанію, Францію і Португалію, часто досягаючи східної та північної Європи.

Внаслідок таких процесів сильно погіршується видимість, що впливає на транспорт, насамперед, на авіасполучення. Пилові бурі видувають верхній родючий шар ґрунту, заносять лісові смуги і залізничні колії піском, порушують телефонний зв'язок і постачання електроенергії, пошкоджують інфраструктуру населених пунктів тощо. Наслідки шкідливої дії пилових бур відчуються впродовж багатьох років. В результаті, піщані і пилові бурі пов'язані з рядом проблем екології і змін клімату вцілому.

Магістерська робота складається з 4 розділів.

У 1 розділі охарактеризовано основні відомості про пилові бурі. Надається їх визначення, умови формування, класифікації, повторюваність, часовий та просторовий розподіл. Окремо виділена інформація про моделювання транспортування пилових бур та їх концентрації.

2 та 3 розділ містить теоретичні відомості про утворення пилових бур над Європою. Додатково розглядаються процеси блокування західно-східного потоку тропосфери, які зумовлюють стаціонування циклонів над Середземноморським басейном, та формування визначеного комплексу погодних характеристик.

Практична частина роботи наведена у розділі 4. Досліджуються циркуляційні умови, сприятливі для транспортування сахарського пилу на Середземномор'я та європейський сектор. Визначено чинники формування забарвлених опадів над східною Європою; обчислені індекси блокування.

Напрямок дослідження належить до бюджетної кафедральної тематики «Розробка та вдосконалення методів прогнозу небезпечних та стихійних метеорологічних явищ над Україною», № 0120U100487 (додаток А).

1 ПИЛОВІ БУРІ

1.1 Основні характеристики

Сучасний стан біосфери в повній мірі залежить від стану екосистем, які значно змінилась в останні роки під впливом ряду природних і антропогенних факторів. Особливо гостро негативні зміни екосистем проявляються в посушливих регіонах, що стало наслідком збільшення кількості пилових бур.

Пилова (піщана) буря – це атмосферне явище перенесення сильним вітром великої кількості пилу (піску), частинок сухої землі, внаслідок чого відбувається помутніння атмосфери й супроводжується погіршення видимості. Вона виникає під час посушливої погоди і посилення швидкості вітру до значень, за яких відбувається видування із підстильної поверхні часток пилу (піску). На утворення пилових бур впливають рівень зволоженості та структура ґрунту. Географія району та життя рослин також можуть збільшити ймовірність виникнення пилових бур. Наприклад, пилові бурі поширені в рівнинних регіонах, де дерев і рослин дуже мало. Ці дві особливості дозволяють вітрам нарощувати оберти, змушуючи вітри посилюватися і виганяти більше пилу в атмосферу. Узимку до зазначених факторів додається відсутність снігового покриву, неглибоке промерзання і слабка цементация ґрунту [4-6].

Пилові бурі охоплюють великі площі. Наслідки шкідливої дії пилових бур відчуваються впродовж багатьох років. Крім пилових бур, спостерігаються пилові вихори, які мають діаметр лише декілька метрів і досягають особливо великої інтенсивності в пустелях.

Горизонтальна протяжність районів, охоплених пиловими бурями, досить різноманітна – від декількох метрів до тисячі кілометрів і більше. Запиленість атмосфери по вертикалі може коливатись від 1-2 м (пилові або піщані поземки) до 6-7 км. В залежності від вологості ґрунту, можна визначити зміни в часі виникнення пилової бурі. Наприклад, якщо вологість ґрунту у шарі 0-20 см становить понад 25 мм, то пилова буря виникає за

швидкості вітру понад $15-17 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а якщо вологості менше ніж 10 мм, вона може виникати за швидкості вітру $8-10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Коли причини, що безпосередньо викликають пилову бурю зникають, піднятий з земної поверхні пил залишається у повітрі протягом декількох годин або навіть діб. Ці маси пилу переносяться повітряними потоками на значні території, утворюючи явище адвективної імлі, для якої характерні слабкий вітер (або штиль), низька вертикальна і горизонтальна видимість (до декількох десятків метрів). Пилові бурі і адвективна пилова імла є важливими факторами формування основного аерозольного шару тропосфери, який включає й інші елементи забруднення повітря і простягається у південних районах взимку від поверхні землі на декілька сотень метрів, а влітку в середньому до 3-5 км (іноді до 8-9 км). Максимальна протяжність бур досягається при південних, південно-західних і західних потоках. Тривалість пилових бур змінюється в широких межах від декількох хвилин до декількох діб. Повторюваність і тривалість пилових бур по території нерівномірна. В одних районах вони виникають у 4-5 раз частіше, ніж у інших.

Аерозолі, особливо мінеральний пил, впливають на погоду, а також на глобальний і регіональний клімат. Частилки пилу, особливо покриті забрудненням, діють як ядра конденсації для формування теплих хмар і крижаних ядер для утворення холодних хмар. Частилки пилу також впливають на зростання хмарних крапель і кристалів льоду, впливаючи таким чином на кількість і місце розташування зон опадів [28, 31].

17 червня 1994 р. була прийнята Конвенція ООН про боротьбу з опустелюванням та посухами, з метою закликати до негайних глобальних заходів у відповідь на зростаючу кількість піщаних та пилових бур. За даними ООН потужні піщані бурі стали наслідком опустелювання, яке загрожує понад 1 млрд га земель світу.

Опустелювання (прогресивне утворення пустелі або Сахельський синдром) - це процес деградації земель у відносно сухих (посушливих, напівсухих і посушливих субгумідних) районах планети, викликаних різними факторами, включаючи природні зміни клімату і діяльність людини. На території, де це явище типове, погіршуються фізичні властивості ґрунтів,

прогресує зменшення рослинності, збільшується забруднення води, різко падає продуктивність земель та здатність екосистеми до самовідновлення.

За підрахунками вчених, в середньому в атмосфері Землі знаходиться близько 20 мільярдів фунтів пилу [25, 29], - рис 1.1.

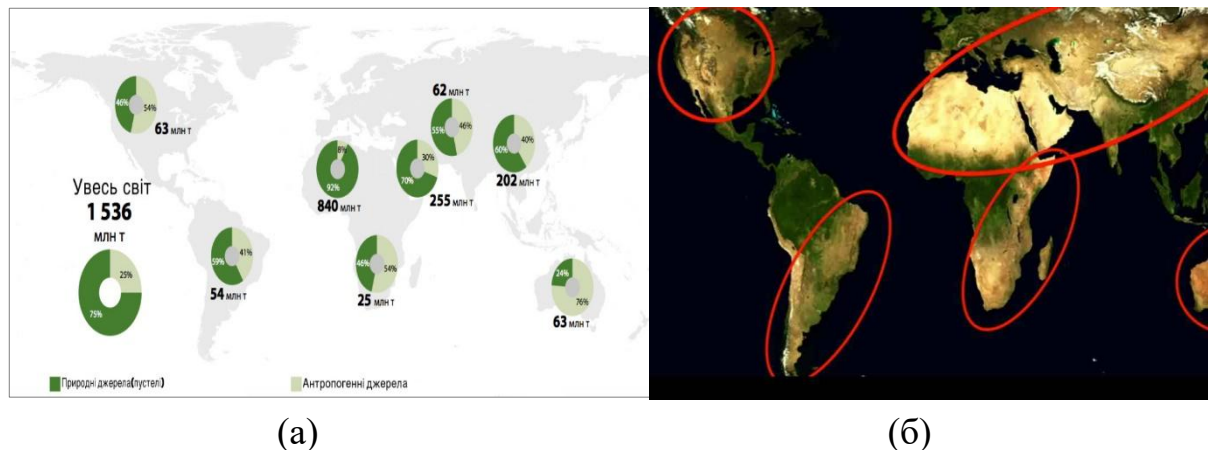


Рис. 1.1. Джерела викидів пилу в атмосферу, (т/рік) – (а); карта районів опустелювання Земного шару – (б)

Причиною бурі прийнято вважати турбулентні вихори, які виникають при посиленні вітру, і сильні вертикальні рухи, що утворюються завдяки прогріванню підстильної поверхні. Сильний денний прогрів призводить до значного збільшення температурних градієнтів до висоти 1-1,5 км над степами і до 2-2,5 - над пустелями. Виникнення та інтенсивність пилової бурі залежить також, з однієї сторони, від висушування та розпорошеності ґрунту, з іншої – від кількості і характеру опадів.

При стійкій стратифікації повітря шар приземного перегріву повітря обмежується декількома сотнями метрів (частіше до 200-300 м); на висотах повітря залишається абсолютно чистим. При запиленості, повітря може прогріватися по всьому шару внаслідок нагрівання завислих у ньому пилинок безпосередньо сонячними променями (ефект Воєйкова), відносна вологість при цьому сильно знижується.

Вітрова ерозія ґрунтів починається при деяких критичних значеннях швидкості вітру, рельєфу місцевості і структурі ґрунтів. У багатьох районах пилова буря виникає при швидкості вітру $10-12 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [4-6].

1.2 Класифікації та умови формування пилових бур

Перша і найпростіша класифікація пилових бур - залежно від кольору пилової бурі:

- чорні (чорноземи) - характерні для півдня ЄТР, України, США, де видуються чорноземні ґрунти (короткочасні, тривалістю до однієї години, велика кількість їх також може тривати від 10 до 12 годин і, порівняно рідко, понад добу);
- бурі та жовті, виникають переважно в Азії, (суглинок, супісок);
- червоні (суглинки з домішками окисів заліза) - трапляються переважно в Африці з її червоноземними ґрунтами, Ірані, Афганістані, Середній Азії;
- білі бурі, властиві районам з солончаковими ґрунтами.

За тривалістю пилової бурі й видимістю під час неї виділяють основні типи пилових бур [4-5]:

- короткочасні, до 30 хв, пилові бурі при видимості 3-4 км з покращенням до 6-10 км; зумовлені локальними змінами швидкості вітру;
- короткочасні пилові бурі з погіршенням видимості до декількох сотень (десятків метрів); пов'язані зазвичай з купчасто-дощовою хмарністю або різко вираженим холодним фронтом II роду з вузькою смугою фронтальної конвективної хмарності;
- тривалі й пульсуючі пилові бурі з невеликим нестійким в часі погіршенням видимості до 2-4 км; виникають в стійких баричних полях з великими градієнтами, переважно на південно-західних, південних і південно-східних периферіях добре розвинених стаціонарних антициклонів;
- тривалі та сильні пилові бурі зі зменшенням видимості до 0,5-1,0 км, в початковій стадії до кількох десятків метрів; пов'язані або з проходженням фронтів, або з добре розвиненими штормовими зонами зі значними баричними градієнтами; мають велику вертикальну і горизонтальну протяжність і тривалість не менше 2-4 год;

- пиловий або піщаний буревій, являє собою перенесення пилу або піску в шарі, прилеглому до поверхні землі, товщиною до 2 м.

Розглядаючи характеристику інтенсивності пилових бур, розрізняють сильні пилові бурі, якщо видимість знижується до 500 м і менше, помірні (при видимості від 500 до 1000 м) і слабкі (видимість більш як 1000 м).

Однією з головних характеристик пилових бур є циркуляційні умови формування:

1. Внутрішньомасові пилові бурі в зоні сильних вітрів (штормова зона), часто на південній та південно-західній периферії антициклонів і між антициклоном і поглиблюючим циклоном. Внутрішньомасові пилові бурі виникають в зонах великих баричних градієнтів, де спостерігаються сильні вітри. Це може бути перехідна область між близько розташованими осередками падіння і зростання тиску - наприклад, між циклоном, що поглиблюється та антициклоном, що посилюється; або ситуації при наближенні циклону до антициклону на етапі максимального розвитку чи при його наближенні до гірського хребта, орієнтованого по нормалі до його траєкторії, а також на південній периферії арктичного антициклону, який швидко зміщується по полярній або ультраполярній траєкторії на південь або південний захід.

2. Фронтальні пилові бурі, переважно виникають в зоні посилення вітру перед холодними фронтами. Зона фронтальних пилових бур витягнута уздовж фронту на сотні кілометрів, шириною до 200-300 км. Ця зона зміщується разом з фронтом, запиленість повітря простежується у великій товщі атмосфери, через те, що активні висхідні рухи виносять пил до 4-5 км і вище.

Пилові (піщані) бурі при проходженні теплих фронтів відзначаються рідко, оскільки з ними пов'язана передфронтальна зона облогових опадів, зволожуючих ґрунти. Крім того, в передфронтальній холодній повітряній масі зазвичай слабо розвинена вертикальна циркуляція, що призводить до ускладнень в обміні кількістю руху і не сприяє значному посиленню вітру. Після проходження фронту пилова буря найчастіше швидко слабшає і припиняється.

Для прогнозу еволюції пилової бурі і її виникнення необхідно дати прогноз швидкості вітру і інтенсивності вертикальних рухів в області

фронту. На цій основі передбачається час початку і закінчення пилової бурі, територіальне охоплення (якщо дається прогноз по району), її інтенсивність і видимість при ній, вертикальна протяжність [4-5].

Добовий хід повторюваності пилових бур відповідає добовому ходу швидкості вітру і нестійкості стратифікації пограничного шару влітку: має максимум в післяполудневі години, а мінімум - в другу половину ночі. Спостерігаються пилові бурі найчастіше ранньою весною, в березні або квітні, після сухої осені та малосніжної зими. Трапляються вони, хоч і рідше, і взимку - в січні або лютому.

1.3 Моделювання процесів транспортування пилових бур та їх концентрації

Всесвітня метеорологічна організація удосконалює свою діяльність щодо поліпшення прогнозів і раннього попередження про пилові (піщані) бурі, які приносять все більший вплив на навколишнє середовище, здоров'я людини й економіку в посушливих і напівпосушливих районах, таких як Північна Африка, Аравійський півострів, Центральна Азія і Китай. Не говорячи про те, що завдяки циркуляційним процесам, пилові (піщані) аерозолі досягають й території Європи [17, 28, 31].

Основою в прогнозі пилових бур є те, що їх виникнення пов'язане зі штормовими зонами й зводиться до прогнозу синоптичної ситуації. Зрозуміло, що при цьому має враховуватися стан підстильної поверхні. Одне з головних значень при прогнозі пилової бурі - це врахування властивостей підстильної поверхні, тобто ступеня закріпленості верхнього шару ґрунту, що залежить від його структури (пористості), наявності сезонного рослинного покриву та ступеня зволоження поверхні. Також, при прогнозуванні пилових (піщаних) бур має братися до уваги наявність добового і річного ходу, їх повторюваності та інтенсивності при різних синоптичних процесах, кліматичні та регіональні особливості їх поширення. Якщо брати до уваги добовий хід пилової (піщаної) бурі, то він чітко виражений тільки для внутрішньомасових бур, які виникають в штормових зонах на периферії

антициклонів. Вночі, особливо влітку, вони або зовсім припиняються або їх інтенсивність значно зменшується.

Велику роль при прогнозі пилових бур над територією з рідкою мережею синоптичних станцій відіграють супутникові фотографії. На знімках у видимому діапазоні спектра пилові бурі, при відсутності хмарності, являють собою розмиті світлі смуги з розмитими нечіткими границями. Враховуючи їх переміщення та еволюцію, можна скласти уявлення про час появи пилової хмари над певною територією, для якої розробляється прогноз.

Переміщення фронтальних пилових бур, частіше за все, передбачається одночасно з прогнозом переміщення відповідного фронту. Інтенсивність пилової (піщаної) бурі, тобто її ослаблення або посилення - передбачається з урахуванням загальних змін баричного поля, поля вітру, та добового ходу вітру. Прогноз переміщення пилу та його концентрацій в атмосфері має дуже важливе значення для сприяння зниженню ризику поганих наслідків пилової бурі в багатьох областях. За останнє півстоліття було розроблено багато чисельних систем для моделювання та прогнозування піску й пилу. Для імітації процесів піщаної та пилової бурі використовуються передові методи кількісної параметризації. На сьогодні існує дванадцять оперативних або науково-дослідних центрів з питань піщаного та пилового прогнозування у всьому світі [29].

Всесвітня метеорологічна організація створила Систему попередження про піщані і пилові бурі та їх оцінки, призначену підвищити здатність країн завчасно надавати користувачам точні прогнози, результати спостережень, інформацію і знання щодо піщаних та пилових бур - WMO Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (SDS-WAS). Вже у 2017 році ВМО випустила перший щорічний бюлетень про повітряний (піщаний) пил, з оглядом концентрації атмосферного пилу та його географічному поширенню у 2016 році. У рамках цієї системи видаються глобальні і регіональні прогнози небезпеки пилових явищ і організовані регіональні центри для Північної і Південної Америки, для Азії, а також для Північної Африки, Близької Схід і Європи. Програма SDS-WAS містить безліч науково-дослідних і оперативних інститутів, щодня виконуючи прогнози піску і пилу [17, 28, 31].

Моделювання транспортування пилу і концентрацій в атмосфері дуже важливе для сприяння зниженню ризику в багатьох областях. За останнє десятиліття була розроблено багато чисельних систем моделювання та прогнозування піску і пилу. Для імітації процесів піщаної і пилової бурі використовуються передові методи кількісної параметризації. Проте, у цілому, наявні дані про концентрації пилу обмежені, що ускладнює перевірку моделей. Розподіл часток пилу вводиться в моделях як загальний компонент; для імітації процесів піщаних і пилових бур використовують розширені методи чисельної параметризації. В загальному, доступні обмежені дані про концентрації пилу, що ускладнює перевірку моделей. Іншою проблемою є просторова роздільна здатність в атмосферних моделях це, як правило, 10-100 км, що є занадто великим кроком для представлення просторових варіацій викидів пилу.

Антропогенний вплив, як наприклад, практика землекористування, може призвести до додаткового завантаження пилу в атмосферу. Розрахунки моделей вказують, що $50\pm 20\%$ загального атмосферного пилу походить з видозмінених ґрунтів, що залежать від культивування, збезлісення, ерозії і частих змін рослинності через посухи і дощі. З іншого боку, зміна глобального і регіонального клімату істотно впливає на об'єм доступного пилу й області джерел пилу через зміни в полях опадів, вітру і загальної циркуляції в цілому [13, 16-17, 19, 31].

Центр прогнозування пилу Барселони (BDFC) готує регіональні поля прогнозів з використанням моделі NMMB/BSC-Dust протягом усього року. Модель складається з чисельної системи прогнозування погоди, інкорпорації он-лайн параметрів всіх основних фаз циклу атмосферного пилу [27].

Афінський національний університет надає прогнози концентрації пилу, вмісту аерозолів, по Європі, Північній Атлантиці і Центральній Азії [22].

Цікавими є дослідження з вивчення впливу відкладень сахарського пилу на динаміку танення снігового покриву на висотній ділянці в Альпах. Встановлено, що 2013-2016 рр. характеризувалися кількома потужними сахарськими пиловими бурями, внаслідок яких були відкладені значні маси мінерального пилу в європейських Альпах [11]. Результати роботи показали, що ефект сахарського пилу скорочує тривалість снігового покриву через зворотні зв'язки сніг-альbedo.

Довгострокові дослідження виявили чітку сезонну структуру сахарських пилових бур (SDEs), що впливають на Центральну Європу. Аналіз щоденних даних аерозольних індексів за період 1979-2011 рр. показав весняний і літній максимум випадків високої концентрації мінерального пилу в широкій області Карпатського басейну, встановлені три основних типи полів атмосферного тиску, що зумовлюють транспортування сахарського пилу [21].

1.4 Вплив пилових бур сфери діяльності

Зазвичай після пилової бурі (або навіть перед нею) в повітрі знаходяться в зваженому стані частинки піску і пилу. Вони не рухаються, а просто коливаються практично на одному місці, сильно погіршуючи видимість при цьому. Пилові бурі завдають значної шкоди практично всім сферам життєдіяльності, а також життєдіяльності та здоров'ю людини [29].

Основними сферами потерпання від цього явища є:

- зниження видимості, що сильно впливає на транспорт (насамперед авіасполучення або автотранспорт);
- зменшення кількості сонячного світла, що досягає поверхні планети;
- пошкодження рослин (навіть до їх знищення);
- знищення родючого шару ґрунту;
- ускладнення дихання живих істот (стає причиною деяких захворювань).

За даними ІКАО, найбільше число авіаційних подій та їх передумов, у всіх країнах світу, зумовлено недостатньою дальністю видимості. З обмеженою видимістю пов'язано близько 70% авіаційних катастроф, що відбулися внаслідок несприятливих метеоумов (з яких через пилові бурі - 28%). Пилова буря зазвичай супроводжується сильними вихорами і шквальними вітрами. У цих випадках повітря також рухається за спіраллю знизу вгору, піднімаючи в атмосферу велику кількість пилу. Діаметр вихору над морем становить 25-100 м, а над землею 1000-2000 м. Великою

небезпекою для повітряного судна (ПС) є величезна швидкість вітру і значне падіння тиску. Крім того, шквальний вітер небезпечний при високій швидкості низхідного потоку повітря, який виникає перед грозовими хмарами через просідання охолодженого повітря, викликане випаданням опадів. Повітря, що опускається з хмари, стикається з землею поверхнею і на високій швидкості поширюється в сторони, піднімаючи хмари пилу. Швидкість вітру при шквалі часто перевищує $15-20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а місцями $40 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Склад і розмір частинок пилової бурі визначається характером ґрунту району, де вона зароджується. Як правило, це глиняні і піщані частинки. Пил, що піднімається з землі, може мати механічну і хімічну дію. Механічний вплив обумовлений тим, що частинки, що складаються з абразивного матеріалу, рухаються на високих відносних швидкостях. Змішуючись з мастильними матеріалами, вони утворюють абразивну пасту, тим самим завдаючи відчутних пошкоджень двигунам і в цілому структурі ПС. При зіткненні з пиловою бурею на маршруті екіпаж зобов'язаний обійти її візуально або пройти над нею. Зміна висоти або шляху польоту повітряного судна з метою обходу пилової бурі дозволяється екіпажу тільки за погодженням з диспетчером, за винятком випадків, попередньо побачених в інструкціях. Захід на посадку та посадка в умовах пильної бурі при сильній бовтанці забороняється [1].

Так само й при пересуванні автотранспорту, коли видимість мінімальна, загроза збільшення кількості ДТП зростає.

Пилові бурі видувають, тим самим знищуючи, верхній родючий шар ґрунту, заносять лісові смуги. В деяких випадках пилова буря за 18-20 годин може здути шар ґрунту завтовшки 1–6 см. Для відновлення 1 см ґрунту в природних умовах необхідно близько 250–300 років, тобто, пилова буря завдає ґрунтовому покриву невиправних втрат. Наслідки шкідливої дії пилових бур відчуються впродовж багатьох років.

Транспортуванням у повітрі пилових аерозолів завдає серйозну загрозу для здоров'я людини та інших живих істот. Розмір частинок - є ключовим фактором, що визначає потенційну небезпеку для стану здоров'я. Якщо, до організму людини потрапляють частинки розміром більш ніж 10 мкм (тобто не є інгалюючими), то вони частіше за все пошкоджують тільки зовнішні органи, викликаючи, в основному, подразнення шкіри та очей. Частинки

пилових аерозолів, розміром менше ніж 10 мкм, часто потрапляють в ніс, рот і верхні дихальні шляхи, тому можуть викликати респіраторні захворювання, такі як астма, трахеїт, пневмонія, алергічний риніт і силікоз. Найдрібніші частинки можуть проникати в нижні дихальні шляхи й потрапляти в кровообіг, де вони можуть впливати на всі внутрішні органи та викликати серцево-судинні захворювання.

Оцінюючи розрахунки вчених на основі глобальної моделі у 2014 році, результатом впливу пилових частинок на організм людини - стало причиною близько 400 000 передчасних смертей від серцево-легеневих захворювань у населення у віці понад 30 років.

Головним і постійним засобом боротьби з пиловими бурями є рослинний покрив – створення полезахисних лісових смуг різної конструкції та застосування певного комплексу агротехнічних робіт. Наслідками відсутності рослинного покриву є збільшення просторових масштабів перенесення пилу, що тим самим впливає на потужність й інтенсивність пилових бур. Також застосовують збереження, оновлення та створення нових лісових масивів; відмову від монокультур та дотримання сівозмін; зменшення хімічного навантаження на ґрунт; припинення спалювання рослинних залишків на полях, відкриття прибережних територій та витоків річок; використання органічних добрив та багаторічних трав'яних культур для покращення структури ґрунту; утримання снігу та інші заходи з накопичення та використання талої та дощової води [28-29].

2 РЕЖИМ УТВОРЕННЯ ПИЛОВИХ БУР НАД САХАРОЮ

За останні десятиліття інтенсивність пилових потоків над пустелями значно зросла. Головною причиною цього стало збільшення антропогенного впливу на осередки пилоутворення. На сьогодні, можна спостерігати те, що більшість середземноморських територій Африки, Європи та Північна Сахара стають сухішими та збільшується запиленість атмосфери, що починає порушувати радіаційний баланс Землі. Наслідками цього процесу, з одного боку — посилення посухи в посушливих районах, з іншого — пил може збільшити кількість опадів на деяких територіях (оскільки аерозолі виступають ядрами конденсації).

Північна Африка - регіон в Африці, що охоплює територію загальною площею ~ 10 млн. км²; на більшій частині розташована пустеля Сахара, яка простягнулася уздовж південного узбережжя Середземного моря (у Сахарі зафіксована найвища на Землі температура в тіні $+58^{\circ}\text{C}$). Значна частина Північної Африки знаходиться в межах тропічного і субекваторіального поясів, і, відповідно до цього, в її межах виділяються дві великі фізико-географічні області: пустельно-тропічна Сахара і саванний Судан.

Сухі субтропіки характеризуються спекотними південними вітрами, що виносять пил із внутрішніх районів, викликаючи багатоденні пилові бурі, при цьому швидкість вітру іноді досягає більше $50 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Як правило, вони спостерігаються навесні, але можливі й в іншу пору року. Сахарські вітри – це пилові і піщані північно-африканські бурі (самум, сироко, хабуб, хамсін, харматан і ін.), а також система вітрів, обумовлена еволюцією термічних і циркуляційних умов у пасатних широтах.

Сахара - це найбільше джерело пилу на Землі, пилові потоки цієї пустелі осідають по всій планеті. Щороку вітер піднімає приблизно від 60 до 200 млн.т ґрунту і гірських порід, ці дрібні частки переносяться повітряними потоками в різних напрямках. Пил частково осідає в Середземномор'ї й у західній Європі, а основна частина рухається через Атлантику. Коли над обома регіонами знижується атмосферний тиск, потік повітря із Сахари разом з частками пилу втягується у загальну циркуляцію над Іспанією, Францією і Португалією, часто досягаючи північної Європи [13, 16-17, 31].

Існує велика мінливість у транспортуванні пилу. Сахарські шлейфи можуть утворювати іберуліти (особливу тропосферну агрегацію аерозолів), коли ці шлейфи проходять через Північну Африку і східну частину північної частини Атлантичного океану, і часто досягають навколо середземноморських районів Західної Європи. Європа не є особливо пильним континентом, у порівнянні з Австралією або Африкою, але існує сучасна пилова активність, в основному, за рахунок пилу з Північної Африки [18].

Сахарський пил може бути піднятий конвекцією над спекотними пустельними районами і транспортуватися у потоках повітря, що переміщуються на сотні-тисячі кілометрів. Відстань транспортування в основному залежить від метеорологічних умов у вільній атмосфері. Вітри переносять пил із Сахари - найбільшого джерела - на захід у Північну і Південну Америку, на північ у Європу. Пил у сполученні з надзвичайно гарячим, сухим повітрям пустелі Сахара часто утворює атмосферний шар, так званий, сахарський повітряний шар, що впливає на тропічну погоду, наприклад, перешкоджаючи розвитку ураганів.

У спеціалізованих дослідженнях розділяють фракції пилових частинок, за якими просліджують відкладення у різних районах Європи (грубий пил, дуже грубий, дрібний, дуже дрібний тощо). Відповідно до розмірів процес транспортування і утворення пилу має особливості. Різні джерела часток установлюють дві відмітні популяції часток: за європейським сценарієм більш крупна фракція пилу «виробляється» на континенті і переміщається ріками, в даний час пил у Європі утворюється в значних кількостях тільки у долинах в Італії; некрупний пил переноситься ззовні і видувається в континентальну область. Він широко розсіяний, і надходження часток та тривале відкладення обумовлюється окремим випадком пилової бурі. У Європі більш дрібний пил в основному транспортується на північ у напрямку осадження, але великий пил з північної Африки рухається, здебільшого, на південь та схід, і в незначних кількостях відмічається на півночі і заході.

Велика частина сахарського пилу відкладається над середземноморськими країнами південної Європи. Пилові потоки з Сахари часто спостерігаються в країнах Середземномор'я, як правило, у вигляді жовтуватого-коричневих хмар, що вимиваються дощами. Іноді частки пилу із західної Сахари уздовж східного узбережжя Атлантичного океану

переносяться далі на північ упритул до Великобританії, а дрібні частки пилу іноді спостерігаються у Німеччині і навіть Скандинавії. У Європі сахарські пилові бурі перетинають Середземне море, а потім розсіюються змінними вітрами по всьому континенту.

Величезна кількість пилу видувається із Сахари на північ. Оцінки загального об'єму сахарського пилу варіюються від 130-460 до 1400 млн. т у рік, і тільки близько 12% від загального експорту сахарського пилу транспортується на північ. Більш крупний пил у середземноморському басейні також осідає з опадами, що призводить до, так званих, «червоних дощів», коли частинки пилу виступають у якості ядер конденсації [18].

Сахарський повітряний шар, або більш відомий як сахарський пил, являє собою шар дрібних аерозолів, таких як пісок, бруд і пил. Дрібнодисперсні часточки сахарського пилу, поширюючись у пасатному потоці, являють собою ідеальні ядра конденсації, на яких осідає атмосферна волога і відбувається укрупнення крапель води - коагуляція. Це сприяє посиленню хмароутворення і, при сприятливих умовах в атмосфері, може призвести до виникнення тропічного урагану. Легкі фракції сахарського пилу можуть підніматися на висоту до 3 км і усього за 5-7 днів перетинати Атлантичний океан; виявлена пряма залежність між пиловими бурями в західній частині Сахари і наступним посиленням інтенсивності опадів у Карибському басейні.

Наведемо характеристики місцевого вітру сирокко, як одного з основних факторів перенесення сахарського пилу до Європи.

Сирокко - (італ. scirocco - східний вітер) - задушливий, спекотний (до 35°C уночі), дуже пильний вітер південного, південно-східного або східного (іноді навіть південно-західного) напрямку. Дме з пустель, на відміну від самуму й інших африканських бур, що дмуть у пустелях і степах. Типовий для Північної Африки і всього Середземноморського басейну. На плоскогір'ях Північної Африки і на схилах гір, сирокко має характер фена, підсилюється після полудня, а ввечері і вночі слабшає, звичайно дме по 2-3 дня підряд. Виникає сирокко у всі пори року, частіше навесні і восени, рідше - влітку. Найбільшої сили досягає в березні і листопаді, в деяких регіонах іноді розвиває швидкість до 100 км·год⁻¹ (55 вузлів - сила урагану), досягаючи

штормової сили (від 2 до 9 балів за шкалою Бофорта), хоча подекуди вважається вітром середньої сили.

Сироко зароджується в глибинах аравійських і північно-африканських пустель, в теплих, сухих, тропічних повітряних масах, що рухаються на північ у напрямку низького тиску до сходу через Середземне море. Гаряче сухе континентальне повітря змішується з більш холодним, вологим повітрям морського циклона, і, обертаючись проти годинникової стрілки, переміщується до південного узбережжя Європи. На шляху через Середземне море повітря стає більш вологим, проте часто висушує рослинність півдня Європи, переносячи великі маси пилу і піску, що обумовлює сухі тумани і пилову імлу [13, 16, 19, 28, 31].

Сироко приносить тропічне повітря, сформоване над пустелями в теплих секторах циклонів, центри яких проходять над північними районами Африки – рис.2.1.

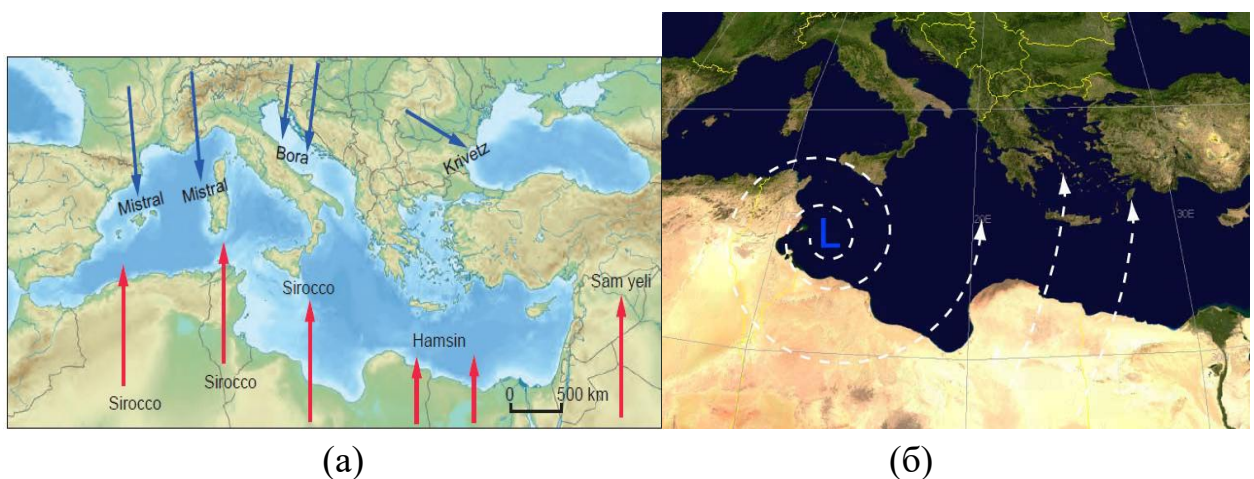
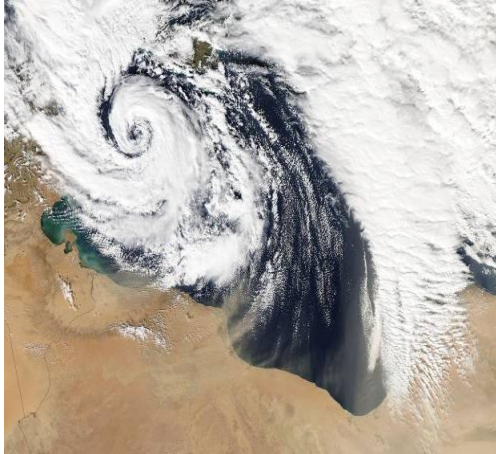


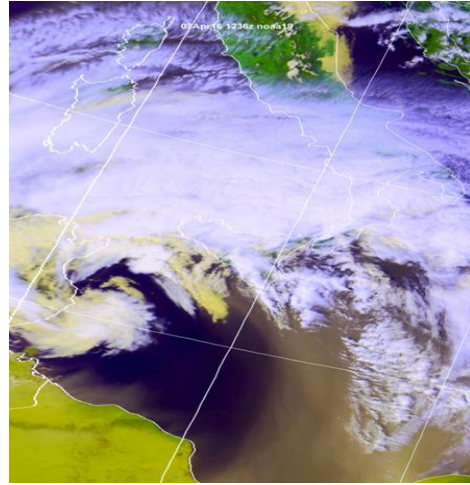
Рис. 2.1. Схема місцевих вітрів над Середземномор'ям - (а);
виникнення сироко у системі циклону – (б)

Сироко виносить червоний і білий пил із Сахари в більш північні райони, де він випадає у виді забарвлених дощів. Частинки пилу виступають як ядра конденсації для опадів. Дощ (сніг) забарвлюється в червоний, коричневий, жовтий кольори, коли величезний стовп сахарського пилу стикається зі штормовою системою циклону, при цьому опади проходять через шлейф пилу, що розташовується нижче рівня хмар [28, 31].

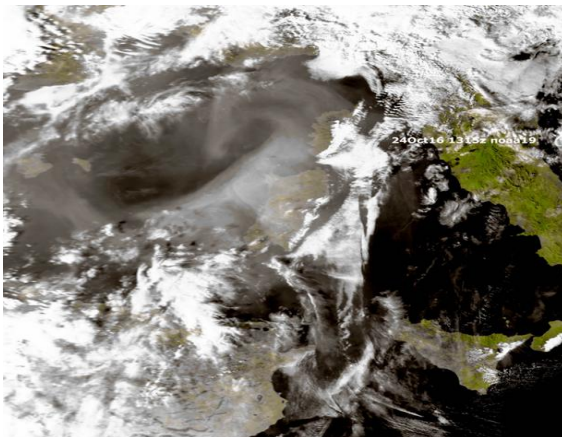
Приклад переносу пилових потоків на Середземномор'я ілюструється на рис. 2.2. Виразно простежується втягування пилу у вихрову систему циклонів.



07.11.2014 р.



07.04.2016 р.



24.10.2016 р.



29.10.2018 р.

Рис. 2.2. Супутникові знімки зображення пилових потоків [23-24, 30]

Зважені частки пилу чи піску на знімках метеорологічних штучних супутників Землі (МШСЗ) виглядають сірим покривалом на фоні темної водної поверхні і яскраво білого чи білого тону хмарності; контури пилових (піщаних) потоків є нечіткими, характерною ознакою зображення є шлейфи пилу світло-сірого тону, орієнтовані за напрямком вітру. Особливо чітко вирізняється пісок і пил над темною водною поверхнею або над засніженою поверхнею.

3 ОСОБЛИВОСТІ ЦИРКУЛЯЦІЇ АТМОСФЕРИ НАД СХІДНОЮ ЄВРОПОЮ

3.1 Загальні відомості

Одним з головних клімато- і погодоутворювальних чинників — характер циркуляції атмосфери над певною територією. Основним механізмом міжширотного обміну теплом і вологою є атмосферні об'єкти синоптичного масштабу – циклони та антициклони помірних широт.

Незважаючи на те, що Україна знаходиться в області європейської улоговини, на її територію значною мірою впливає теплий північно-атлантичний і холодний сибірський максимуми. Взимку північно-атлантичний максимум в Україні формує теплу і малосніжну зиму, сибірський максимум — сувору і морозну, європейська улоговина - м'яку, сніжну зиму і сприяє переміщенню південних циклонів. Влітку Україна знаходиться під впливом також трьох центрів дії атмосфери: азорського максимуму, європейської улоговини (остання розміщується східніше ніж зимою) і східного термічного гребеня високого тиску. Розвинуті області високого тиску формують посушливі погодні умови [6].

Зміна інтенсивності або положення центрів дії атмосфери відносно середнього або кліматичного географічного положення спричинює зміну погодних умов у прилеглих регіонах. Утримання такої ситуації протягом двох-трьох тижнів зумовлює середні місячні аномалії погодних умов у Північній півкулі й окремих регіонах.

На територію України досить часто переміщуються морські повітряні маси з північних районів Атлантики (рідше - з центральної частини Атлантичного океану і Середземного моря) та арктичне повітря з арктичних морів. Однак найбільшу повторюваність має континентальне повітря, яке формується над рівнинами Євразії з арктичного або морського повітря помірних широт. За наявності малоградієнтних областей підвищеного тиску територія країни може служити осередком формування континентального

повітря. Перенесення повітряних мас відбувається за різних синоптичних процесів, які відрізняються масштабами, формами та сезонними відмінностями, що зумовлює часту зміну та складність погодних умов [6].

Циклонічна активність над територією України спостерігається протягом всього року, але частіше - в холодний період (з листопада по березень). Основною траєкторією їх руху є перенесення із західних районів Чорного моря, низов'їв Дунаю і півночі Італії, а також з районів Малої Азії — південні та південно-західні циклони, що мають повторюваність 6-8 випадків на рік. Малоактивність циклонів спостерігається у літній період. Тоді ж прослідковується їх вираження у вигляді фронтальних хвиль. Проте на малорухомих фронтах виникає цілий комплекс небезпечних конвективних явищ, прогноз яких ускладнений через слабку активність і непередбачуваність основного синоптичного процесу [7, 10].

Найбільш активні атмосферні процеси і різкі зміни погоди характерні для зими та першої половини весни й кінця осені. У цей час домінує процес переміщення на південь східної Європи або Чорне море південних циклонів, що часто переривається стаціонаванням антициклонів на південному сході ЄТР або заходом Казахстану. При відсутності блокуючого антициклону циклонічна діяльність розвивається над всім регіоном, а при його наявності відбувається її локалізація над Чорним морем. Для Східної Європи південними є циклони, які зароджуються над Чорним і Середземним морями та прилеглими частинами континенту і переміщуються на північ і північний схід, поглиблюючись і спричиняючи різкі зміни погоди.

Циклони, які утворилися над акваторією Середземного моря, при переміщенні на континент піддаються значній орографічній еволюції під впливом численних гірських масивів Апеннінського та Балканського півостровів. Внаслідок динамічних змін тиску в умовах складної орографії частим є процес розтягнення області низького тиску і утворення багатоцентрової депресії від Адріатичного моря до Угорської низовини, в якій, за відсутності інтенсивної адвекції холоду через перешкоджання Альп потокам арктичного повітря, циклогенез малоактивний, а циклони, що досягають території України, слабо розвинені. Така орографічна депресія утворюється при південно-західних потоках в середній тропосфері над Адріатичним морем, Угорською низовиною, Балканами, іноді зберігається

протягом декількох діб з поширенням на схід і північний схід на райони Карпат і Україну.

Іншою особливістю циклогенезу в Середземноморському регіоні є сегментація (роздвоєння) циклонів в Дінарських Альпах, завдяки чому зберігаються два циклонічних центри – над Адріатичним морем та Угорською низовиною. Останній може переміщуватися на територію України, іноді поглиблюючись в процесі виходу, що веде до суттєвого погіршення погодних умов на території країни.

Південні циклони, що істотно впливають на погодні умови України, поділяють за географічним районом їх виникнення (генуезькі, балканські, угорські, чорноморські).

Всі траєкторії південних циклонів можна розділити на типи:

- перший тип охоплює циклони, які переміщуються на Україну з боку Карпат і впливають в основному на погодні умови західних районів країни;
- другий тип — це циклони, що переміщуються через Чорне море на південні та центральні райони України.

Переміщення південних циклонів над територією України супроводжується тривалим погіршенням погодних умов. В зимовий період – це масштабні зони хуртовин, які поширюються вздовж траєкторії в більш північні широти, а влітку — такі циклони часто супроводжуються посиленими облоговими опадами (на холодних фронтах і фронтах оклюзії виникають грози, зливи, шквали).

Нерідко на територію України переміщуються, так звані, пірнаючі циклони – це циклони, які зміщуються з високих широт в низькі з великою північною складовою. Процес утворення та еволюції пірнаючих циклонів відбувається при меридіональній перебудові висотного баричного поля над Європою. Але, на відміну від південних, пірнаючі циклони виникають поблизу вершини висотного гребеня і рухаються вдовж низхідної гілки ВФЗ. Процес швидкого зміщення циклону з північних широт до південних називається «пірнанням». Найбільша повторюваність пірнаючих циклонів відмічається у холодний період року, а саме, з жовтня по березень, коли в атмосфері Північної півкулі створюються сприятливі умови для

меридіональної перебудови висотних термобаричних полів і загострення планетарної висотної фронтальної зони.

За класифікацією Чорнової В.Ф. по районах виникнення і переміщення пірнаючих циклонів виділяють такі траєкторії:

- циклони, що переміщуються з Норвезького моря і Скандинавії на західні й південні райони Східної Європи (Білорусь, Україна, центральні райони Росії);
- циклони, що зміщуються з Баренцового моря на північні та східні райони Східної Європи; циклони, які рухаються з Карського моря на східну половину європейської території Росії.

Пірнаючі циклони при проходженні через територію України зумовлюють складні погодні умови. Насамперед, це посилення швидкості вітру, особливо у тилівій частині циклонів і на холодному фронті до 15 м·с⁻¹ і більше. У холодний період року за сильного вітру і випаданні снігу спостерігаються тривалі хуртовини (до 12-15 год безперервно), а в безсніжний період у південних і східних районах України розвиваються пилові бурі, які завдають великих збитків сільському господарству [7, 10].

3.2 Блокуючі процеси

Україна потрапляє в одну з областей найбільшої частоти блокуючих процесів, їм належить особливе місце при аналізі антициклонегезу над східною Європою.

У науковій літературі для визначення цього процесу використовують такі терміни, як «блокування», «блокінг», «блокуюча ситуація», «блокуючий антициклон», «блок», «блокуюча система», «блокуючий процес» і т.п. До теперішнього часу не сформульовано чіткого, загальноприйнятого визначення процесів блокування. З узагальнення визначень блокуючих антициклонів, наданих вченими [8], витікає, що такі баричні утворення являють собою окремих випадок великих, малорухомих, високих і інтенсивних антициклонів, які розвиваються у середніх широтах (35 – 60° півн ш.), порушують існуючий у помірних широтах західно-східний

панівний потік і є ланкою стійкого типу циркуляції, що зберігається протягом тривалого часу над великою територією (від тижня і більше).

Типові розміри блокуючих гребенів порівнянні з розмірами океанів за довготою в середніх широтах і складають близько 7–8 тис. км, що відповідає хвильовим числам 2-3. Блокуюча активність вище в осінньо-зимові місяці (жовтень-березень) і менш виражена влітку і навесні (квітень-вересень).

Більшість наявних на сьогодні досліджень блоків базуються на синоптичному аналізі атмосферних процесів і його статистичній обробці.

Блокування представляє аномальне атмосферне явище, що веде за собою серію перебудованих процесів, кожен з яких може обумовити аномальні режими погоди, які іноді призводять до катастрофічних наслідків та звичайно носять тривалий характер. Навесні та влітку такі процеси можуть призводити до посухи, взимку - сприяти регенерації циклонів і, як наслідок, до розвитку аномальних проявів у полях вітру й опадів. Процеси блокування варто відрізнити від процесів виникнення гребневих відрогів через динамічну взаємодію циклонічних і антициклонічних циркуляцій.

Причини розвитку блокуючої ситуації різноманітні. Спроби теоретичного пояснення поведінки зонального руху, його руйнування і формування блокування можна об'єднати в групи [9]:

- а) теорія нестійкості атмосферних процесів;
- б) теорія впливу аномалій температури поверхні океанів;
- в) теорія хвильових процесів в середовищах з дисперсією.

Відомі методи виявлення блокування умовно можна поділити на дві групи [8]:

1) методи, основані на візуальному аналізі синоптичних карт. При цьому до кінематичної структури термобаричного поля пред'являється вимога виконання і збереження протягом конкретного інтервалу часу ряду якісно визначених умов. Такий підхід дозволяє досить повно і точно оцінити синоптичну ситуацію, проте носить суб'єктивний характер, саме це є недоліком синоптичної групи методів;

2) методи, які передбачають використання деякої сукупності показників, що неповністю описують блокуючу ситуацію, але задовольняють вимоги даного конкретного дослідження; досить просто піддаються автоматизації і називаються об'єктивними методами.

Вирізняють три можливі форми блокування у залежності від конфігурації висотного гребеня і траєкторії приземних антициклонів [20]:

1. Тип 1 характеризує розщеплення західного потоку на дві гілки, тобто має місце дипольна структура поля геопотенціалу: антициклон на півночі і циклон на півдні.
2. Тип 2 визначає наявність висотного меридіонально видовженого гребеня. По східній периферії гребеня відбувається «пірнання» циклонів, сформованих на арктичному фронті, а по західній периферії зміщуються південні циклони, утворені на полярному фронті.
3. Тип 3 виділяє висотну омегаподібну гребеневу структуру, більш витягнуту у зональному напрямку. Біля поверхні землі у період блокування антициклони можуть зміщуватися по петлеподібній, ультраполярній траєкторії, або повільно переміщуватися на схід.

Серед об'єктивних методів виявлення блокінгу виділяють [12]:

1) Метод індексу блокуючого антициклону – ІБА. В основу покладене існування блокуючого антициклону, яке надається у вигляді стійкої за часом додатної аномалії тиску чи геопотенціалу.

2) Метод індексу дипольної структури блокуючої ситуації. Базується на врахуванні характерного для блоку розщеплення західного потоку на дві гілки з формуванням в обтічній області диполу у термобаричному полі.

Існують два індекси, що відображають дипольну структуру термобаричного поля. Перший індекс був запропонований Лейенасом і Окландом у 1983 р. В роботах [14-15] проведено аналіз особливості меридіонального профілю геопотенціалу для виявлення блокінгів за формулами Леєнаса і Оккланда (Lejenas H., Okland H.).

Для ідентифікації блокування використовують індекс $I(\lambda)$ різниці геопотенціалу H_{500} між 40 і 60° півн.ш. у північній півкулі і 35 і 50° півд.ш. – у південній півкулі на довготі λ :

$$\begin{aligned} I(\lambda) &= H_{40^\circ \text{ півн.ш.}}(\lambda) - H_{60^\circ \text{ півн.ш.}}(\lambda) \\ I(\lambda) &= H_{35^\circ \text{ півд.ш.}}(\lambda) - H_{50^\circ \text{ півд.ш.}}(\lambda), \end{aligned} \quad (3.1)$$

де H – значення H_{500} , отримане у результаті розкладання в ряд Фур'є за широтними колами для кожних 10° довготи.

Такий індекс блокування має назву індексу зональної циркуляції. До блоків відносять випадки, коли одночасно задовольняються умови:

$$\begin{aligned} I(\lambda) < 0; \\ I(\lambda-10) + I(\lambda) + I(\lambda+10) < 10. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Надалі розраховують цей індекс для кожного вузла сітки за формулою:

$$I(\lambda, \varphi) = H(\lambda, \varphi - 15) - H(\lambda, \varphi), \quad (3.3)$$

де φ – широта;

λ – довгота;

H – значення H_{500} .

Одночасно введений додатковий критерій: західна складова геострофічного вітру у напрямку до полюсу від широти φ і довготи λ , повинна бути $\geq 15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Другий індекс, що відображує характерну для блоку дипольну структуру, - $VI(\lambda)$, обчислюється за формулою:

$$VI(\lambda) = U_{27,5^\circ \text{півд.ш.}}(\lambda) + U_{57,5^\circ \text{півд.ш.}}(\lambda) - (U_{42,5^\circ \text{півд.ш.}}(\lambda) + U_{47,5^\circ \text{півд.ш.}}(\lambda)), \quad (3.4)$$

де $U(\lambda)$ – зональна складова швидкості вітру.

Максимальні додатні значення індексу $VI(\lambda)$ відповідають блокуючій ситуації на даній довготі. Такий індекс блокування носить назву індексу зональної складової швидкості вітру [8].

В даному дослідженні використано розрахунки індексу блокування з метою встановлення причин тривалого стаціонарування південних циклонів над Середземним морем та півднем України, а також визначеної траєкторії пірнаючого циклону, і, як наслідок, при цих процесах - характерна орієнтація повітряних мас при винесенні пилових бур з Північної Африки.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПИЛОВОЇ АДВЕКЦІЇ НАД ЄВРОПОЮ

4.1 Формування забарвлених опадів

В останні роки на території України було відмічено кілька випадків випадіння забарвлених опадів. Основою цих процесів стали сильні пилові бурі у Північній Африці й перенесення пилових потоків через Середземномор'я струминними течіями у циклонічних системах [3]. Такі синоптичні процеси суттєво впливають країни південної Європи, а для України - істотного впливу на зміни клімату не мають. Хоча ці ситуації є аномальними з погляду територіального віддалення африканського континенту, але частота їх повторюваності з кожним роком збільшується.

Одиу з найбільш показових випадків переносу пилових потоків до Чорного моря й Кавказу відмічався у третій декаді березня 2018 р. Такому аномальному процесу сприяла синоптична ситуація, а саме - південний циклон над Середземним морем, що тривалий час зберігав положення в результаті існування блокуючої системи, утвореної двома антициклонічними системами біля поверхні землі - над Атлантикою і відрогом сибірського максимуму над східною Європою. В результаті, циклонічна діяльність переважала у смузі 25-40 ° півн.ш. при переміщення серії південних циклонів. Циклони розвивалися до рівня 500 гПа і зміщувались по південній периферії блоку.

За даними карти АТ-500 простежується ВФЗ зі значними контрастами у низьких і високих широтах. Практично вся Європа і західний Сибір знаходяться під дією поширеної глибокої улоговини холоду, яка має різновид ультраполярній орієнтації ВФЗ – рис.4.1.

Ультраполярне вторгнення активізувало фронтальну діяльність в серії південних циклонів та призвело до надмірної кількості опадів у вигляді снігу.

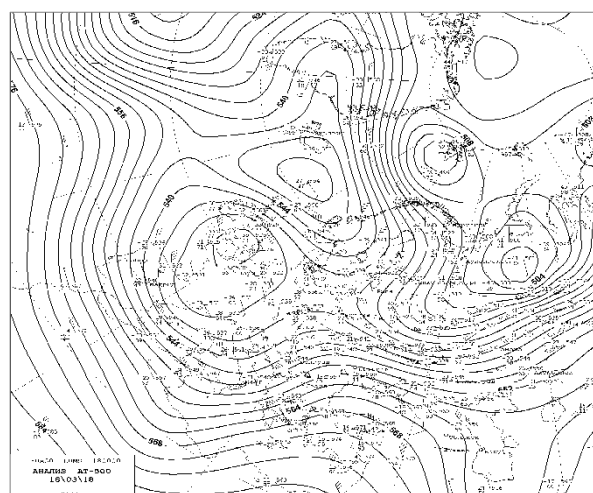
Блокування цим антициклоном обумовило аномальні морози в Європі наприкінці лютого й до середини березня, як за відмітками так і за пізніми календарними строками. В деяких країнах температура повітря опустилася до -36...30°C, а в Альпах -26°.

Виявлення блоку в даному дослідженні, проведено на першому етапі якісним способом - за конфігурацією висотного термобаричного поля і часом стаціонарування гребеневої структури. Починаючи з 18 до 23 березня відмічається дипольна структура поля геопотенціалу H_{500} при формуванні потужного гребеня з криволінійною віссю над центральною і північною Атлантикою, який до 23 числа поширився на західну і північну Європу, та сполученої улоговини над європейською територією Росії (ЄТР) і Європою з ультраполярною віссю. На другому етапі встановлення характеристик блоку застосовано розрахунок індексу дипольної структури блокуючої ситуації [8]. При визначенні індексів блокування використано дані ре-аналізу Національного центру передбачення клімату США NCEP/NCAR поля геопотенціалу на рівні 500 гПа у межах сітки значень з просторовою розв'язкою 20° з.д.– 80° сх.д. і $35\text{--}90^\circ$ півн.ш. Розраховано індекс блокування Лейєнаса і Окленда $I(\lambda)$, який враховує меридіональний профіль геопотенціалу. За результатами розрахунків з метою точно (детального) аналізу і максимальної наочності побудовані схеми розподілу індексу блокування. Розраховані індекси блокування з 25 лютого до 23 березня.

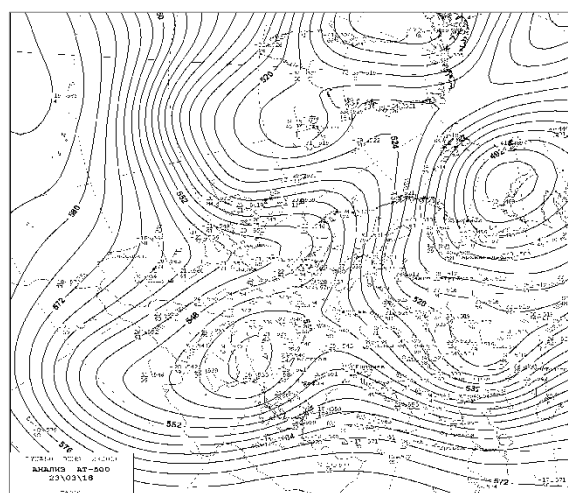
На схемах блокам відповідають від'ємні значення індексу $I(\lambda)$.

У третій декаді березня 2018 р. відмічалися значущі індекси блокування Лейєнаса і Окленда ($I(\lambda) < 0$) у зоні, видовженій з південного заходу на північний схід з показниками до -148 в обох замкнутих областях 18 березня - рис.4.1 (3), і до інтенсифікації блоку 23 березня з відмітками -288 над ЄТР – рис. 4.1 (4). Таким чином об'єктивні і суб'єктивні ознаки вказали на існування блокуючої системи.

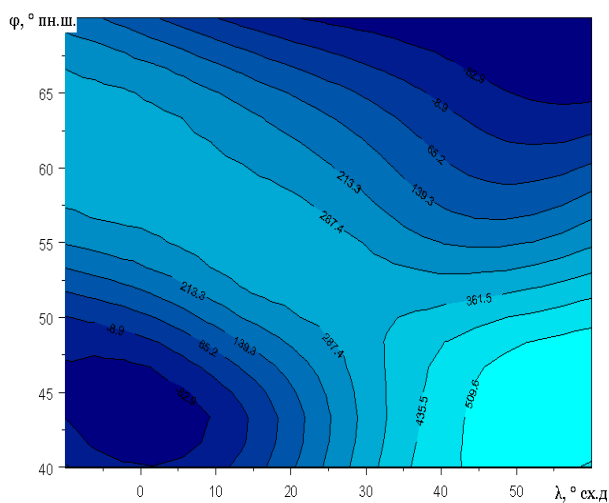
Над півднем європейського сектору на третю декаду березня 2018 р. відмічалися екстремальні погодні умови при збереженні блоку над Атлантикою. В Греції, зокрема, зафіксований безпрецедентний різкий погодний контраст між північчю і півднем країни: потужна пилова буря з Африки охопила о. Крит (температура повітря досягала 30°C 22-23 березня), західну Македонію покрив сніг, а у Флорині максимальна температура склала лише $0\dots3^\circ\text{C}$.



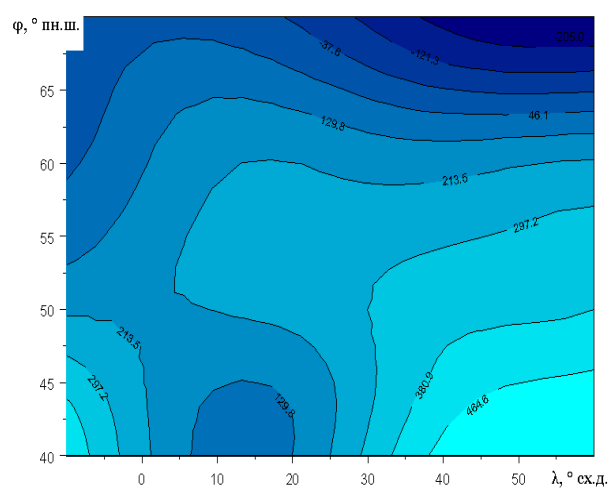
(1)



(2)



(3)



(4)

Рис. 4.1. Карты АТ-500, 00 UTC: (1) - 18.03.2018 р.; (2) – 23.03.2018 р.;
 поля індексу блокування Лейєнаса і Окланда ($I(\lambda) < 0$):
 (3) - 18.03.2018 р.; (4) - 23.03.2018 р.

Починаючи з 17 березня на хвилі фронту над Італією формується південний циклон, який до 22-23 числа поступово зміщується на схід до Балкан і західного узбережжя Чорного моря. Повільне переміщення вихору і траєкторію руху визначає відріг високого тиску, що поширюється з Атлантики в широтному напрямку в помірних широтах.

Вже 20 березня фронтальна полярна система південного циклону перетнула хребет Атласу і підняла пил з мароккансько-алжирської Сахари. У цей період відзначався один з найбільш потужних процесів пилової адвекції з північної Африки до Європи (Греції).

Концентрація пилу в атмосфері була надзвичайно високо, особливо, на півдні країни й островах Крит і Кікладах. Африканський пил охопив практичну всю територію Грецію (включаючи Афіни). Відмічалась найбільша запиленість атмосфери за останні десять років - рис.4.2.

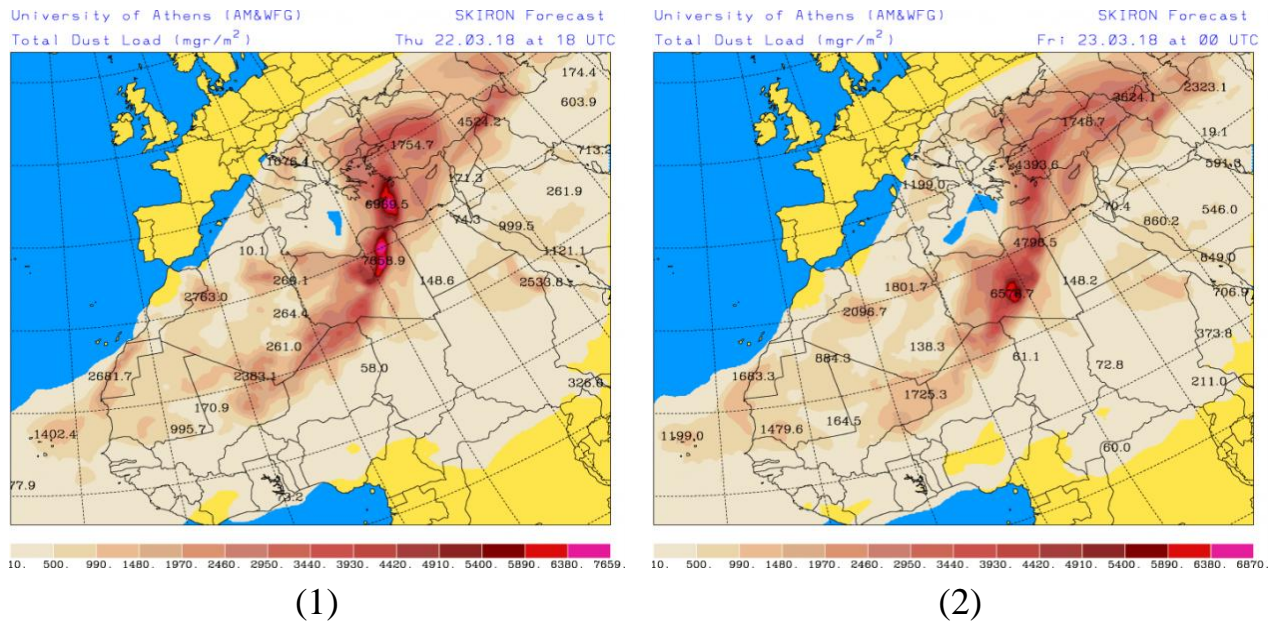


Рис. 4.2. Повна пилова навантага (мг·м⁻²): (1) - 22.03.2018 р., 18 UTC;
(2) – 23.03.2018 р., 00 UTC

Станом на 21-22 березня відмічалось значне посилення південних вітрів у передній частині циклону, які винесли величезну кількість сахарського пилу у центральне та східне Середземномор'я і південно-східну Європу. Вже 23 березня пояс щільного пилу з пустелі Сахари переміщується від північно-східної Лівії через острів Крит та південний схід Егейського моря, острів Родос на Туреччину і Чорне море.

23 березня над півднем України у системі південного циклону при циркуляції проти годинникової стрілки і посиленому перенесенні повітря у середній і верхній тропосфері при переважаючих західних і південно-західних потоках по підшві ультраполярної улоговини маси пилу і піску з півночі Африки досягли акваторії Чорного моря і Кавказу.

Супутникові знімки показують шлейфи пилових потоків з півночі Африки на Балкани і Чорне море - рис.4.3.

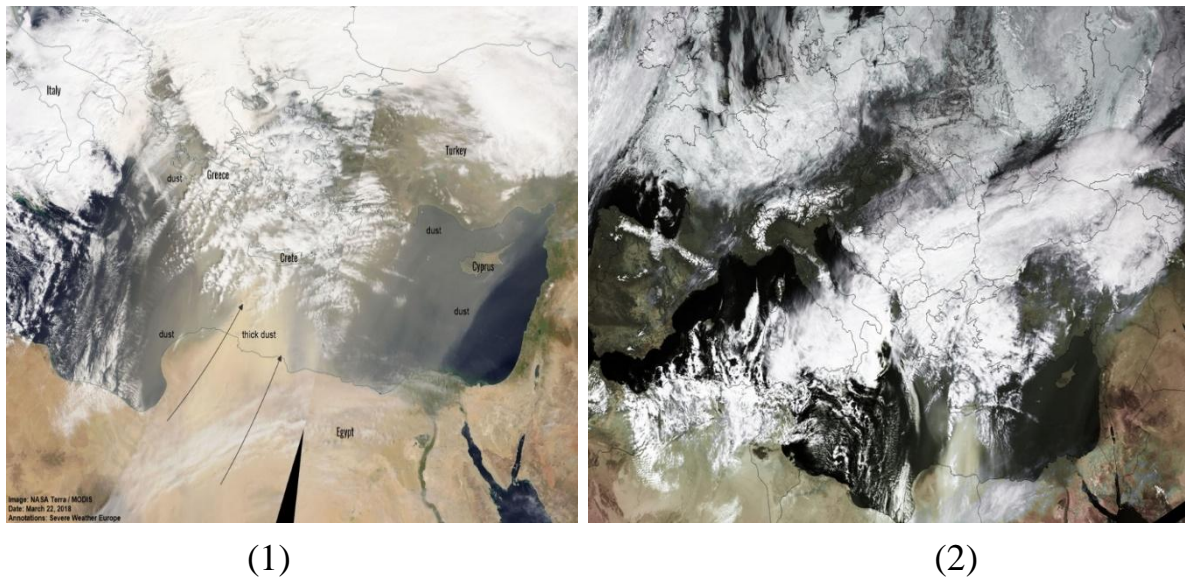


Рис. 4.3. Супутникові знімки: (1) - NASA Terra/ MODIS 22.03.2018 р.;
(2) - Meteosat MSG 23.03.2018 р., 12:00 UTC

Забарвлені опади, такі як: дощ, сніг, снігова крупа - відмічалися у Болгарії, Румунії та Україні після того, як сахарський пил охопи більшу частину європейської території. Явище забарвленого, помаранчевого снігу спостерігалось також у Грузії, Молдові і на Кубані. Станом на 23 березня в Одеській області відмічалися пориви вітру до $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, зливовий сніг, зниження видимості в хуртовинах місцями до 200 м.

Денні опади по Одеській області складали приблизно 7 мм снігу, а по Одесі – 3 мм, була зафіксована забарвлена снігова крупа та сніг.

Південні циклони обумовили аномально високі позначки снігового покриву на третю декаду березня на півночі, північному сході і сході України: Ромни - Сумської обл. – 59 см, Коломак - Харківської обл. – 38 см. На заході – ст. Пожежевська - 94 см, аномально пізні залягання снігу також відмічалось й на півдні – Одеська область - до 14 см, Одеса – 12 см. Даний період характеризується значним зниженням тепла – по Одесі від’ємна аномалія температур до 5° , на заході України місцями до $9-10^{\circ}$.

Однотипний синоптичний процес відмічався у 2016 році - при винятковому збігу календарних дат – 22-24 березня 2016 р.

Аналізуючи випадок у 2016 році, прослідковується аналогічна закономірність, а саме, у системі південного циклону сильні вітри переносять пісок із Сахари до південної і південно-східної Європи. В прибережних районах північно-східної Адриатики пориви вітру перевищили $180 \text{ км}\cdot\text{год}^{-1}$.

Починаючи з 23 березня 2016 р. пилові бурі охоплювали значну частину Італії й почали зміщуватись на південний схід континенту, простягаючись до Польщі. В Сицилії, спостерігалися найбільш несприятливі погодні умови - пісок розносився вітром з поривами аж до 60-70 км·год⁻¹. Пилова смуга простягається на узбережжя Адріатичного та Іонічного морів, охоплюючи південь Іспанії, Греції, Туреччини, Хорватію, Чорногорії. Супутникові знімки чітко показують втягування пилових потоків у вихрову структуру хмарності південного циклону спіралеподібної форми - рис. 4.4.

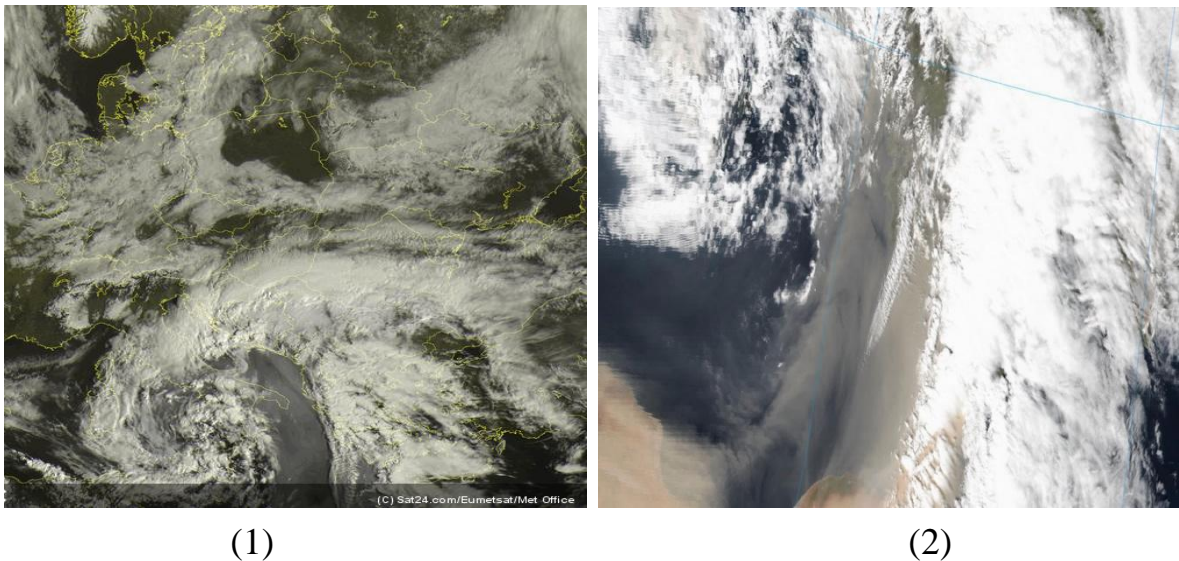


Рис. 4.4. Супутникові знімки 23.03.2016 р.: (1) – Meteosat MSG, 08:00 UTC; (2) - Suomi-NPP, 11:23 UTC

На рис.4.5 ілюструється практична ідентичність конфігурації приземних і висотних баричних полів 23 березня 2018 р і 24 березня 2016 р.

При випадінні забарвлених опадів на півдні і сході України суттєвим фактором, окрім тривалого існування циклонічної циркуляції на півдні Європи і потужної пилової бурі над Сахарою, виступило існування струминної течії (СТ) з західними і поворотом на південно-західні напрямки з півночі Африки на схід Середземного моря. Інтенсивні західні і південного західні потоки від півночі Африки до Чорного моря виразно демонструються на рівні АТ-300 – рис.4.5 (1-2).

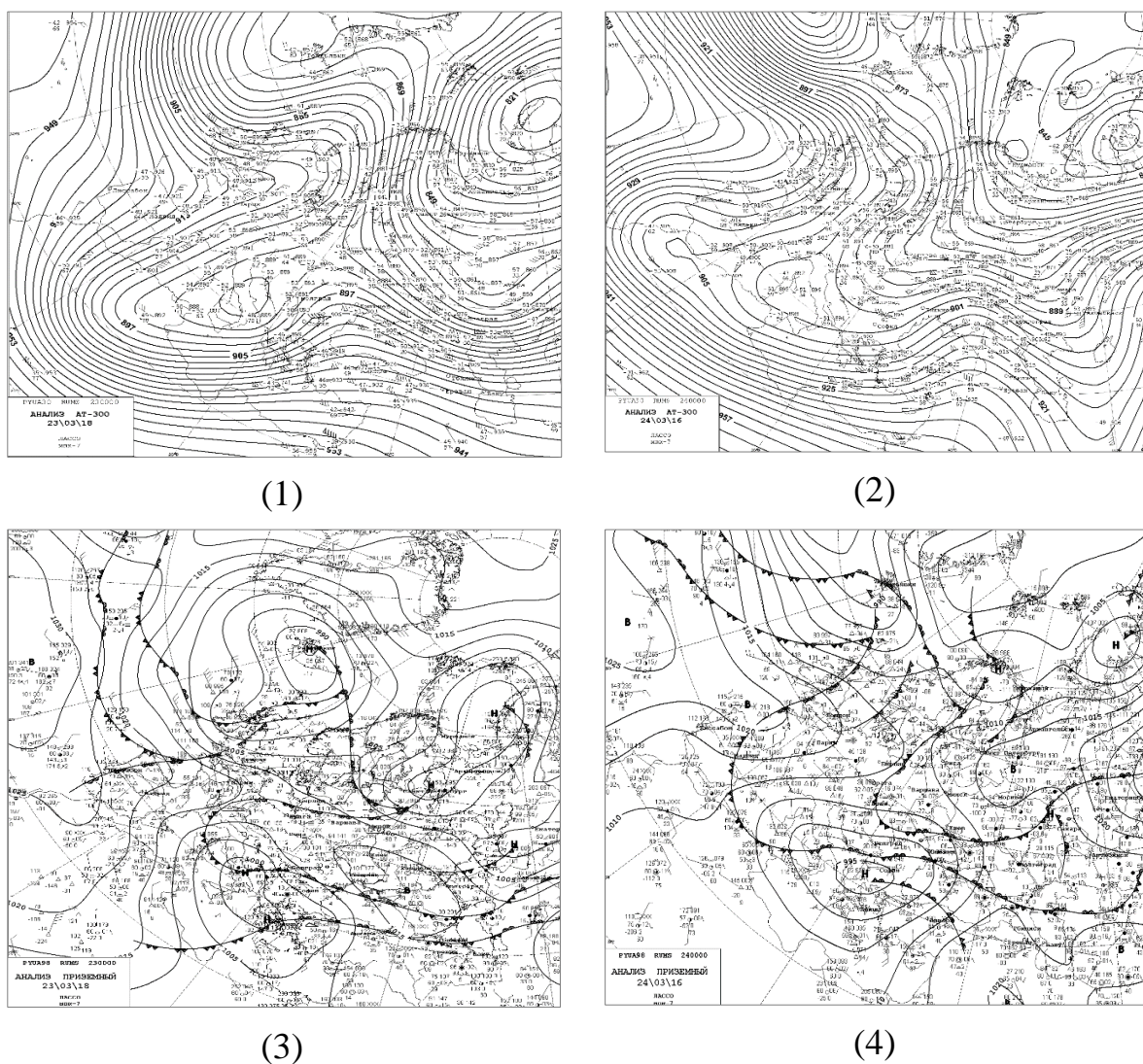


Рис. 4.5. Карты АТ-300, 00 UTC: (1) - 23.03.18; (2) - 24.03.16; приземні карти погоди, 00 UTC: (3) - 23.03.18; (4) - 24.03.16.

Спостерігались значні максимуми швидкості вітру в струминній течії, яка простежувалася над Балканами, Туреччиною, Чорним морем і Кавказом:

- Кишинів - $45 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$,
- Сімферополь - $67 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$,
- над Кавказом та Туреччиною до $70-90 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Сформований південний циклон у третій декаді березня 2016 р. визначав процес, типовий для виникнення місцевого вітру сирого у північній Африці.

Починаючи з 20 березня циклонічна циркуляція виникає над Алжиром і охоплює Піренейський п-ів та західну частину Середземномор'я. Поглиблюючись протягом доби до мінімального тиску у центрі $1004,8 \text{ гПа}$, циклон є середнім і замкнена циркуляція поширюється до рівня 500 гПа . В

цей ж час, над Атлантикою спостерігається потужний антициклон, який блокує південний вихор по півночі, визначаючи його траєкторію руху на схід.

За даними АТ-500 знову формується дипольна структура поля, аналогічно до третьої декади березня 2018 р.: ультраполярна улоговина, з віссю від Архангельська до Мадриду, де виокремлюється замкнений осередок і гребінь над Атлантикою з криволінійною віссю з центральної частини океану до Норвезького моря. Переважна частина європейського регіону, ЄТР охоплені масштабною улоговиною холоду.

До 22 березня південний циклон активно поглиблюється над Алжиром, не змінюючи свого положення – $p_{\min}=998,5$ гПа, відмічається 3 замкнені ізобари. Рух на схід циклону на цю добу блокує вже сибірський максимум, відріг якого інтенсивно поширюється на захід до Кавказу. 23 березня циклон є високим, замкнений центр зафіксований над Сардинією. Відбувається формування антициклонічної кривизни ізогіпс у передній частині циклону, що визначає поворот західних потоків з півночі Африки на південно-західні безпосередньо на Балкани і захід Чорного моря. Тиск у циклоні суттєво знижується до 989,6 гПа над Тірренським морем.

24 числа пилові потоки досягли півдня Молдови, Румунії, Білорусі й України, півдня Росії і південно-сходу Польщі. Центр циклону відмічався над Балканами. В Румунії, Молдові і на переважній частині України відмічалися опади (на півдні і сході забарвлені) до 20-30 мм (мокрый сніг, дощ) за добу, південні вітри з поривами до $15-20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

В третій декаді березня 2018 і 2016 рр. співпадає і положення блоку у приземному полі – атлантичний антициклон і відріг сибірського максимуму, за розрахунками значущі індекси блокування Лейєнаса і Окленда ($I(\lambda)<0$) у третій декаді березня 2016 р. відмічалися над ЄТР з найбільшою інтенсивністю до -240.

Загалом, за останні роки спостерігалось кілька процесів випадіння забарвлених опадів на території України (півдні Європи, Кавказі).

Аналізуючи подібні ситуації у минулі роки, виявлено, що, незважаючи на типову схему формування вітру сирого при існуванні циклону над Північною Африкою або Середземномор'ям, перенесенням пилових потоків з пустель може відбуватися і при інших структурах поля, які будуть

визначати такі ж посилені південні, південно-східні, південно-західні потоки на схід Середземного і Чорного морів.

Наведемо приклад - 31 січня 2015 р. у північній Африці відмічалася сильна пилова буря, шлейф пилу швидко переміщався на північний схід, до Греції і Туреччини у перших числах лютого. Процес сформувався в системі масштабного пірнаючого циклону з траєкторією руху від Норвезького моря, що охоплював весь європейський континент.

Починаючи з 28-29 січня поглиблений циклон з центром над Ісландією з мінімальним тиском 973,7 гПа, охоплював схід Гренландії, північ Європи та Скандинавію. Переміщенню циклону на південь перешкодив відріг сибірського максимуму, що охоплював ЄТР та Кавказ з максимумом тиску над Монголією 1066,9 гПа, та посилений атлантичний антициклон з екстремумом тиску над центральною частиною океану 1042,6 гПа, що є дуже високим для існування максимуму над водною поверхнею взимку.

Аналізуючи та порівнюючи структуру приземних баричних полів з випадками у березні 2016 і 2018 рр., положення антициклонів повністю співпадає. 29 числа пірнаючий циклон значно поглиблюється до мінімуму у центрі 965,4 гПа, поступово набуває правильної математичної форми з 10-ма замкнутими ізобарами. Вихор поступово «пірнає» між двома антициклонічними системами, улоговина охоплює центральну Європу упритул до півночі Італії. Висотні поля позначають західні потоки над північною Африкою при відсутності струминної течії. На 30-31 січня циклон пірнає на південь, займаючи весь європейський регіон, ЄТР, Середземне море, північ Африки і схід Туреччини. Тиск у центрі над Польщею зберігається дуже низький як для помірних широт – 968,2 гПа. Циклон термічно неоднорідний, у передній частині формується гребінь тепла, що змінює західні потоки над Середземномор'ям на південно-західні. До 1 лютого вказаний гребінь з віссю від Кавказу на Скандинавію посилюється, що суттєво збільшує меридіональну складову висотного баричного поля.

В результаті, інтенсивна струминна течія зі швидкостями $70-80 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ західного напрямку над Середземномор'ям і поворотом до південно-західних потоків над Балканами по «підшві» пологої улоговини виносить пил з Сахари на південь Європи і Україну (рис.4.6).

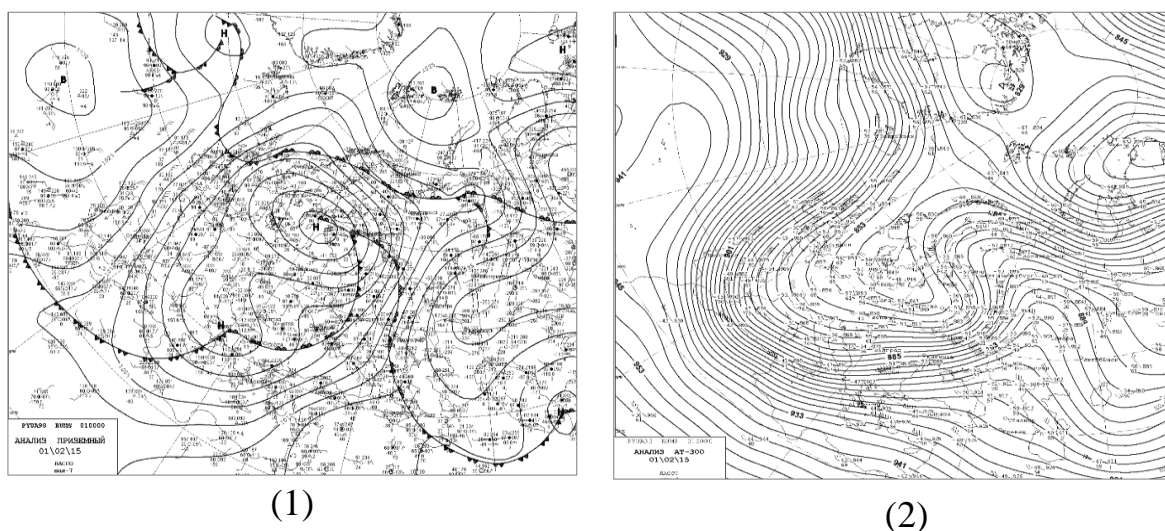


Рис. 4.6. Приземна карта погоди 01.02.15, 00 UTC - (1);
карта АТ-300 - 01.02.15, 00 UTC - (2)

Положення струминної течії над Піренеями і заходом Середземного моря зі стикуванням поля вітру на супутниковому знімку хмарності демонструє рис. 4.7 (1), а густі шлейфи пилу, що втягуються у масштабну хмарну систему холодного фронту пірнаючого циклону, з характерною ознакою шлейфу пилу світло-сірого тону, орієнтовані за напрямком вітру – рис.4.7 (2).

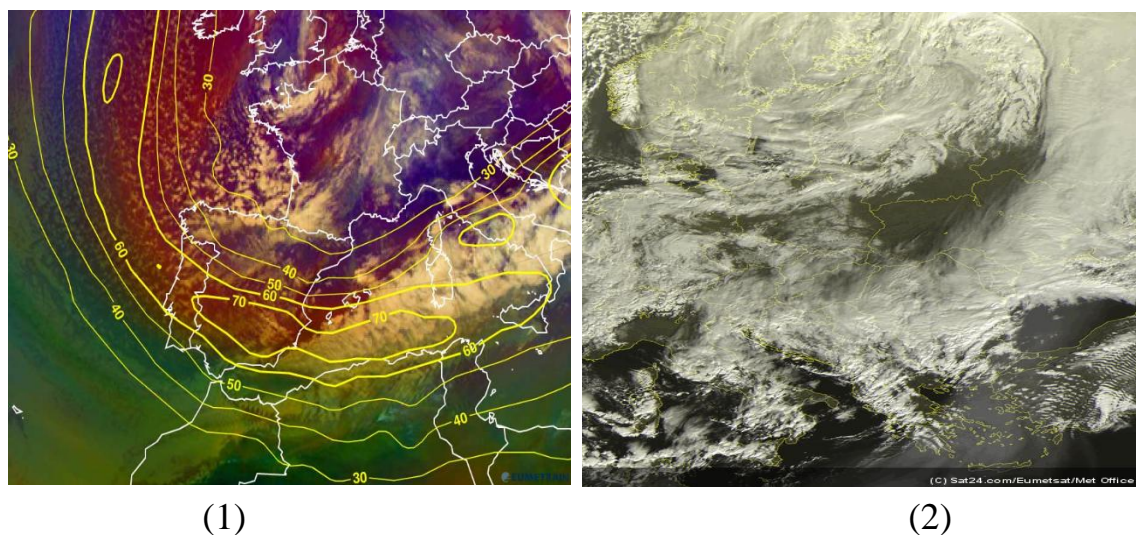


Рис. 4.7. Супутникові знімки: (1) - Meteosat-10 Airmass RGB 31.01.15,
12:00 UTC; (2) - Meteosat MSG 01.02.15, 10:00 UTC

Прогнози аерозолів пустелі Афінського університету [27], показують дуже великі концентрації, не тільки над пустелею, але і над Середземним морем. Пилові потоки простираються від африканського узбережжя до сходу Середземномор'я через Егейське і Мармурове моря на Чорне море – рис. 4.8.

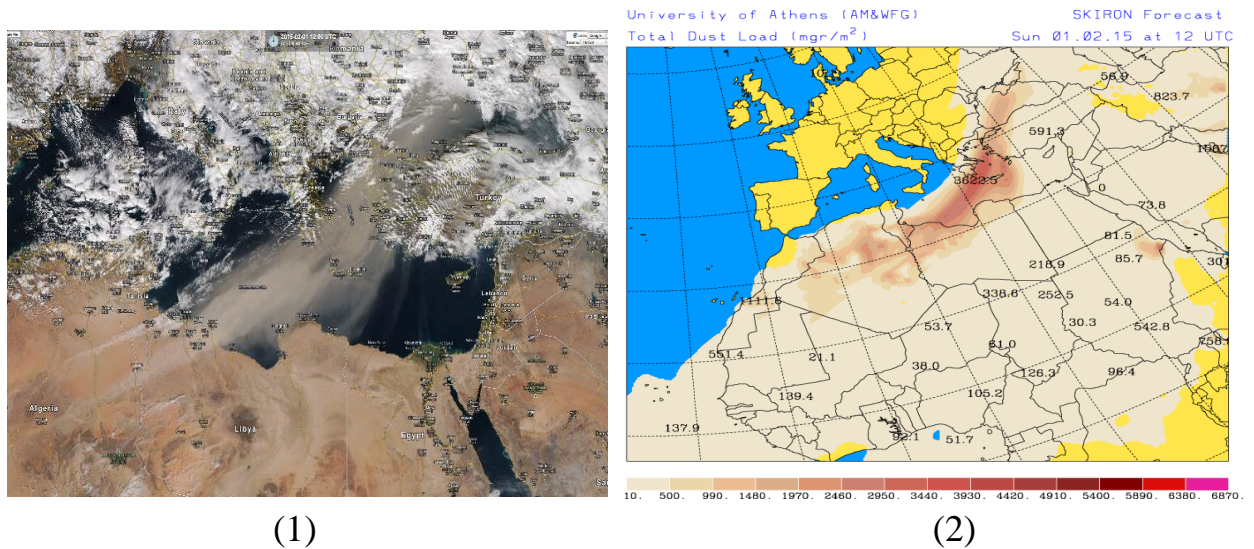


Рис. 4.8. Супутниковий знімок 01.02.2015 р., 12 UTC – (1);
повна пилова навантага, ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2}$) 01.02.2015 р. – (2)

4.2 Аналіз процесів пилеутворення у 2019 р.

Досліджено випадки транспортування пилу з Північної Сахари до Європи протягом 2019 р. (до жовтня включно) [2].

Поточний рік характеризувався активними процесами пилової адвекції над північню Сахари. Пилові потоки спрямовувалися у відповідності до особливостей атмосферної циркуляції, як на Атлантику, так і до Європи. Практично кожного місяця відмічалися пилові бурі різної інтенсивності, зокрема відзначимо підвищення частоти транспортування пилу до 6-7 випадків на європейський регіон. Найбільш аномальний процес спостерігався у третій декаді квітня, коли сахарський пил досяг території Скандинавії, Ісландії, а на кінець періоду – Гренландії, що є виключно екстремальною ситуацією.

23-27 січня 2019 р. - велика кількість сахарського пилу винеслась з півночі Африки на о. Крит і далі на північ. Протягом періоду відмічалось

періодичне посилення потоків сахарського пилу, що рухався в центральне і східне Середземномор'я, включаючи Грецію та Туреччину - рис.4.9.

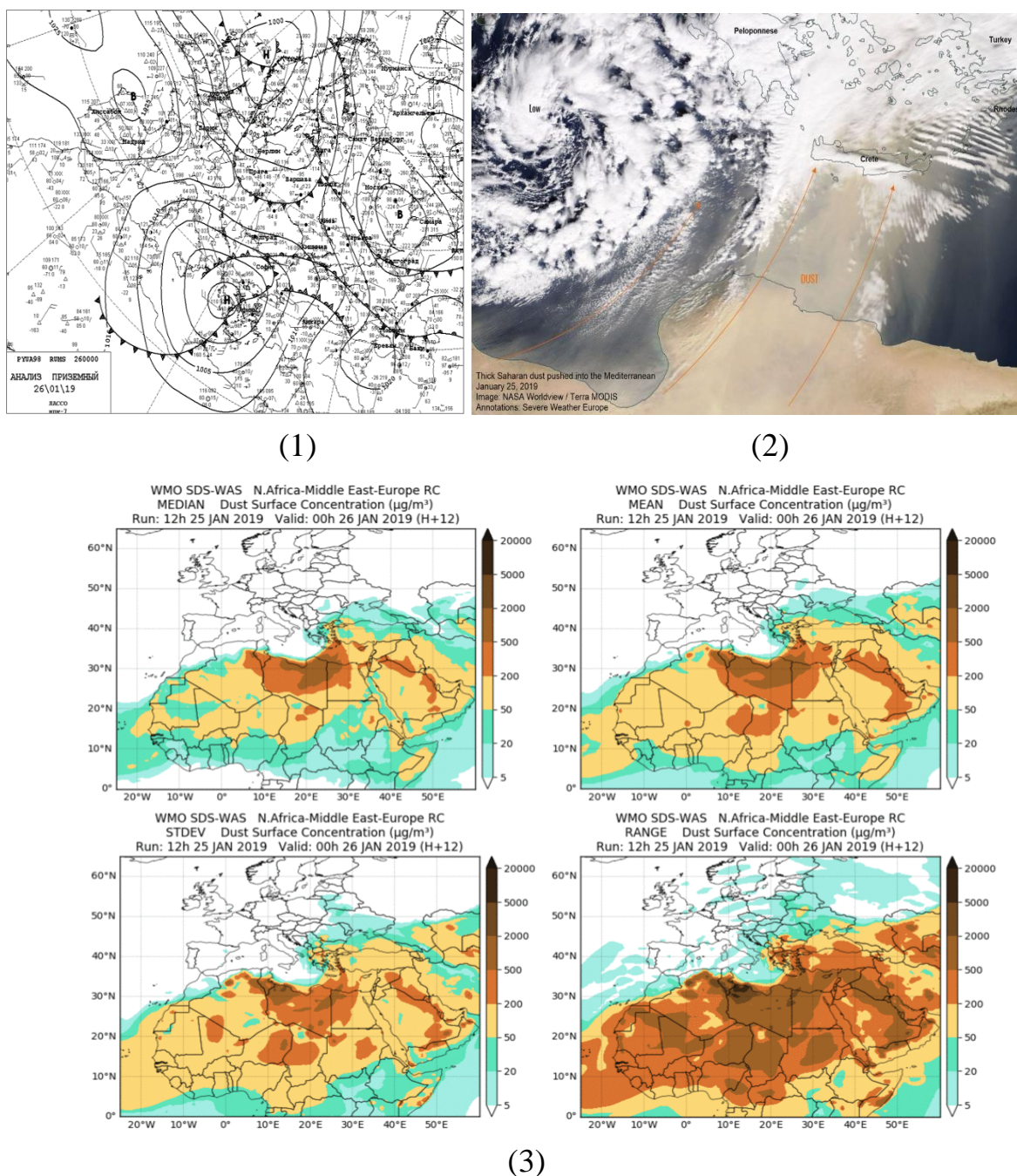
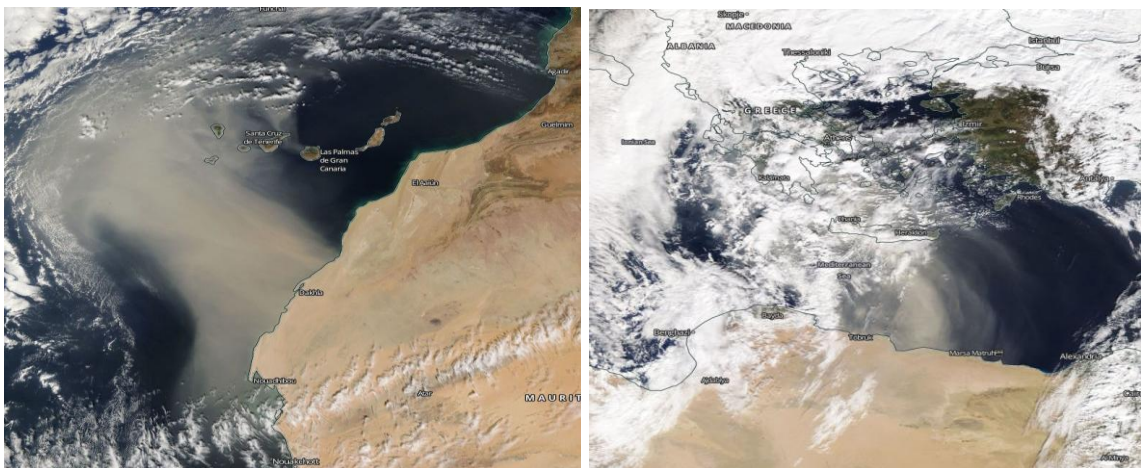


Рис. 4.9. Приземна карта погоди 26.01.2018 р.– (1);
супутниковий знімок МШСЗ 25.01.2019 р. - (2);
концентрація пилу ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) 25-26.01.2019 р. – (3).

Пилові потоки виносились з мароккансько-алжирської Сахари у системі південного циклону, який охоплював переважну частину Середземномор'я. Процес є показовим, коли пил втягується у вихрову

структуру і південно-західними потоками переноситься до Балкан, проте, як правило, такі ситуації типові навесні. Найвищі концентрації пилу спостерігалися на Кіпрі - практично по всьому острові був відзначений червоний рівень пилового забруднення: $>270 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-1}$. Супутниковий знімок чітко виділяє пилові шлейфи по південній і південно-східній периферії циклону.

У наступному місяці внаслідок потужної пилової бурі на північному заході і півночі Африки вже на початку лютого потоки пилу відмічаються як у Атлантиці, так і на півдні Європи. Сильні вітри з Марокко і Мавританії виносили густий сахарський пил у бік Канарських островів і Греції 5-6 лютого 2019 р., що значно знизило якість повітря в обох регіонах. Як видно з супутникового знімку - пилові потоки високої концентрації переносилися як на схід Атлантики, так і на Балкани - рис.4.9.



05.02.2019 р.

06.02.2019 р.

Рис. 4.9. Супутникові знімки хмарності NASA Terra/MODIS

Слід зазначити практичну ідентичність приземного баричного поля над Середземним морем в обох випадках – утворення південного циклону. Така ситуація відповідає формуванню місцевого вітру – сирого, який виносить пил до півдня Європи. За даними Барселонського центра прогнозування пилу [27], концентрація пилу локально перевищила $600 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, що набагато вище середньодобового показника – рис.4.10.

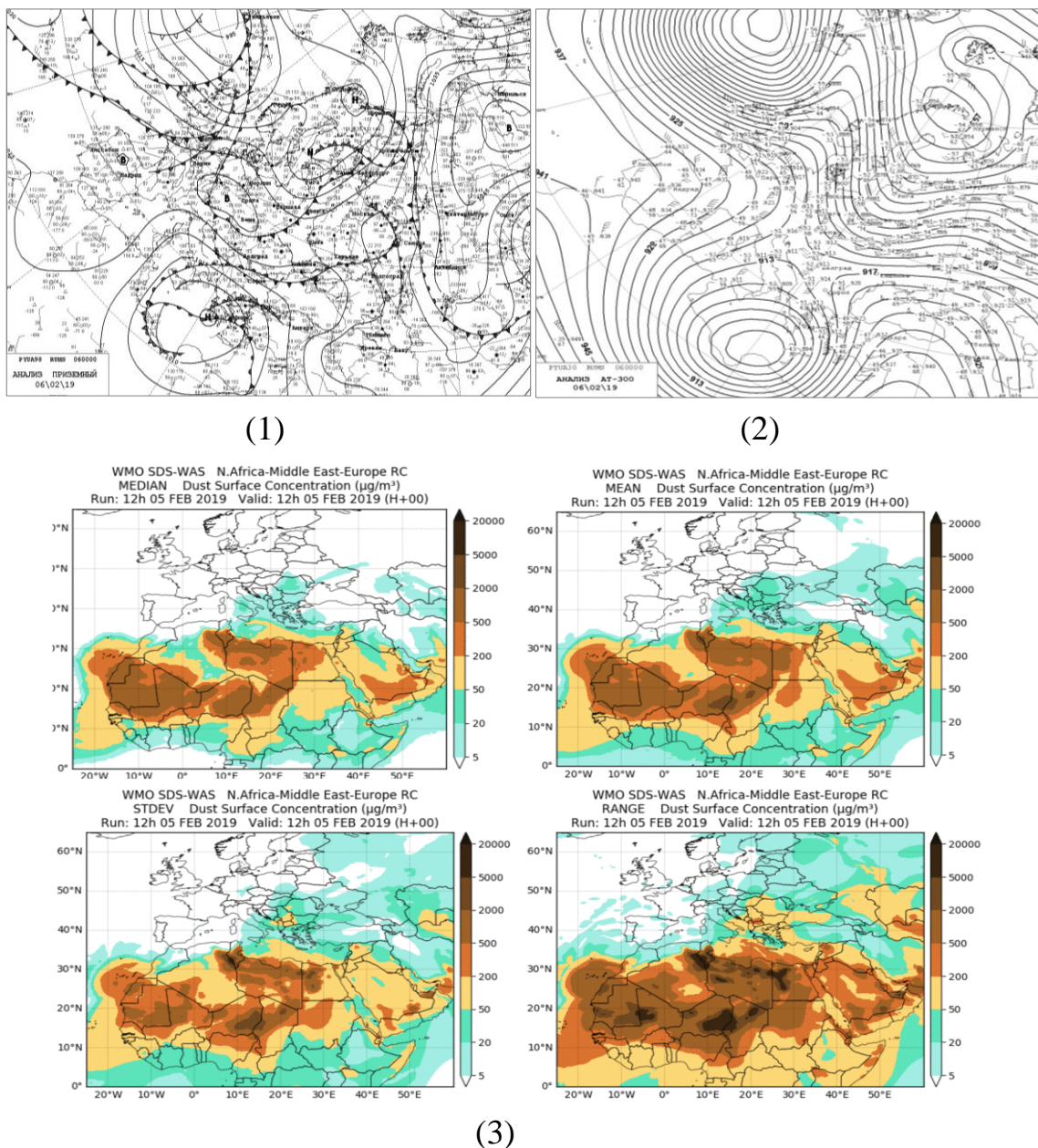


Рис. 4.10. Карти погоди 05.02.2019 р.: (1) – приземний аналіз;
 (2) – АТ-300; (3) - концентрація пилу 05.02.2019 р. ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Наприкінці квітня 2019 р. потужна пилова буря витіснила сахарський пил над Середземним морем і далеко за його межами. Сильні вітри почали дути над Алжиром 21 квітня, і до 23 квітня пил був зареєстрований на більшій частині західної, центральної і південної Європи. Від дня до дня своєрідний «язик» пилу поширюється з Лівії через Середземномор'я, до Франції, на Британські острови та Ірландію, до кінця доби 24 квітня - на північну Атлантику до Ісландії, а потім просувається далі в Датську протоку до Гренландії. Хоча перенесення сахарського пилу не є рідкісним, особливо в

Середземномор'ї та на півдні Європи, цей випадок був дуже масштабний і мав дуже сильну пилову концентрацію – рис.4.11-4.12.

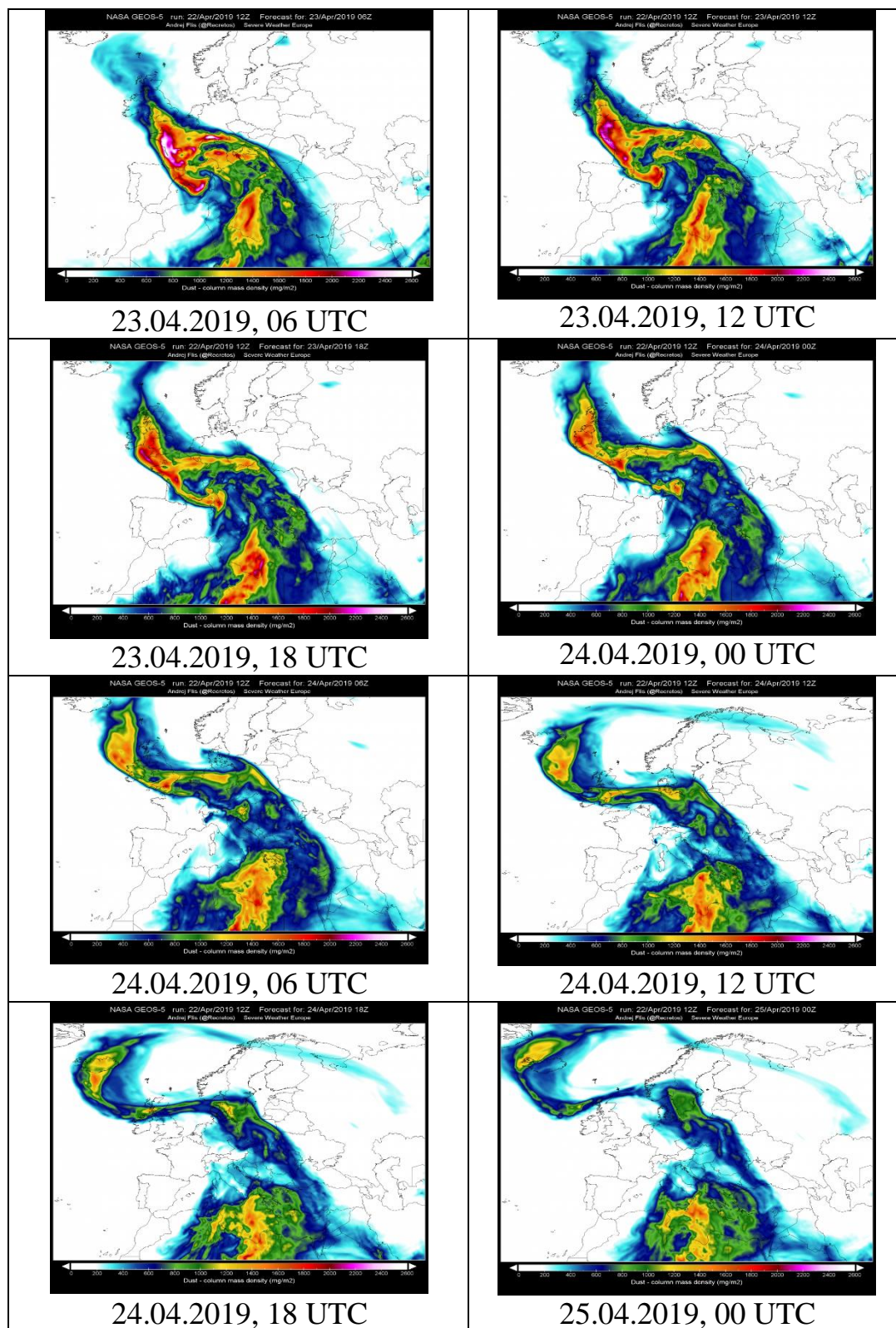


Рис. 4.11. Щільність пилової маси, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$, NASA GOES-5

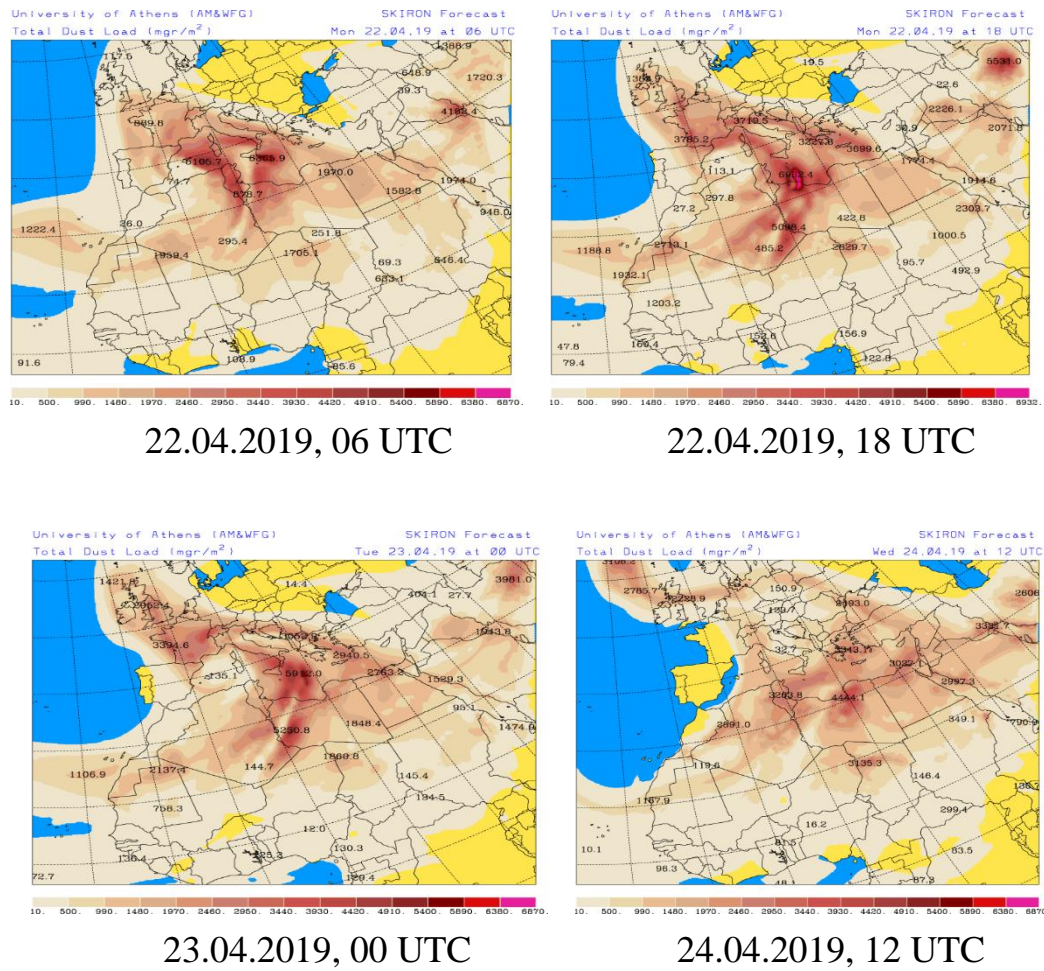


Рис. 4.12. Повна пилова навантага ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2}$) 22-24.04.2019 р.

Одночасно пилова адвекція охопила країни Балтики, частину східної Європи, Польщу, Україну, Білорусь. Потужна пилова завіса зберігалася над центральним Середземномор'ям та південним узбережжям Середземномор'я в Тунісі, Лівії та Єгипті, простягаючись через Мальту і південь Італії до Греції та західної Туреччини.

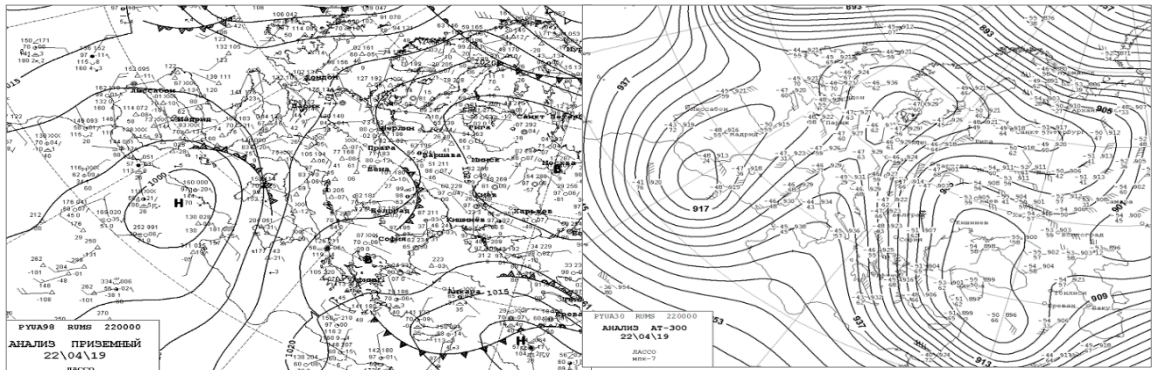
Такий процес можливий за умови потужного перенесення у середній і верхній тропосфері, тобто наявності струминних течій, з одного боку, і існування масштабної області низького тиску – депресії, що охоплювала б переважну центральну і північну частину Атлантики. Саме така синоптична ситуація і відмічалася 22-27 квітня – рис.4.13.

Біля поверхні землі над атлантико-європейським сектором баричне поле було сформоване трьома масштабними областями протилежного знаку. Багатоцентрова депресія охоплювала високі широти Атлантики, приполюсні райони, Гренландію і акваторії Баренцового і Карського морів. Окремий

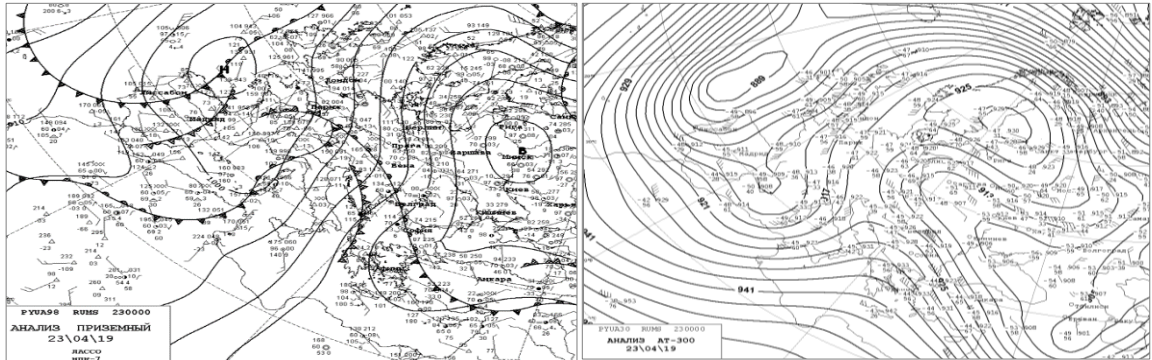
центр циклону від загальної системи опускався з півночі на південь за «пірнаючою» траєкторією з Норвезького моря вздовж узбережжя Британії. Стаціонавання депресії на півночі і траєкторію циклонів до півдня визначали два потужні антициклони – азорський максимум над центральною Атлантикою і масштабний антициклонічний вихор над Євразією, що простирался на захід до східної Європи. Над Алжиром і західним Середземномор'ям сформований південний циклон.

В наступні дві доби циклонічні утворення втягнуться у єдину поширену систему низького тиску, яка охопить північну, східну та більшу частину центральної Атлантики. Така структура приземного поля визначала переважну меридіональність потоків на рівні 500 гПа. Висотно фронтальна зона (ВФЗ) була сформована поглибленою висотною улоговиною з криволінійною віссю від Гренландії на північно-західну Африку, і двома сполученими висотними гребенями – більш пологим над центральною Атлантикою і потужним, з симетричною віссю з Лівії на Скандинавію, над центральною Європою.

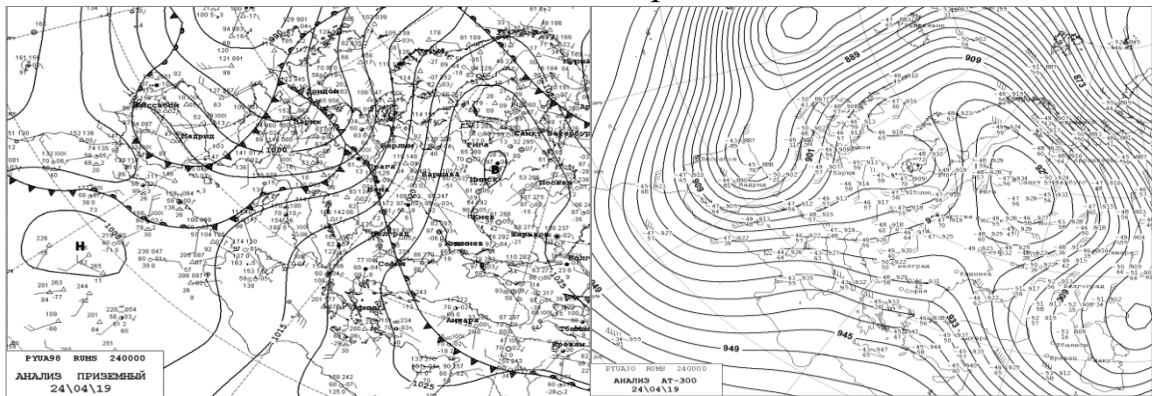
23-24 квітня океанічний гребінь згладжується і у високих широтах зростає зональність потоків з великими градієнтами. Над континентом, навпаки, збільшується меридіональність циркуляції, гребінь простирається вершиною упритул до Гренландії, тим самим звужуючи профіль циклонічної системи, і зумовлюючи збільшення термобаричних градієнтів над Норвезьким і Гренландським морями. Основна дипольна пара – висотний центр циклону над морем Баффіна і висотний центр антициклону над Центральною Росією мають великі градієнти – 504 дам і 572 дам відповідно. Таким чином, ВФЗ проходить широтно у смузі 45-55° півн.ш. над Атлантикою, далі над Піренеями різко повертає на північ по підшві висотної улоговини до Гренландського моря, на невеликій ділянці вершини гребеня має зональний напрям і різко повертає на південь по низхідній гілці на Урал. Така конфігурація посиленних потоків у тропосфері повністю узгоджується з транспортуванням пилу з півночі і північного-заходу Африки далеко на північ через Європу до Ісландії і Гренландії. Відповідно зазначимо існування посиленої струминної течії, положення якої відповідає максимальним контрастам ВФЗ, швидкості в обох смугах над Атлантикою і Європою сягали 40-60 м·с⁻¹.



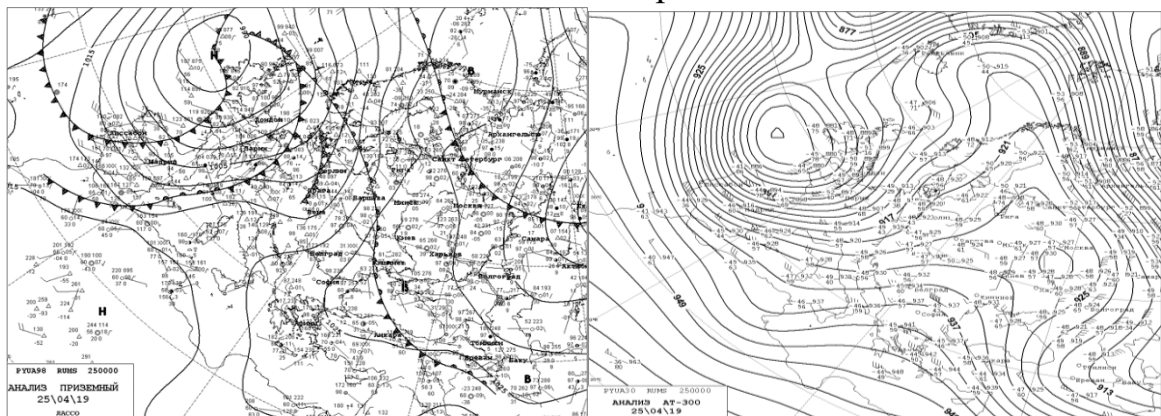
22.04.2019 р.



23.04.2019 р.



24.04.2019 р.



25.04.2019 р.

Рис. 4.13. Приземні карти погоди та карти АТ-300 22-25.04.2019 р.

Знімок МШСЗ виразно ілюструє щільні потоки пилу, що втягуються у вихрову систему циклону над Середземномор'ям – рис.4.14.

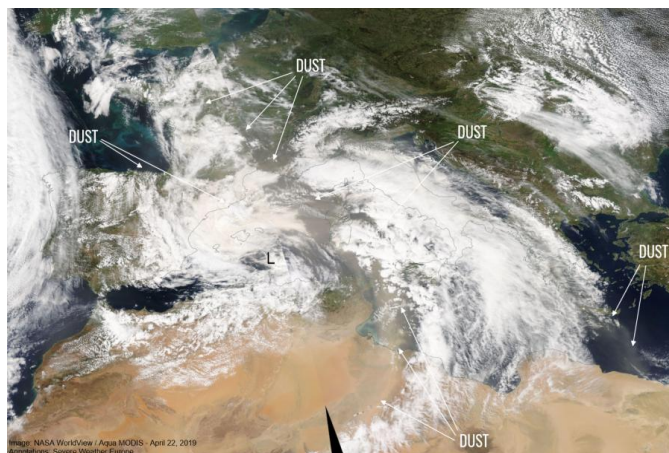


Рис. 4.14. Супутниковий знімок NASA Aqua/MODIS 22.04.2019 р.

У третій декаді травня і червня також зафіксовано пилові бурі над північною Сахарою і винесення пилу до Європи, але набагато слабші, ніж у квітні. На рис. 4.15. наведено концентрацію пилу при поширенні потоків на Італію, Балкани, упритул до Польщі, наприкінці травня 2019 р.

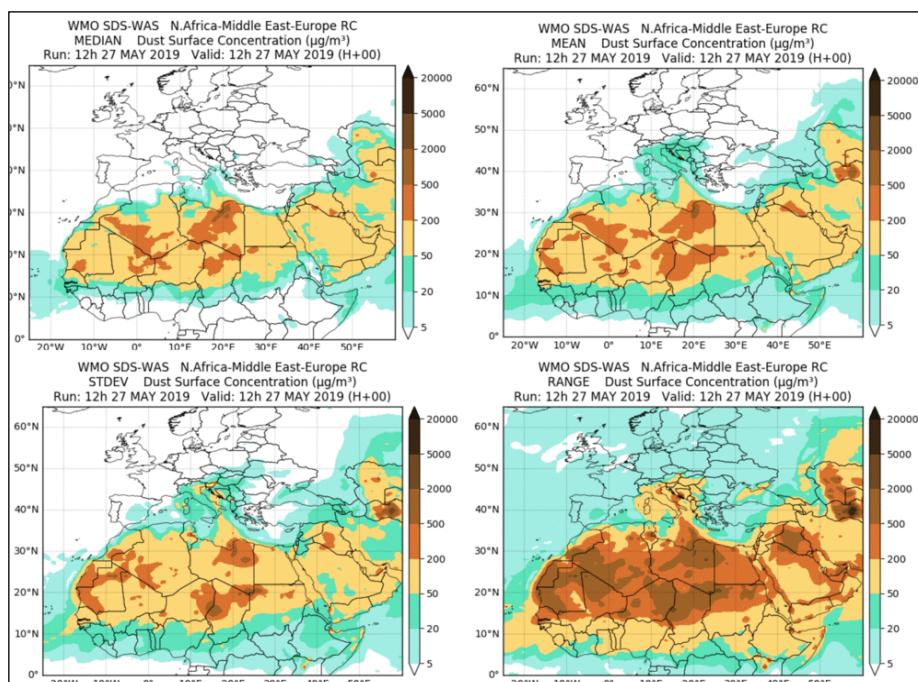
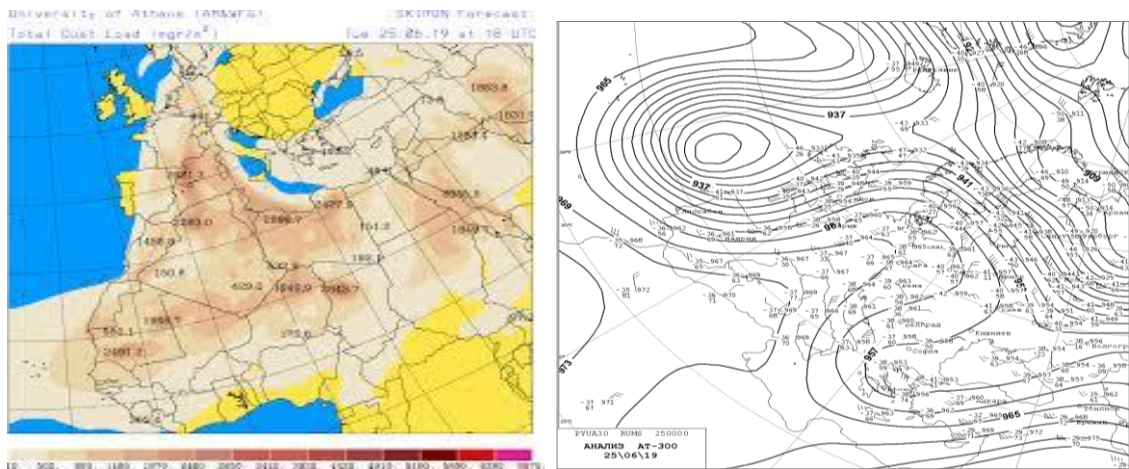


Рис. 4.15. Концентрація пилу ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$) 27.05.2019 р.

Рівно за місяць, наприкінці червня, з Лівії і Алжиру шлейф сахарського пилу спрямований на Західну і Центральну Європу – рис.4.16.



(1)

(2)

Рис. 4.16. Повна пилова навантага ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2}$) 25.06.2019 р.- (1); карта AT-300 25.06.2019 - (2)

Помітна кількість сахарського пилу сконцентрувалася над західною акваторією Середземного моря і Піренейським півостровом. Таке перенесення обумовлене стаціонуванням висотного циклону над східним узбережжям Атлантики на деякому віддаленні від Біскайської затоки та Британських островів. Пил транспортувався по східній периферії вихору відповідно циклонічній циркуляції проти годинникової стрілки.

Протягом липня-жовтня також відмічалися процеси перенесення пилу з Африки до європейського регіону, проте концентрації пилу були досить низькі.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. При існуванні сприятливого комплексу умов, а саме: потужні пилові бурі в Африці, циклонічна циркуляція над Європою, наявність струминної течії над північню Африки, пилові потоки можуть виноситися з пустель на Середземне море і далі на схід.
2. У виключних випадках, зважаючи на послаблення циклонічної діяльності у теплий період, процеси винесення сахарського пилу до Чорного моря відмічаються і влітку, в умовах малоградієнтних приземних полів низького тиску (8 червня 2013 р.).
3. Наприкінці січня-початку лютого 2015 р. над східною Європою відмічалися сахарські пилові бурі та забарвлені опади, зумовлені впливом пірнаючого циклону.
4. У третій декаді березня 2016 та 2018 рр. спостерігалось випадіння забарвлених опадів при існуванні південного циклону над Середземномор'ям в умовах потужної пилової бурі над північню Африки.
5. Періоди формування забарвлених опадів у лютому 2015 р. та березні 2016, 2018 рр. характеризувались посиленними струминними течіями західних і південно-західних напрямків з півночі Африки, швидкості подекуди складали до $70-80 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.
6. Важливим фактором для пилової адвекції до Європи є існування блокуючих антициклонів, що визначають траєкторію руху циклонів і їх тривале стаціонування над Європою. Проведений аналіз процесів блокування за суб'єктивними і об'єктивними критеріями для процесу пилової адвекції у березні 2018 р. Розрахунки індексу блокування Лейєнаса і Окленда $I(\lambda)$, показали значущі відмітки над Європою в межах $-288 \dots -148$.
7. У 2019 р. відмічалися часті пилові бурі у Сахарі, і практично кожного місяця циркуляційні процеси сприяли винесенню

сахарського пилу на Середземне море і подальше його перенесення на північ і схід.

8. Наприкінці квітня 2019 р. зареєстровано екстремально високі рині концентрації сахарського пилу над центральною, східною і північною Європою. 24 квітня наслідки пилової бурі в Алжирі і Лівії були відчутні над Британією, Ісландією і навіть Гренландією. Такому далекому проникненню пилових потоків сприяло термобаричне поле, як біля поверхні землі, так і на висотах. Формування значних контрастів ВФЗ і струминної течії визначило напрямки перенесення пилу за петлеподібною траєкторією. Період пилової бурі у Європі визначив безліч несприятливих умов для функціонування галузей і життєдіяльності людей.



ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Авиационные факторы риска. Программа обучения и подготовки ETR - № 20. ВМО/ТД - №1390. 2007. 53 с.
2. Бучко І.Р., Нажмудінова О.М. Аномальні циркуляційні процеси над Середземномор'ям. Матеріали за результатами II туру всеукраїнського конкурсу наукових студ.робіт / ОДЕКУ. Одеса: ТЕС. 2019.
3. Бучко І.Р., Нажмудінова О.М. Умови виникнення забарвлених опадів над Україною. Збірник статей за матеріалами студентської наукової конференції ОДЕКУ (15-18 квітня 2019 р.) / ОДЕКУ. Одеса: ТЕС. 2019. С.198-203.
4. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.:Гидрометеиздат, 1991. 616 с.
5. Івус Г. П. Спеціалізовані прогнози погоди. Підручник. Одеса: ТЕС, 2012. 407 с.
6. Клімат України / Під ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. Київ. Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.
7. Семенова І.Г., Нажмудінова О.М. Регіональна синоптика: підручник. Одеський державний екологічний університет. Одеса: ТЕС, 2019. 212 с.
8. Синоптико-климатическая характеристика процессов блокирования в атмосфере. Обзорная информация / Под ред. Иванова Н.А., Гришкина Л.В. // Труды ВИИГМИ-МЦД. 1989. Вып.2. 53 с.
9. Тымачев В.Ф. Некоторые вопросы моделирования процессов блокировки над Северной Атлантикой // Труды ААНИИ. Т.383. 1982. С.96–106.
- 10.Хандожко Л.А. Региональные синоптические процессы. Л.: Изд-во ЛГМИ, 1988. 104 с.
- 11.Di Mauro Biagio, et al. Saharan dust events in the European Alps: role in snowmelt and geochemical characterization. The Cryosphere, 2019, Vol.13(4). P.1147–1165.
- 12.Dole R.M. Persistent anomalies of the extra tropical Northern Hemisphere wintertime circulation structure // Mon. Weather. Rev. 1986. Vol. 114, № 1. P.178–207.

13. Harrison S.P., Kohfeld K.E., Roelandt C., Claquin T. The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future. *Earth-Science Reviews*. 2001. Vol. 54, Issues 1-3. P. 43-80.
14. Lejenas H. A comparative study of the Southern Hemisphere blocking during the global weather experiment / H.A Lejenas // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1987. Vol. 113. P. 181–188.
15. Lejenas H., Okland H. Characteristics of Northern hemisphere blocking as determined from a long-time series of observational data // *Tellus*. 1983. Vol.35 A., N 5. P. 350-362.
16. Matthew Gibbons, Qilong Min, and Jiwen Fan. Investigating the impacts of Saharan dust on tropical deep convection using spectral bin microphysics / *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 18, Issue 16. P.12161-12184.
17. Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (SDS-WAS) Science and Implementation Plan 2015-2020. World Meteorological Organization, WWRP 2015. 5. 37 p.
18. Stuut J-B., Smalley I.J., O'Hara-Dhand K. Aeolian dust in Europe: African sources and European deposits. *Quatern. Int.*, 2009. 198. P.234–245
19. Twohy C.H., Kreidenweis S.M., Eidhammer T., Browell E. V., Heymsfield A.J., Bansemer A.R., Anderson B.E., Chen G., Ismail S., DeMott P.J., Van den Heever S.C. Saharan dust particles nucleate droplets in eastern Atlantic clouds // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. 6 p.
20. Van Graf H.–F., Funke H. Blockierungssituation im europaischatlanischen Raum. Teil. 1: Phanomenologische Untersuchungen // *Z. fur Meteorol.* 1986. Bd. 36, № 2. P. 104–112.
21. Varga G., Gammoudi N. Changing temporal patterns and intensity of Saharan dust events in (Central) Europe. *Geophysical Research Abstracts*, 2019. Vol.21, EGU2019-4866.
22. <http://forecast.uoa.gr/dustindx.php>
23. <http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fssatms1.html>
24. <http://terra.nasa.gov/Gallery/>
25. <http://ultraprogress.ru/problemi-tsvilizatsii/problema-opustinivaniya-planeti.html>
26. <http://www.severe-weather.eu/>

27. <https://dust.aemet.es/>
28. <https://public.wmo.int/ru/песчаные-и-пыльные-бури-0>
29. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22267/Frontiers_2017_CH4_RU.pdf
30. <https://www.eumetsat.int/website/home/Images/index.html>
31. https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/SDS_WAS_background.html

Додаток А

Довідка

кафедри метеорології та кліматології
до магістерської кваліфікаційної роботи
маг. гр. МЗМ-19 Бучко Ірини Романівни
на тему
«Процеси пилової адвекції над Європою».

Виконання магістерської кваліфікаційної роботи проведене в рамках бюджетної кафедральної тематики «Розробка та вдосконалення методів прогнозу небезпечних та стихійних метеорологічних явищ над Україною», № 0120U100487. Результати, отримані в магістерській кваліфікаційній роботі, можуть бути використані у розділах звіту з науково-дослідної роботи кафедральної теми.

Зав. кафедри

/Прокоф'єв О.М./