
МОНІТОРИНГ АТМОСФЕРИ

О. Кривобок, О. Кривошеїн, І. Дворецька, М. Савенець

Відділ моніторингу атмосфери (ВМА) створено в жовтні 2016 р. Він є наступником Відділу дослідження стану атмосфери (утворений 1996 р.). Останній, в свою чергу, було утворено на базі кількох підрозділів: Відділу агрометеорології (згодом — Відділ агрометеорологічних досліджень), який було утворено в 1967 р.; Відділу метеорологічних досліджень забруднення атмосфери (утворений в 1974 р.); Відділу метеорологічних досліджень атмосфери (1977 р.); Відділу моніторингу навколишнього середовища та клімату (1982 р.); Лабораторії моніторингу забруднення атмосфери (1991 р.) та Лабораторії дистанційних методів досліджень (1996 р.).

До складу відділу входять дві лабораторії:

- Лабораторія супутникових досліджень;
- Лабораторія моніторингу атмосферного повітря.

Метою діяльності відділу є організація і здійснення цілеспрямованих фундаментальних та прикладних досліджень стану забруднення атмосферного повітря, озонового шару, хмарності та підстильної поверхні за допомогою моделювання, наземних спостережень та дистанційних вимірювань.

Основні напрями роботи відділу:

1. Комплексне вивчення впливу гідрометеорологічних умов на забруднення навколишнього природного середовища.

2. Розроблення наукових принципів організації та рекомендацій щодо здійснення базових спостережень за забрудненням навколишнього природного середовища.

3. Розроблення нових та удосконалення існуючих методів прогнозів забруднення природного середовища екологічно небезпечними викидами.

4. Дослідження стану озонового шару та впливу його змін на потік ультрафіолетової радіації біля поверхні Землі, прогнозування таких змін.

5. Дослідження клімату вільної атмосфери та розробка методів контролю якості даних радіозондування.

6. Розвиток та адаптація сучасних дистанційних технологій отримання та первинної обробки даних про стан атмосфери.

7. Розробка методів визначення та прогнозування стихійних гідрометеорологічних явищ за даними дистанційних спостережень та попередження про них.

8. Розвиток сучасних систем моніторингу стану та прогнозування врожайності основних сільськогосподарських культур в Україні, удосконалення агрометеорологічного моделювання за біофізичними моделями.

Окремими напрямами є науково-експертна та консультативна діяльність; впровадження інноваційної та інтеграційної діяльності; сприяння підготовці студентів та аспірантів; міжнародне наукове співробітництво.

ЛАБОРАТОРІЯ СУПУТНИКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дистанційні (супутникові та авіаційні) радіометричні дослідження підстильної поверхні, атмосфери та хмар почалися в УкрГМІ з кінця 1980-х років. Ініціатором цих робіт був старший науковий співробітник Відділу агрометеорологічних досліджень В.С. Антоненко

У 1994 році в Українському гідрометеорологічному інституті на базі групи дистанційних досліджень агрометеорологічного відділу була створена лабораторія дистанційних методів досліджень (згодом лабораторія супутникових досліджень). Першим завідуючим лабораторії був кандидат географічних наук В.С. Антоненко. На той час лабораторія складалась з 7 співробітників, у тому числі 2 кандидати наук (Антоненко В.С., та Гаценко Р.В.).

В 1996 році лабораторія була переведена у Відділ досліджень стану атмосфери. У 2006 році лабораторія отримала назву Лабораторія супутникових досліджень стану атмосфери.

З початку робіт ставилася мета у розробці нових засобів отримання та методів тематичної обробки цифрової супутникової інформації та впровадження їх в оперативну діяльність гідрометеорологічної служби України.

Станом на зараз основними напрямками діяльності лабораторії є:

- розвиток та адаптація сучасних технологій отримання та первинної обробки даних з оперативних метеорологічних та природно-ресурсних супутників (технологія EUMETCast);
- розробка методів та програмного забезпечення для відновлення характеристик атмосфери, хмарності та підстильної поверхні за супутниковими даними;

- розвиток, технічна і технологічна підтримка системи грозопеленгації;
- розробка методів визначення та прогнозування стихійних гідрометеорологічних явищ за супутниковими даними та даними грозопеленгації;
- технологічна підтримка та вдосконалення системи моніторингу стану та прогнозування врожайності основних сільськогосподарських культур в Україні (система CGMS);
- удосконалення методів агрометеорологічного моделювання за біофізичними моделями;
- розробка методів класифікації та технологій визначення площ посівів основних сільськогосподарських культур в Україні за супутниковими даними високої просторової роздільної здатності.

За час існування лабораторії наступні співробітники захистили дисертації:

- Кривобок О.А у 1997 році захистив кандидатську дисертацію;
- Кривошеїн О.О. у 2014 році захистив кандидатську дисертацію;
- Антоненко В.С. у 2002 році захистив докторську дисертацію.

Розроблення нових засобів отримання цифрової супутникової інформації. Підчас створення лабораторії космічна інформація досить широко використовувалась у різних галузях народного господарства та наукових дослідженнях. Найбільшого поширення вона набула в гідрометеорології завдяки мережі спеціальних метеорологічних штучних супутників Землі (ШСЗ), у яку входять геостаціонарні (Meteosat, GOES, GMS) та низькоорбітальні, що виведені на полярні орбіти (NOAA, Метеор, МЕТОР). Головними перевагами цієї мережі є загальнодоступність даних, глобальний характер інформації, планомірне та постійне проведення зйомок із фіксованою періодичністю, а також величезний обсяг накопиченої інформації.

На той час використання космічної метеорологічної та природно-ресурсної інформації в Україні стримувалось відсутністю або недоскональністю технічних засобів отримання та обробки такої інформації. Так, в оперативній практиці Держкомгідромету та наукових дослідженнях УкрГМІ використовувались лише фотографічні супутникові знімки, автоматизована обробка яких практично неможлива, що значно знижувало ефективність використання цієї інформації. Тому 1994 року почалась дослідно-конструкторська робота по створенню діючого макета станції прийому цифрової інформації з метеорологічних супутників NOAA. Ця робота виконувалася сумісно фахівцями Харківського інституту радіотехнічних вимірювань (під керівництвом Балабанова В.В.) та лабораторії (під

керівництвом Антоненко В.С.). По закінченню роботи в 1996 році в УкрГМІ був встановлений діючий макет станції, який дозволяв отримувати дані з супутників серії NOAA у режимі HRPT (цифровий режим передачі даних) з роздільною здатністю на місцевості 1,1 км, смуга захвату становила 3000 км, а періодичність — 4 рази на добу. Апаратура для прийому була розміщена на території Київської метеорологічної станції.

Підчас експлуатації станції с 1996 по 1998 роки фахівцями лабораторії (Антоненко В.С, Гаценко Р.В., Кривобок О.А.) була розроблена проблемно-орієнтовна автоматизована система первинної обробки даних супутника NOAA. Ця система була створена на базі персональних ЕОМ, яка дозволяла виконувати повний цикл робіт, починаючи з розрахунку траєкторії супутника, прийому та первинної обробки (розпакування, калібрування, прив'язки та архівації даних). За допомогою програмного забезпечення отримувалась повний цифровий потік даних з супутника, якій включає дані радіометра високої просторової роздільності (AVHRR) та вертикальних зондувальників (HIRS, AMSU-A, AMSU-B)

Станція прийому даних оперативно функціонувала до початку 2006 року, коли фахівці лабораторії запропонували використовувати новітню технологію щодо отримання супутникових даних — EUMETCast, яка була розроблена наприкінці 2003 року Європейською організацією з експлуатації метеорологічних супутників (EUMETSAT). Це технологія квазіоперативного поширення цифрової метеорологічної інформації через систему телекомунікаційних супутників, яка є альтернативою традиційним засобам отримання даних. Вона заснована на передачі цифрового відеосигналу, для прийому якого використовується стандартне недороге обладнання. Таким чином, вдалося вирішити, у першу чергу, завдання доступності супутникових даних і, як наслідок, їх ефективного використання. На підставі ліцензії, отриманої Державною гідрометеорологічною службою України від EUMETSAT, були встановлені станції з прийому даних EUMETCast в Українському гідрометцентрі (УкрГМЦ, м. Київ), Львівському обласному гідрометцентрі (ЛГМЦ, м. Львів), Гідрометцентрі Чорного та Азовського морів (ГМЦ ЧАМ, м. Одеса), Гідрометцентрі Автономної республіки Крим та в УкрГМІ. Ініціатором цієї роботи виступив УкрГМІ, який силами співробітників лабораторії виконав монтаж обладнання та встановив мінімальний набір програмного забезпечення для отримання і обробки даних в чотирьох вищевказаних оперативних центрах. Рішення про встановлення станцій в п'ятьох центрах ґрунтувалося на тому, що канали зв'язку, що використовуються в

гідрометслужби, не пристосовані для передачі великих обсягів цифрових даних, тому значно дешевше встановити станцію прийому безпосередньо в оперативному підрозділі, ніж орендувати швидкісні канали зв'язку і передавати дані з одного центру прийому.

Оперативні дані, які отримуються станцією прийому даних EUMETCast в УкрГМІ можна подивитися на відповідній web-сторінці https://uhmi.org.ua/sat_img/index.php

Супутникові дослідження підстильної поверхні, атмосфери та хмар. Традиційно супутникові дані використовувались для відтворення метеорологічних характеристик (температури земної поверхні та хмарних систем, вертикальних профілів температури та вологості повітря) та контролю синоптичних утворень та процесів, тому подальші дослідження лабораторії були пов'язані з розробкою методів отримання метеорологічних параметрів хмарності, підстильної поверхні та атмосфери. На підставі розроблених методів було зроблено оцінку точності отриманих параметрів. Так точність відновлення балу хмарності складає 81–96%, з високою точністю (85%) може ідентифікуватися шарувата хмарність. Визначення температури верхньої межі хмар за допомогою супутникових даних можливо з відносною похибкою 8%, а висоти верхньої межі — 15%.

За даними вертикальних зондувальників ATOVS, встановлених на супутниках NOAA, у 2003–2005 роках розроблено алгоритми відновлення вертикальних профілів температури та вологості повітря методом послідовних наближень (ітераційним). Проведено оцінку точності розрахунку вертикального профілю температури повітря за супутниковими даними. Отримані результати показують, що у шарі 15–200 мб абсолютна середня похибка складає 5 К, в шарі 200–500 мб — 4 К, у шарі 500–800 мб — 2,7 К, у шарі 800–1000 мб — 2,4 К.



Розташування станцій прийому даних EUMETCast та рік їх встановлення у мережі гідрометеорологічної служби України

Проведений аналіз точності відновлення вертикального профілю водяного пару показав наступне:

- на точність відновлення профілю вологості впливає достовірною інформація про вертикальний розподіл температури;
- недостатня інформативність для відновлення вологості у шарі “атмосфера — земна поверхня” — 850 гПа;
- точність відновлення профілю вологості суттєво залежить від помилок вимірювань та вибору початкового наближення.
- відновлення профілю вологості атмосфери можна отримати з похибкою 23%.

В рамках НДР “Розроблення методів обробки супутникової інформації для аналізу та прогнозу стану атмосфери” 2006–2008 рр. було створено посібник для використання супутникової інформації в аналізі та прогнозі стану атмосфери. Матеріали посібника були записані на CD диски та розповсюджені по обласних прогностичних центрах а також розміщені на web сторінці https://uhmi.org.ua/sat_img/posibnyk_satellite_info/zmist.htm.

Супутникові агрометеорологічні дослідження. На початку створення лабораторії були проведені дослідження просторово-часової мінливості спектральних відбиткових характеристик основних типів природних об'єктів: водної поверхні, лісів, луків, чагарників та ін. Також були отримані кількісні оцінки похибки розпізнавання на космічних знімках посівів провідних польових культур у різні періоди вегетації за спектральними вегетаційними індексами. Результати досліджень можливості розпізнавання посівів основних польових культур та природної рослинності в різні періоди вегетації за багатоспектральними знімками високої роздільної здатності можуть бути використані для наукового обґрунтування строків проведення ефективної супутникової зйомки при вирішенні задач моніторингу сільськогосподарських посівів та навколишнього середовища. Було доведено, що в більшості випадків ймовірність розпізнавання на космічних знімках за спектральними ознаками посівів окремих пропашних культур в Україні дуже низька, у той же час спостерігається висока ймовірність розпізнавання на знімках посівів озимини — точність розпізнавання посівів озимої пшениці — ярого ячменю до середини травня не менше 80%.

На експериментальних даних проведено аналіз точності відтворення структури та площі посівів в межах адміністративного району за допомогою супутникових даних високого просторового розрізнення протягом вегетаційного періоду. Відмічено збільшення похибки визначення структури

та площі посівів з 10–15% у весняний період до 35–40% — в літній.

На підставі попередніх результатів була розроблена система напівавтоматичного визначення площ посівів окремих сільськогосподарських культур (завідуючий лабораторії Кривобок О.А., старший науковий співробітник Кривошеїн О.О.), в якій поетапно вирішуються наступні задачі: розроблення методики отримання геоінформаційних даних для окремих сільськогосподарських посівів; розроблення методів класифікації; визначення площ посівів.

В розробленій системі був використаний метод класифікації багатоспектральних супутникових зображень для визначення окремих посівів с/г культур на основі аналізу відгуків спектральних каналів супутникових знімків. Метод полягає в комплексному застосуванні класифікаторів RF, SVM і NN, де в якості вхідних ознак використовуються значення усіх спектральних каналів безхмарних супутникових знімків в період вегетації з подальшим визначенням найбільш точного результату. Розроблено програмні засоби для класифікації с/г посівів на мові програмування R (версія 3.5.1) з використанням бібліотек `maptools`, `raster`, `rgdal`, `randomForest` і `caret`. Програмний комплекс послідовно виконує такі завдання: завантаження растрових зображень у форматі `tiff`; підгонка усіх растрів під одну розрахункову область; створення “стеку” з растрів; екстракт значень “стеку” у межах тестових полів (`shp`-файли тестових полів завантажуються попередньо); навчання класифікаторів; побудова матриці помилок.

Були проведені тестові розрахунки класифікації с/г посівів Київської області в межах тестових полів. Визначено, що найбільш точний алгоритм класифікації для даного випадку — RF.

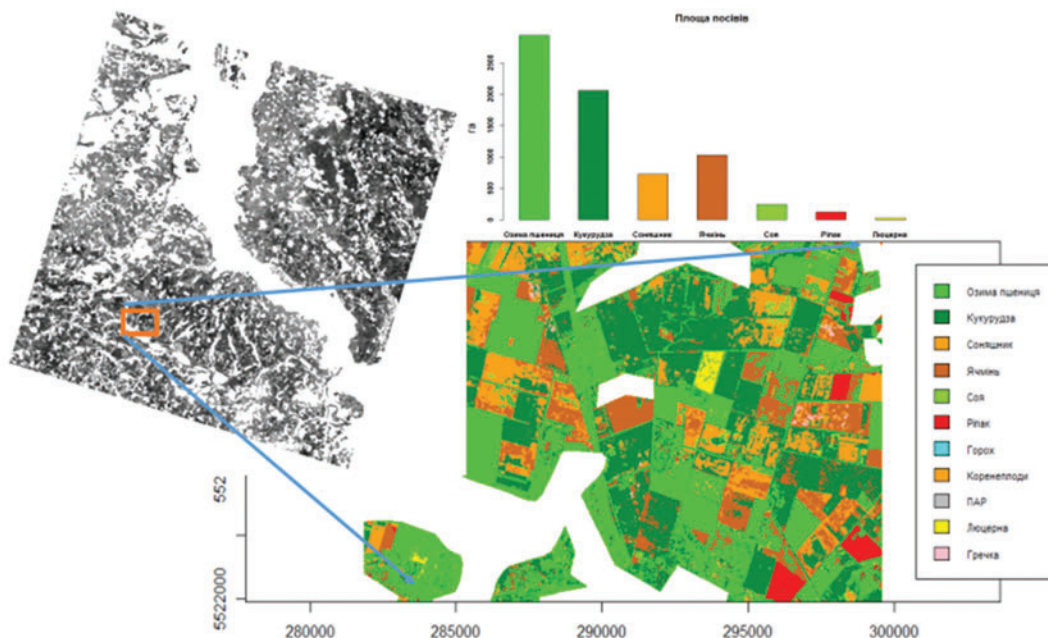
Проведено верифікацію отриманих результатів з визначення площ посівів с/г культур на супутникових зображеннях зі статистичними даними: найменша точність характерна для посівів кукурудзи; точність класифікації сої та ярого ячменю невисока для більшості тестових районів; найприйнятніша точність характерна для посівів соняшнику, озимої пшениці і ріпаку. Для поліпшення точності класифікації необхідно створювати більшу кількість класифікаційних ознак (у часовому аспекті) шляхом обробки більшої кількості супутникових знімків у період вегетації, а також збільшувати кількість і площу тестової вибірки шляхом систематичного відбору наземних даних по областях України.

Починаючи з 2010 року співробітники лабораторії Кривобок О.А., Кривошеїн О.О, Круківська А.В. здійснюють роботи з адаптації Системи Моніторингу Розвитку Сільськогосподарських Культур (англійська аббревіатура CGMS), яка складається з агрометеорологічного моделі WOFOST, бази даних, яка включає метеорологічні, агрометеорологічні, статистичні, ґрунтові, геопросторові дані, та статистичної моделі прогнозу врожайності.

У цій схемі вказані вхідні дані, а також вихідна інформація для кожного модуля, яка може бути використана як самостійний продукт для подальшого аналізу. З огляду на те, що дана система використовує структуровану базу даних, яка спрощує, в значній мірі, її наповнення, вона була адаптована у



Блок — схема системи визначення площ посівів с/г культур по супутниковим зображенням



Результати класифікації с/г посівів Київської області в межах тестових полів

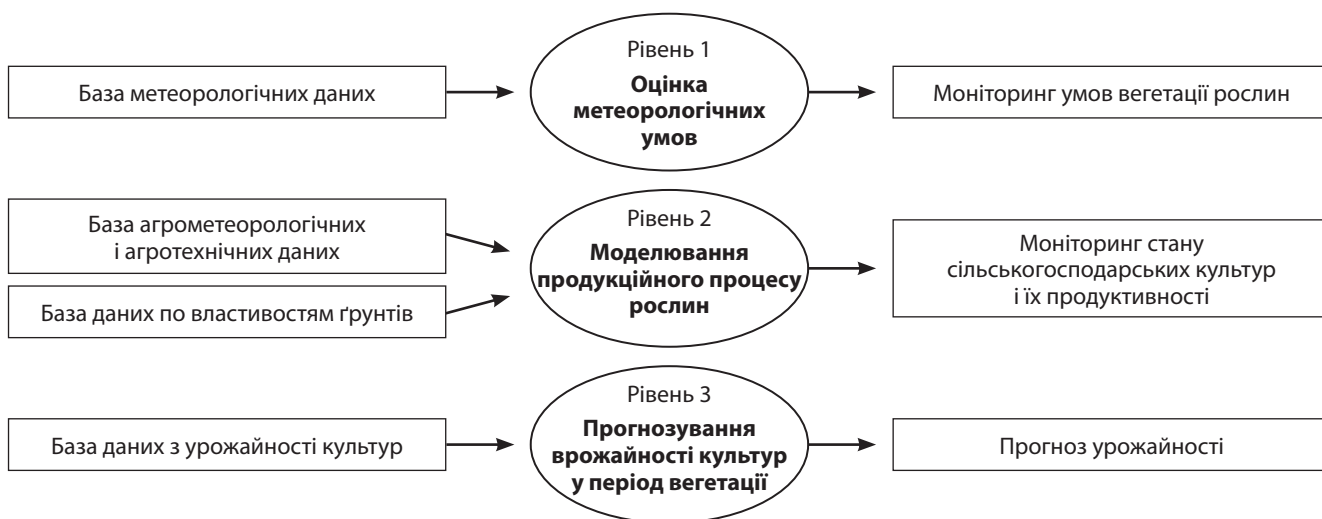
багатьох країнах світу для проведення моніторингу за станом сільськогосподарських посівів. В основному адаптація зводиться до таких кроків:

- створення бази метеорологічних і фенологічних даних, доступних для цієї території. База даних повинна включати не менше 15 років щоденних спостережень;
- створення бази даних за характеристиками ґрунту (як правило, використовується найбільш точна ґрунтова карта для даної території);
- калібрування агрометеорологічної моделі WOFOST;
- створення бази даних щодо врожайності сільськогосподарських культур в масштабах адміні-

стративних одиниць, доступних в місцевих статистичних організаціях;

- адаптація схеми прогнозу врожайності сільськогосподарських культур в розрізі адміністративних одиниць;
- технологічна адаптація програмних засобів для проведення розрахунків системи.

Однією з основних особливостей системи CGMS-Україна є можливість отримання достовірних характеристик продуктивності сільськогосподарських культур в масштабах країни, області, району шляхом врахування метеорологічних і ґрунтових неоднорідностей в масштабах виділених адміністративних одиниць. Для цього територія України ділиться на



Загальна схема системи CGMS

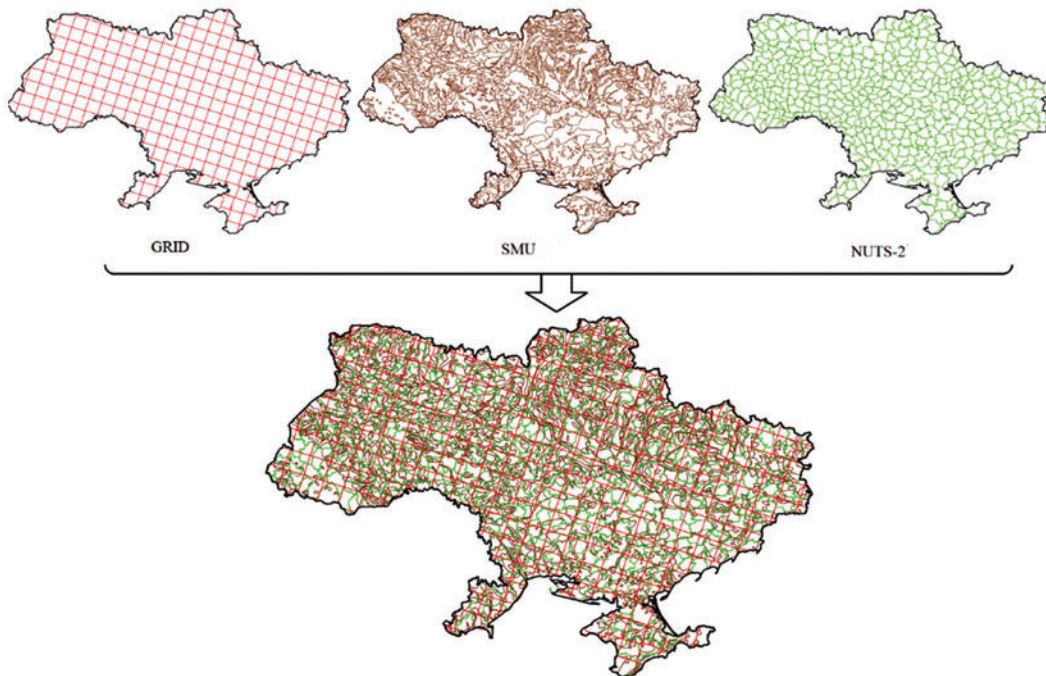


Схема виділення елементарних картографічних одиниць (EMU) для України

так звані “таксони”, які є умовно однорідними по метеорологічних і ґрунтових характеристиках та належать до певної адміністративної одиниці.

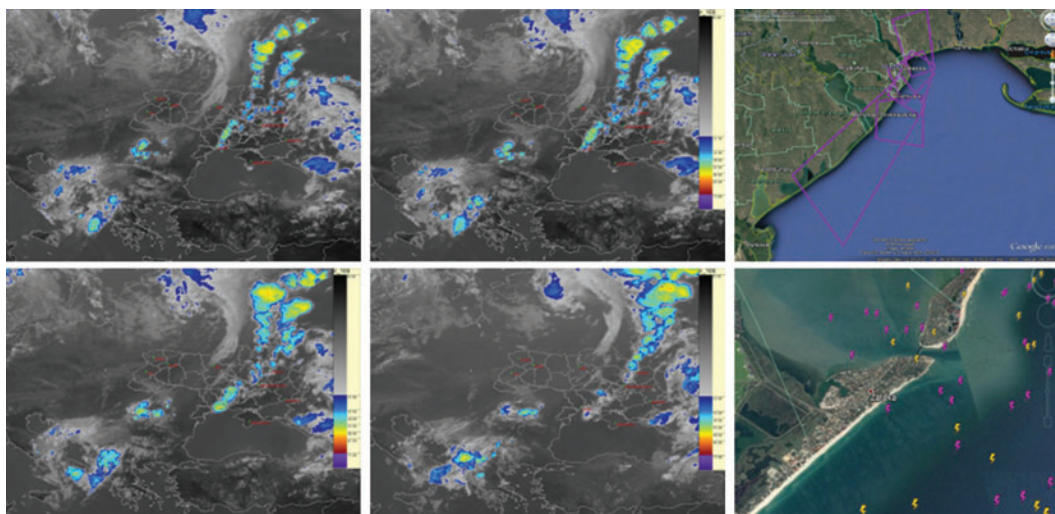
Це зроблено у зв’язку з тим, що для розрахунку характеристик продуктивності використовується одномірна модель WOFOST. При такому підході, змодельовані індикатори продуктивності певної сільськогосподарської культури є репрезентативними для однорідної територіальної одиниці і відрізняються від характеристик продуктивності цієї культури в інших метеорологічних і ґрунтових умовах. Крім того, оскільки параметри продуктивності використовуються в статистичній підсистемі прогнозування врожайності, вони повинні бути узагальнені і на рівні адміністративних одиниць. У розрахунковій схемі CGMS-Україна використовуються такі таксономічні одиниці: GRID — таксономічна одиниця з однорідними кліматичними (погодними) умовами, географічним центром якого є вузол регулярної кліматичної сітки; SMU — таксономічна одиниця з однорідним ґрунтовим покривом; NUTS — адміністративна територіальна одиниця: NUTS-0 — державний адміністративний поділ; NUTS-1 — обласний адміністративний поділ; NUTS-2 —

районний адміністративний поділ; EMU — елементарна картографічна одиниця, яка є результатом об’єднання всіх розглянутих таксонів в рамках яких моделюються характеристики продуктивності сільськогосподарських культур. Для виділення елементарних картографічних одиниць на території України було використано карту вузлів регулярної сітки (50×50 км), карту ґрунтів в масштабі 1:2500000 і карту адміністративного поділу України на рівні районів. Як результат накладання цих карт, було виділено 6913 EMU.

Адаптована схема прогнозу дозволяє прогнозувати врожайність основних сільськогосподарських

Розташування датчиків гронопеленгації в Україні

Номер станції	Місце встановлення	Широта, градуси	Довгота, градуси
33464	м. Сміла, Черкаська область	49.80	30.20
33345	м. Київ, УкрГМІ	50.60	30.40
33156	м. Глухів, Сумська область	51.60	34.00
34319	п. Великий Бурлук, Харківська область	49.60	37.70
33506	м. Полтава, метеостанція	49.60	34.50
33838	м. Одеса, ГМЦ ЧАМ	46.40	30.80
33915	п. Асканія Нова, Херсонська область	46.50	33.90
34606	п. Пришиб, Запорізька область	47.60	36.30
33088	м. Рівне	51.30	26.60
33513	м. Стрий, Львівська область	49.20	23.80
33662	м. Новодністровськ, Чернівецька область	48.10	27.07
33647	м. Рахів, Закарпатська область	48.00	24.20



Динаміка інтенсивності небезпечних погодних явищ по супутниковим даним і даним грозопеленгації 08.08.2016

культур по території України майже з любою завчасністю на рівні районів та областей. Попередні дослідження показали, що точність прогнозу врожайності знаходиться на рівні 70–85%. Інформація за станом посівів та прогноз врожайності основних сільськогосподарських культур в Україні доступна на web-сторінці <https://dat.uhmi.org.ua/cgms/>.

Визначення особливо небезпечних явищ погоди за даними системи грозопеленгації. Для отримання реальної інформації про особливо небезпечні явища погоди в теплу пору року співробітниками лабораторії (Кривобок О.А., Кривошеїн О.О., Коман М.М.) за підтримки компанії Earth Networks (США), починаючи з травня 2016 року, було встановлено 12 датчиків грозопеленгації на метеостанціях України. Встановлення проводилося у кілька етапів і було завершено у липні 2016 року. Таким чином, вперше в Україні була створена система грозопеленгації, яка дозволяє фіксувати блискавки над територією України з імовірністю виявлення міжмарних розрядів більше 50%, розрядів земля–хмара — 95% і з просторовою точністю виявлення даних явищ близько 200 м.

Одною з основних переваг створеної системи грозопеленгації є можливість фіксації міжмарних розрядів, які можуть характеризувати інтенсивність грозової активності. У відповідності до попередніх досліджень, якщо відношення міжмарних розрядів до розрядів земля–хмара буде більше 10, то з'являється велика ймовірність виникнення граду, сильного вітру, смерчу або торнадо.

Оперативне використання системи грозопеленгації показало її значну користь при попередженні особливо небезпечних явищ погоди (град, сильний вітер, злива). Наприклад, у випадку попередження про небезпечні явища, які було зафіксовано 8 серп-

ня 2016 року при проведенні фестивалю Z-games у с. Затока, система змоделювала переміщення небезпечних явищ з завчасністю 45 хвилин.

Таким чином, дані грозопеленгації можуть бути новим, якісним джерелом інформації як для метеорологічних досліджень, так і для широкого кола споживачів, зацікавлених у короткостроковому прогнозуванні та попередженні особливо небезпечних явищ.

ЛАБОРАТОРІЯ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Лабораторія моніторингу атмосферного повітря (ЛМАП, до 2011 р. лабораторія моніторингу атмосферного повітря і дослідження озону) виникла як поєднання двох великих напрямків досліджень, які проводились групами вчених різних відділів інституту: напрямок дослідження рівнів забруднення атмосферного повітря та напрямок дослідження загального рівня озону. В свою чергу, перший напрямок включав як загальні дослідження забруднення атмосферного повітря в містах України, так і розробку методик прогнозування рівнів забруднення в окремих містах. В різний час ці дослідження проводили такі відомі вчені як Пономаренко І.Н., Семенова А.П., Дячук В.А. та ін.. Саме Дячуку В.А. належить ідея першим в Україні в 2009 р. розпочати дослідження щодо удосконалення мережі спостережень за забрудненням атмосферного повітря відповідно до Директиви 2008/50/ЄС. Такі дослідження в істотно розширеному вигляді набули подальшого розвитку в 2016 році, ставши новим напрямком дослідження лабораторії.

Розробка методик прогнозування рівнів забруднення атмосферного повітря проводиться та впроваджується для міст України з 1980-х рр. відповідно

до вимог УкрГМЦ. Наукову і практичну роботу в галузі прогнозування рівня забруднення атмосфери в УкрНДГМІ розпочинали Пономаренко І.Н., Семенова А.П. та інші. Аналіз результатів випробувань методик, які були розроблені в УкрНДГМІ Семеновою А.П., Кіптенко Є.М. та Козленко Т.В., показав, що найбільш прийнятним для практичного використання в оперативній роботі є метод множинної регресії з попереднім виключенням нелінійності зв'язків між концентраціями забруднюючих речовин і метеорологічними факторами. На даний момент розроблено і впроваджено методики для 14 міст України.

В свою чергу напрямок дослідження загального вмісту озону був започаткований к. ф.-м. н. Білявським О.В. з групою вчених, на той час співробітником відділу фізики хмар та активних впливів (на даний момент — Відділ фізики атмосфери), у тісному співробітництві зі співробітником Центральної аерологічної обсерваторії (РФ) д. ф.-м. н. Крученицьким Г.М. Саме за сприяння останнього 8 грудня 1989 року на базі УкрГМІ було відкрито наукову станцію спостережень за загальним вмістом озону (яка не тільки надавала результати спостережень в УкрГМЦ, але й була зареєстрована в Міжнародному банку даних The World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC)), а згодом УкрГМІ отримав можливість методичного керівництва всієї мережі спостережень на території України. Дослідження загального вмісту озону в лабораторії відбувались за двома напрямками: дослідження на станції за допомогою озонometру M-124 та дослідження супутникових даних про розподіл озону за допомогою приладів The Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) та Ozone Monitoring Instrument (OMI). Проте, у зв'язку із неможливістю проведення повірки приладу M-124, вимірювання наземною станцією спостережень було припинено в 2018 році.

Залучення даних супутникового базування, а також розробленої в ЛМАП методики визначення ультрафіолетового індексу (УФ-індексу) атмосфери за допомогою даних загального вмісту озону та балу хмарності дозволило розробити автоматизовану систему спостережень вмісту озону та полів ультрафіолетової радіації, а також їх прогнозування. Для прогнозування рівнів озону було всебічно проаналізовано дані аерологічного зондування атмосфери, що лягло в основу не тільки майбутніх робіт з автоматизації роботи з даними аерологічного зондування, а й кандидатської дисертації співробітника лабораторії Савенця М.В.

Саме завдяки істотному залученню даних супутникових спостережень за загальним вмістом озону та великому досвіду їх обробки, з'явилась можливість відкрити новий напрямок досліджень в ЛМАП:

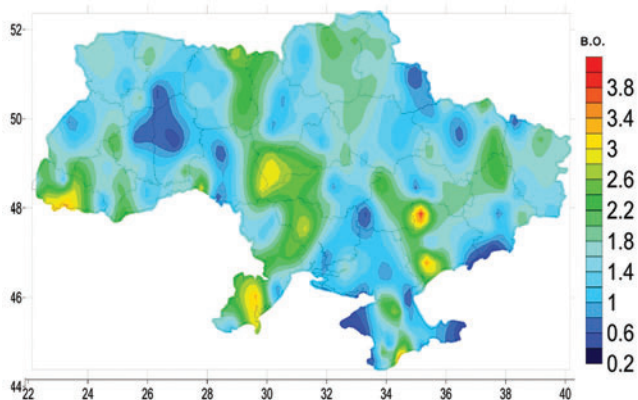
дослідження забруднення атмосферного повітря за допомогою даних супутника, а саме Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P). На даний момент в лабораторії проводиться велика робота з автоматизації роботи з даними та їх валідації з даними наземних спостережень, а також дослідження пожеж.

Відповідно до викладених вище напрямків досліджень в ЛМАП за останні п'ять років проводяться наступні види досліджень.

Дослідження загального розподілу забруднення атмосферного повітря. Дослідження загального розподілу забруднення атмосферного повітря за останні 5 років послідовно відбувається в межах виконання НДР № 7/15 „Дослідження впливу метеорологічних параметрів на вміст та динаміку малих газових і аерозольних домішок атмосферного повітря над територією України“, № 8/18 “Дослідження особливостей забруднення атмосферного повітря з урахуванням метеорологічних умов у містах України з нижчим за середній рівнем забруднення” та № 9/21 “Сучасні тенденції просторово-часового розподілу хімічних складових атмосфери над територією України на основі інтеграції даних вимірювань” (тут і в подальшому замовником НДР є Управління гідрометеорології ДСНС України).

В межах цих робіт співробітниками ЛМАП (Баштаннік М.П., Надточій Л.М. та ін.) досліджено особливості розподілу забруднення атмосферного повітря в містах України, визначено особливості сезонної та міжрічної динаміки забруднюючих речовин, а також всебічно проаналізовано вплив метеорологічного потенціалу забруднення атмосфери та кожної його складової на розподіл шкідливих домішок. Особливу увагу приділяється впливу метеорологічних умов на характер забруднення атмосферного повітря. Результатом проведення цієї низки досліджень стала дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата географічних наук Надточій Л.М. “Вплив метеорологічних умов на формування рівня забруднення атмосферного повітря в промислових містах України”.

Окремо в межах цих тематик розроблено (Кіптенко Є.М., Козленко Т.М. та ін.) методики короткочасного прогнозування високих рівнів забруднення в деяких містах України, а саме: Маріуполь, Запоріжжя, Кривий Ріг. Всі ці методики вдало пройшли виробничі та авторські випробування та впроваджені в оперативну роботу УкрГМЦ з 02.02.2021 року. На даний момент розробляється методика для міста Миколаїв. В межах цих робіт всебічно аналізується інформація про джерела викидів забруднюючих речовин, метеорологічні та кліматичні умови, екстремальні ситуації, синоптичні особливості даного міста зі створенням рівнянь множинної регресії.



Розподіл метеорологічного потенціалу забруднення атмосфери по території України за період 2000–2014 рр.

Дані методики мають справджуваність більше 90%, а процес розрахунків повністю автоматизується.

Приведення нормативної бази діючої мережі спостережень у відповідність до міжнародних стандартів. В зв'язку з підписанням Угоди про Асоціацію Україна-ЄС та необхідністю її імплементації в ЛМАП починаючи з 2016 р. проводиться роботи з приведення нормативної бази діючої мережі спостережень у відповідність до стандартів ЄС. Такі дослідження проводились як в межах тематики 2/16 "Приведення нормативної бази існуючої системи спостережень за забрудненням атмосферного повітря у відповідність до нормативних документів ЄС", так і продовжуються в межах виконання наступних НДР. В межах виконання зазначених досліджень співробітниками ЛМАП (Дворецькою І.В., Баштаннік М.П. та ін.) було проаналізовано нормативні документи Європейського Парламенту та Ради, міжнародний досвід та рекомендації щодо їх застосування, а також проводились консультації з міжнародними експертами. В результаті проведених досліджень було розроблено рекомендації

щодо Приведення нормативної бази існуючої системи спостережень за забрудненням атмосферного повітря у відповідність до вимог нормативних документів ЄС, які впроваджено в оперативну діяльність Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського (ЦГО) в 2019 р. В процесі роботи над рекомендації співробітниками лабораторії у співпраці зі співробітниками ЦГО та Управління гідрометеорології було розроблено Наказ МВС № 154 від 28.02.2018 р. Про затвердження Порядку здійснення моніторингу за вмістом миш'яку, кадмію, ртуті, нікелю та поліциклічних ароматичних вуглеводнів в атмосферному повітрі. Розроблені рекомендації також було частково використано при розробці наступних наказів МВС даного напрямку. Співробітники ЛМАП також брали участь в розробці Постанови Кабінету Міністрів України № 827 від 14.08.2019 р. "Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря".

В процесі виконання робіт даного напрямку як в межах виконання НДР 2/16, так і подальших досліджень співробітниками лабораторії виділено зони моніторингу атмосферного повітря на території України, проаналізовано міста за рівнем забруднення, досліджено динаміку викидів основних і специфічних забруднюючих речовин на території України за районами в межах областей, проаналізовано об'єми викидів забруднюючих речовин від промислових підприємств у містах, метеорологічні, кліматологічні та орографічні особливості території тощо. Результатом даних робіт стали пропозиції щодо розташування пунктів спостережень як для всієї території України, так і в окремих містах, а також пропозицій щодо удосконалення діючої мережі спостережень в містах з нижче за середній рівнями забруднення.

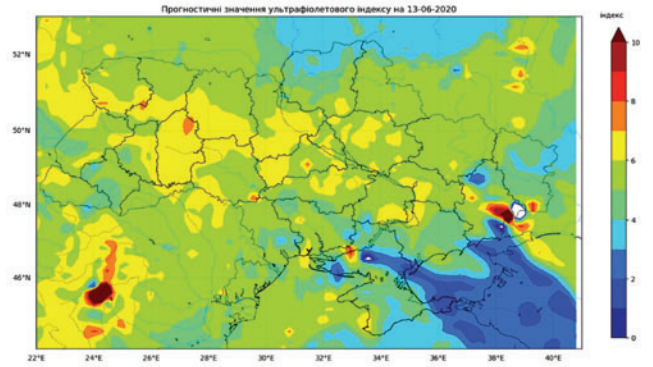
Аналіз стану озонного шару та полів ультрафіолетової радіації. В ЛМАП ведеться постійна робота з аналізу динаміки озонного шару як над територією України, так і в глобальному розрізі. В лабораторії збираються та зберігаються результати щодобового контролю значень загального вмісту озону (ЗВО) та УФ-індексу, здійснюється їх аналіз та вивчення аномалій. Це дає змогу діагностування появи аномалій загального вмісту озону, що найчастіше спостерігаються у лютому–березні, проте найбільшу небезпеку несуть у червні–липні, призводячи потенційно до підвищення рівнів ультрафіолетового опромінення. Дослідження ЗВО у лабораторії дозволили виявляти динамічну природу появи озонних аномалій, пов'язаних зі змінами стратосферного полярного вихору, циркуляцією Брюера–Добсона та короткочасною адвекцією атмосферного повітря на висотах. Результати дос-



Виділені зони моніторингу якості повітря на території України

лідження динаміки вмісту озону над територією України за даними наземних та супутникових спостережень впроваджено у ЦГО. Окремі дослідження проводяться з врахування глобальних та регіональних змін загального вмісту озону. Також в лабораторії функціонує розроблена к. геогр. н., с. н. с. Дворецькою І.В. в 2012 р. автоматизована система спостережень вмісту озону та полів ультрафіолетової радіації, а також їх прогнозування, за даними супутникових спостережень за вмістом озону Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) та Sentinel-5P, прогностичних моделей GFS та WRF.

Дослідження результатів аерологічного радіозондування атмосфери. Як було зазначено вище, одним з напрямків досліджень у лабораторії атмосферного повітря є вивчення просторово-часового розподілу метеорологічних величин на висотах у тропосфері та нижній стратосфері. Такі роботи розпочалися з розрахунків регресійних залежностей між значеннями метеорологічних величин на висотах та загальним вмістом озону під час розробки автоматизовану систему спостережень вмісту озону та полів ультрафіолетової радіації. Ці роботи знайшли своє продовження в розробці методів критичного контролю якості даних аерологічного радіозондування, що лягло в основу НДР 9/18 “Удосконалення методів критичного перегляду результатів радіозондування мережі аерологічних станцій та аналіз стану озонового шару над територією України”. Результатом цієї НДР стала розробка (Савенець М.В.) методів критичного контролю якості даних аерологічного радіозондування атмосфери та програмного забезпечення для роботи із оперативною та режимною аерологічною інформацією. Критичний



Прогностичні дані УФ-індексу на 13.06.2020 р.

контроль даних радіозондування атмосфери дозволяє виявляти помилкові значення температури повітря, геопотенціалу, відносної вологості повітря, швидкості та напрямку вітру, температури точки роси, що виміряні радіозондом під час зондування на аерологічних станціях території України. Перевагою розробленого методу у порівнянні з існуючими аналогами у світі стала додаткова перевірка аномальних відхилень метеорологічних показників, що зазвичай видаляється із рядів спостережень як ненадійні дані. Метод критичного контролю є комплексним та поєднує 6 видів часткового контролю єдиним алгоритмом роботи. До загальної схеми контролю входять контроль на фізично-допустимі межі показників, контроль екстремальних відхилень, часовий контроль, горизонтальний контроль полів метеорологічних величин на стандартних ізобаричних рівнях, вертикальний та гідростатичний контроль за профілями метеорологічних параметрів. Отримані результати досліджень та розробле-



Програмне забезпечення для оброблення даних температурно-вітрового радіозондування атмосфери

ний метод контролю стали фундаментом для створення програмного забезпечення для оброблення даних температурно-вітрового радіозондування атмосфери, що впроваджено у роботу ЦГО.

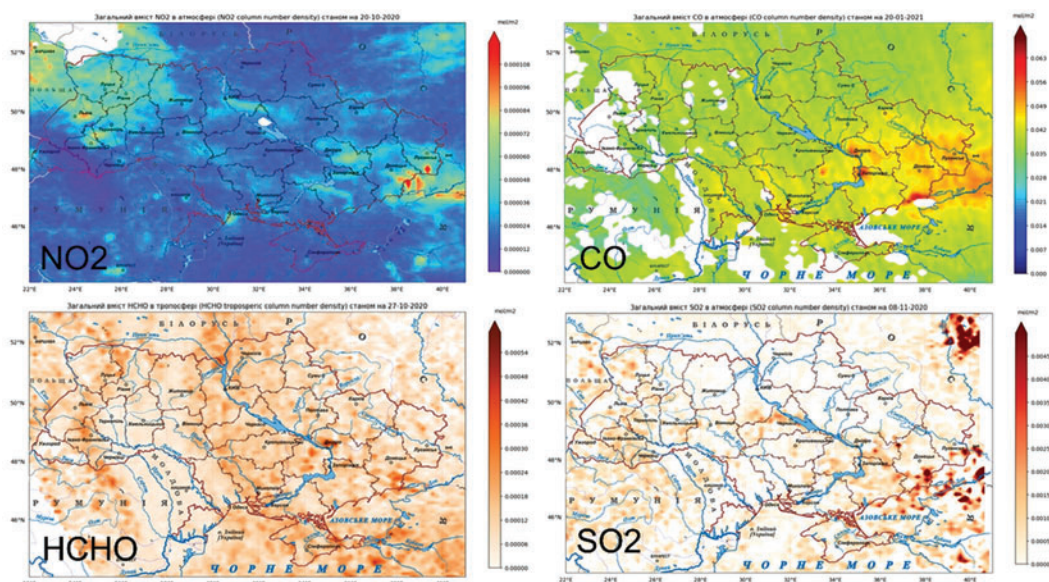
Дослідження результатів супутникових спостережень за розподілом забруднюючих речовин. Досвід роботи фахівців лабораторії моніторингу атмосферного повітря із супутниковою інформацією хімічних складових атмосферного повітря сприяє розробці методів отримання даних та аналізу забруднення території України з використанням найсучасніших супутникових систем. Створено єдину в Україні автоматизовану систему оперативного моніторингу якості атмосферного повітря на основі даних зондування супутника Sentinel-5P, що характеризується найкращою просторовою роздільною здатністю супутникових даних діоксиду азоту (NO_2), монооксиду вуглецю (CO), формальдегіду (HCHO), діоксиду сірки (SO_2) та аерозолі. Ці роботи частково продовжуються в НДР 9/21 "Сучасні тенденції просторово-часового розподілу хімічних складових атмосфери над територією України на основі інтеграції даних вимірювань" та розділі 4 "Система супутникового моніторингу хімічних складових атмосферного повітря над територією України" НДР "Розроблення багатопільового геопорталу моніторингу та прогнозування стану навколишнього природного середовища" на замовлення НАН України.

Щодня оперативні дані супутника Sentinel-5P завантажуються у автоматичному режимі, проходять фільтрування та видалення ненадійних та помилкових даних, обробляються, архівуються та візуалізу-

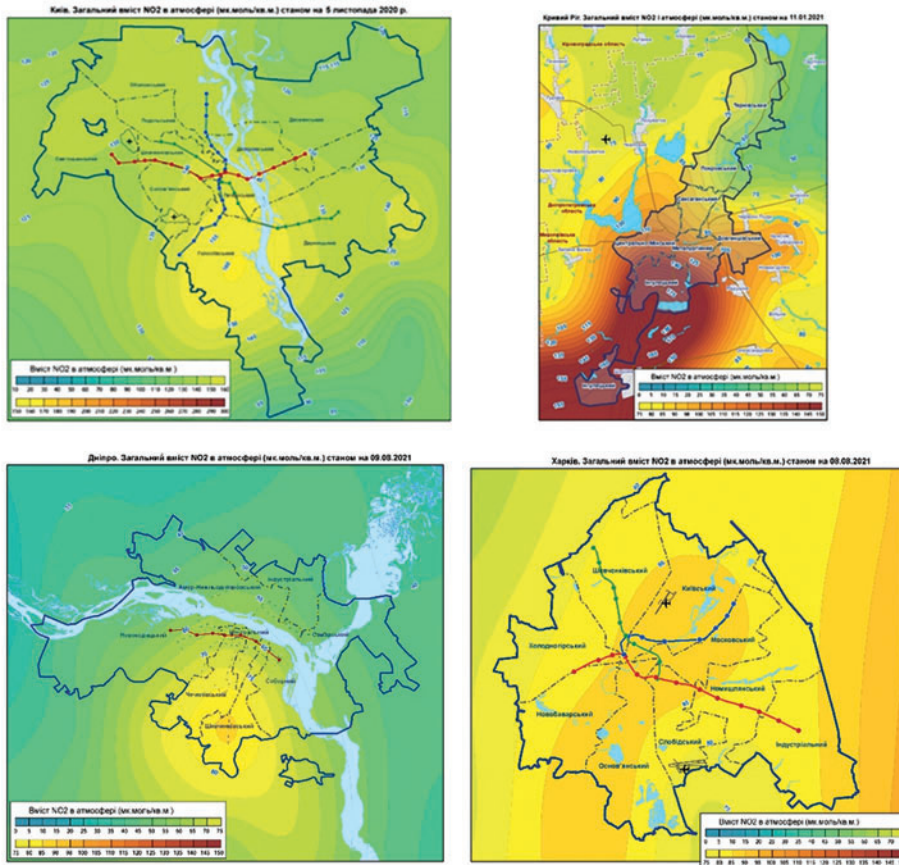
ються у вигляді картосхем просторового розподілу забруднюючих речовин.

Це дозволяє отримувати якісну картину стану забруднення атмосферного повітря над територією України з повним просторовим охопленням. На основі результатів моніторингу стає можливим ідентифікувати основні міста-забруднювачі конкретного дня, незалежно від наявності чи відсутності наземних вимірювань, що може свідчити про можливість потенційного перевищення допустимих рівнів забруднення атмосферного повітря. Отримана інформація дозволяє виявити випадки транскордонного перенесення забруднюючих речовин на висотах, проаналізувати поширення шлейфів забруднення від джерел викидів за переважаючим напрямком вітру, а також отримати інформацію про масштаби погіршення якості атмосферного повітря в результаті лісових пожеж.

Розроблено (Савенець М.В.) методи деталізації оперативної супутникової інформації щодо забруднення атмосферного повітря над окремими містами, що дозволяють більш детально аналізувати якість атмосферного повітря у містах. Подібна деталізація супутникових даних над містами розробляється для усіх обласних центрів та великих міст території України. Використання супутникових даних дозволило виявити потужні викиди та проаналізувати стан забруднення атмосферного повітря у містах, де відсутні наземні спостереження, серед яких Бурштин, Ладижин, Курахово, Новий Світ (Донецька область), Зміїв та інші. Дані Sentinel-5P показали, що викиди великих міст та найпотужніших теплових електростанцій в Україні можуть погіршувати якість



Картосхеми просторового розподілу деяких хімічних складових атмосферного повітря на основі оперативних даних супутника Sentinel-5P



Просторовий розподіл діоксиду азоту над містами Київ, Кривий Ріг, Дніпро та Харків на основі оперативних даних Sentinel-5P

атмосферного повітря на відстані до 200 км за переважаючим напрямком вітру. Вперше вдалося оцінити негативні наслідки забруднення узбережжя Чорного та Азовського морів під час туристичного сезону внаслідок хаотичного неконтрольованого руху моторних човнів та яхт. У місцях найбільшого потоку відпочиваючих влітку від викидів морського транспорту спостерігається погіршення якості атмосферного повітря до середніх рівнів забруднення великих міст. За допомогою супутникових даних виявлено причини зміщення періоду формування максимальних значень вмісту монооксиду вуглецю з лютого на березень-квітень, що спостерігається над територією України, проте не є характерним для більшості країн Європи. Це відбувається внаслідок численних пожеж на полях у березні-квітні під час спалювання травостою. Виявлено характерні сезонні особливості зміни вмісту забруднюючих речовин у загальному стовпі атмосфери.

МІЖНАРОДНЕ НАУКОВЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

Співробітники Відділу беруть активну участь в міжнародних проектах, серед яких за останні п'ять років можна виділити наступні.

Лабораторія супутникових досліджень:

- DAWBEE1-2 (Data access for Western Balkans and East European countries) на замовлення Організації по експлуатації метеорологічних супутників в м. Дармштад, Німеччина (2010–2014);
- Contract CCR.IES.C390895 European Commission JRC “Improved input data and calibration MARS crop yield forecasting system over Ukraine” на замовлення Наукового центру ЕК у м. Іспра (JRC), Італія (2015);
- Проект MODEXTREME FP-7 (European Project № 613817). Моделювання росту і розвитку сільськогосподарських культур в умовах зміни клімату з використанням комплексного модельного підходу BIOMA на замовлення Європейської Комісії, Брюссель (2013–2016);
- Global Yield Atlas на замовлення Університет Вахенінген, Нідерланди (2017–2021);
- Нарощування потенціалу та дослідження щодо моніторингу та оцінки біопродуктивності та прогнозування врожаю за допомогою системи моделювання росту сільськогосподарських культур (CGMS) на замовлення Регіональний Екологічний Центр Центральної Азії (РЕЦЦА), Алмати, Казахстан (2020–2021).

Співробітники **лабораторії моніторингу атмосферного повітря** з 2018 р. є учасниками проектів Пан-Євразійського експерименту PEEХ:

- Enviro-PEEX on ECMWF “Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Modelling Platform research and development for online coupled integrated meteorology-chemistry-aerosols feedbacks and interactions in weather, climate and atmospheric composition multi-scale modelling” (2018–2020 pp.);
- Enviro-PEEX(Plus) on ECMWF “Research and development for integrated meteorology — atmospheric composition multi-scales and — processes modelling for the Pan-Eurasian Experiment (PEEX) domain for weather, air quality and climate applications” (2021–2023 pp.).

Проекти зосереджені на використанні онлайн-інтегрованого моделювання для дослідження впливу аерозольних та хімічних складових атмосферного повітря на перебіг метеорологічних процесів; вивченні впливу аерозолі на радіаційні потоки та мікрофізичні процеси у хмарах; розробки параметризацій у метеорологічних моделях, асиміляції даних хімічних складових та тестуванні граничних і початкових умов у моделях.

У 2020 р. у лабораторії моніторингу атмосферного повітря отримано індивідуальні гранти для проведення досліджень із використанням високо-ефективних комп’ютерних обчислень за проектом HPC-Europa3 “Transnational Access Programme for a Pan-European Network of HPC Research Infrastructures and Laboratories for scientific computing”, що фінансується ЄС. У рамках виконання гранту на тему “Integrated modelling for assessment of potential pollution regional atmospheric transport as result of accidental wildfires” проводиться інтегроване моделювання для оцінки потенційного впливу забруднення атмосферного повітря на регіональному рівні у результаті лісових пожеж на території України. Моделювання здійснюється на фінському суперкомп’ютері “Puhti — Bull Sequana X1000”. На основі індивідуальних грантів HPC-Europa3, створено спільний проект науковців з України, Фінляндії, Данії та Норвегії “PEEX Modelling Platform research and development through HPC-Europa3 Transnational Access Programme” (<https://researchportal.helsinki.fi/en/projects/peex-mp-europa3-peex-modelling-platform-research-and-development->) (2020–2022 pp.).

ПІДГОТУВАННЯ НАУКОВИХ КАДРІВ

За останні п’ять років в лабораторії моніторингу атмосферного повітря Відділу захищено дві кандидатські дисертації на здобуття наукового ступеню кандидата географічних наук за спеціальністю

11.00.09 — метеорологія, кліматологія, агрометеорологія, а саме:

- Савенець М.В. “Сезонна та довготермінова мінливість основних аерологічних характеристик над територією України”, 2018 р.
- Надточій Л.М. “Вплив метеорологічних умов на формування рівня забруднення атмосферного повітря в промислових містах України”, 2021.

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ДІЯЛЬНОСТІ

В подальшому у Відділі моніторингу атмосфери планується розширити дослідження в межах основних напрямків.

В лабораторії супутникових досліджень:

- розвиток та адаптація сучасних технологій отримання та первинної обробки даних з нової генерації оперативних метеорологічних супутників (MTG);
- розробка методів визначення, прогнозування та попередження про стихійних гідрометеорологічних явища за супутниковими даними та даними грозопеленгації з використанням сучасних технологій передачі інформації (Web інтерфейс, СМС повідомлення);
- розробка та вдосконалення системи моніторингу стану, прогнозування врожайності та валового збору основних сільськогосподарських культур в Україні з використанням методів агрометеорологічного моделювання за біофізичними моделями та супутникових даних.

Окрему увагу планується приділити наступним напрямкам:

- розробці методів, що засновані на фізико-статистичному аналізі залежності характеристик електромагнітних полів блискавок від інтенсивності небезпечних та стихійних явищ погоди (грози, шквали, сильні зливи, град) на території України за допомогою системи грозопеленгації;
- розробці програмні засоби доступу до HTTP серверу з результатами визначення та надкоротко-строкового прогнозування небезпечних та стихійних явищ погоди (грози, шквали, сильні зливи, град) на території України за даними системи грозопеленгації;
- оновленню технічних та програмних засобів для отримання оперативних даних з геостационарного метеорологічного супутника METEOSAT третього покоління (MTG).

В лабораторії моніторингу атмосферного повітря:

- дослідження динаміки викидів основних і специфічних забруднюючих речовин на території України, моделювання умов та інтенсивності за-

бруднення на основі наземних та супутникових спостережень;

- дослідження зв'язку забруднення атмосферного повітря з метеорологічними та синоптичними умовами в період глобальних змін клімату;
- розроблення методів приведення супутникових та модельних даних щодо вмісту забруднюючих речовин в атмосфері до приземних концентрацій зазначених домішок в атмосферному повітрі міст України з метою оптимізації системи моніторингу атмосферного повітря та методів прогнозування зміни його якості;
- розробка методів моделювання забруднення атмосферного повітря з використанням моделі Enviro-HIRLAM;
- дослідження еволюції озонового шару в умовах довготермінової мінливості клімату;
- дослідження клімату вільної атмосфери, та зв'язку сучасних кліматичних змін з мінливістю малих газових складових атмосфери;
- розробка та удосконалення методів контролю радіозондування атмосфери.

Окрему увагу планується приділити дослідженню просторово-часового розподілу хімічних складових атмосферного повітря над територією України з використанням даних як наземних спостережень, так і результатів супутникових вимірювань типу Sentinel-5P для розробки методів моделювання рівнів забруднення територій з відсутніми вимірюваннями та в промислових містах України. А саме:

- визначити та проаналізувати високі рівні забруднення атмосферного повітря як в промислових містах України, так і на неохоплених наземними

вимірюваннями територіях за даними Sentinel-5P;

- проаналізувати перенесення забруднюючих речовин від джерел емісії та транскордонного перенесення;
- провести моделювання рівнів забруднення атмосферного повітря з прогнозуванням максимальних концентрацій в м. Миколаїв;
- дослідити просторово-часовий розподіл забруднюючих речовин на території України з використанням даних як наземних, так і супутникових спостережень;
- провести щодобовий контроль стану озонового шару, полів УФ-індексу, а також значних емісій забруднюючих речовин, що призвели до погіршення якості атмосферного повітря на території України.

Також у Відділі планується:

- здійснювати науково-експертну діяльність в інтересах та на замовлення органів державної влади, місцевого самоврядування та ін.;
- більшу увагу приділити патентуванню інноваційних розробок відділу та публікації наукових результатів у виданнях, що мають цитування в індексованих провідних науко-метричних базах даних (Web of Science, Scopus);
- сприяти підготовці студентів, аспірантів і докторантів через навчання в аспірантурі та співпрацю з вищими навчальними закладами, зокрема, Київським національним університетом імені Тараса Шевченка; проводити керівництво студентською науковою роботою, практикою студентів, рецензування та опонування дисертацій, надавати відгуки на автореферати, експертні висновки.

