

*ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ  
МЕТЕОРОЛОГІЇ ТА КЛІМАТОЛОГІЇ*

УДК 551.50

Дворецька І.В.<sup>1</sup>, Савенець М.В.<sup>1</sup>, Савченко В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Український гідрометеорологічний інститут

<sup>2</sup> – Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка

**ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЗОННО-ШИРОТНОГО РОЗПОДІЛУ ДІОКСИДУ  
АЗОТУ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ НАЗЕМНИХ ТА  
СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ**

*Ключові слова:* діоксид азоту, супутникові спостереження, наземні спостереження, емісія, сезонний хід, амплітуда і фаза коливань, хмарність

**Постановка задачі.** Діоксид азоту ( $\text{NO}_2$ ) – газ червоно-бурого кольору, що має специфічний запах. В атмосфері його кількість невелика, проте висока хімічна активність справляє значний негативний як прямий, так і опосередкований вплив. При викидах  $\text{NO}_2$  в атмосферу чітко видно факел бурого кольору, який стає менш помітним при зниженнях температури до від'ємних значень. Основними джерелами потрапляння діоксиду азоту в атмосферу є спалювання викопного палива, горіння біомаси, емісія з ґрунтів та грозові розряди. Стік проходить внаслідок реакцій  $\text{NO}_2$  з гідроксилом в атмосфері та вологого осадження утворених іонів  $\text{NO}_3^-$ . Виведення діоксиду азоту з атмосфери дощем та снігом призводить до зміни кислотності атмосферних опадів та ґрунтів на території, де ці опади випадають [2, 3, 8]. Діоксид азоту дуже активний з хімічної точки зору, що спричинює ряд негативних наслідків. Окислення  $\text{NO}_2$  в атмосфері веде до утворення азотної кислоти та нітратів у складі аерозолів, що потім випадають на підстильну поверхню. При їх концентраціях від 280 до 560  $\text{mg/m}^3$  рослини починають пошкоджуватися. У місцях інтенсивного викиду  $\text{NO}_2$  знижується прозорість атмосфери та утворюється фотохімічний туман – смог. Це явище спостерігається у містах з інтенсивним автомобільним рухом. Окрім цього під впливом сонячної радіації  $\text{NO}_2$ , який має високу поглинальну здатність в ультрафіолетовій області, розкладається на  $\text{NO}$  та атомарний кисень  $\text{O}$ . Ця дисоціація призводить до великої кількості вторинних реакцій, в результаті яких і з'являється саме отруйний смог [2, 3, 8, 9]. Гранично допустимі концентрації діоксиду азоту знаходяться на рівні 0,04  $\text{mg/m}^3$  (середньодобові згідно РД 52 – 04 – 186 - 89) і є значно нижчими від сучасних концентрації для більшості регіонів [7].

**Вихідні дані та методика досліджень.** В зв'язку з тією особливістю, що вміст діоксиду азоту в атмосфері має чітко виражений вертикальний профіль, а його молекули входять в різноманітні хімічні реакції в шарі 25 – 30 км вивчення особливостей розподілу діоксиду азоту необхідно здійснювати із залученням як даних наземних спостережень, так і результатів супутникових вимірів. Таким чином, в даному дослідженні було використано дані і наземних, і супутникових спостережень.

Я дані наземних спостережень були використані спостереження за вмістом  $\text{NO}_2$  на постах у 53 населених пунктах (Рис. 1). Одиницями виміру вмісту на постах є  $\text{mg/m}^3$ . Розрахунок сезонного ходу та його основних характеристик (амплітуди, фази тощо) здійснювався в кожній точці за допомогою гармонічного аналізу

запрограмованому мовою VBA. Візуалізації даних здійснювалась за допомогою оверлейного аналізу в середовищі Surfer.

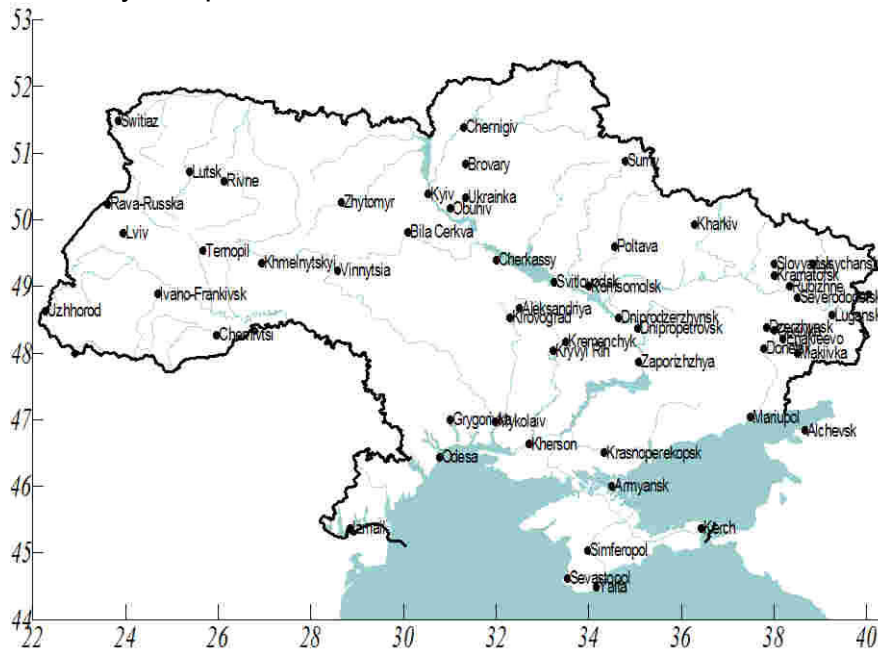


Рис. 1 – Розподіл пунктів наземних спостережень за даними наземних вимірювань

Результати супутникових вимірів  $\text{NO}_2$  було з приладу OMI (Ozone Monitoring Instrument) [10], що був розроблений голландськими та фінськими вченими і є спектрометром. Прилад OMI розташований на супутнику NASA Aura, вимірює пряму й відбиту атмосферою сонячну радіацію в ультрафіолетовому та видимому діапазонах. Вміст  $\text{NO}_2$  вимірюється в спектральному каналі CCD2 (що відповідає за видимий діапазон), одиницями виміру якого є  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  [1]. Дані представлені періодом з 2005 по 2013 рр. у вигляді середньомісячних значень загального вмісту  $\text{NO}_2$  в атмосфері, що охоплюють всю територію планети з кроком  $0.25^\circ$  за широтою і довготою. Для точного порівняння із наземними даними в дослідженнях було використано тільки ті результати супутникових вимірів, що за координатами широти і довготи відповідають пунктам наземних спостережень. Для виокремлення даних, що відповідають території України, їх трансформації та створення бази із можливістю візуалізації результатів мовою VBA було написано спеціальні програмні модулі.

Необхідно відзначити, що результати супутникових спостережень представлені абсолютними одиницями, а наземних – відносними, які, як відомо [4], не можуть бути порівняні кількісно. Тому при порівнянні даних наземних та супутникових спостережень використовують тільки якісний аналіз.

**Виклад основного матеріалу.** Визначенню характеристик сезонного ходу передував аналіз середніх значень вмісту  $\text{NO}_2$ , що дозволив оцінити просторовий розподіл домішки по території України (Рис. 2).

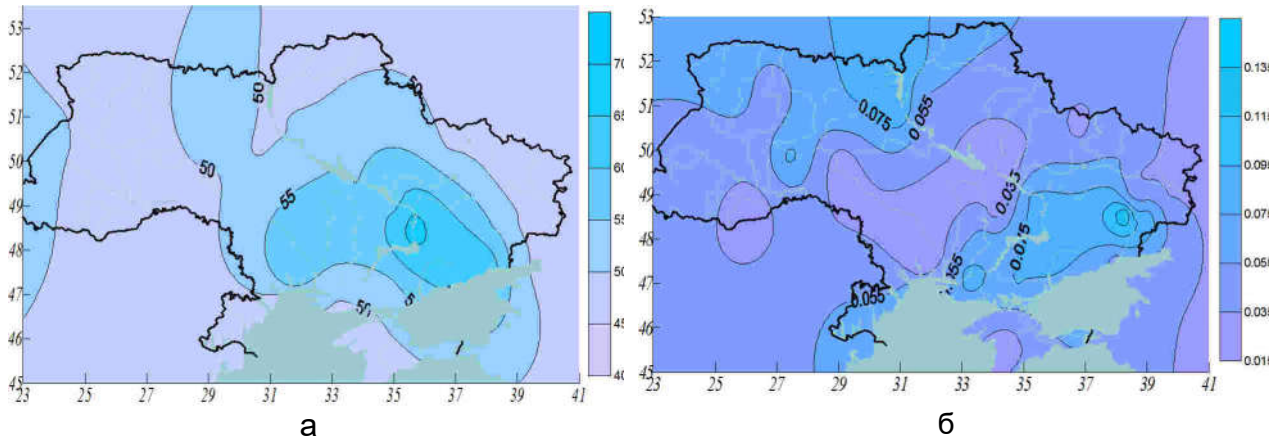


Рис. 2 – Географічний розподіл середніх значень вмісту  $\text{NO}_2$ : а – за даними супутникових ( $10^{14} \text{ см}^{-2}$ ), б – наземних ( $\text{мг/м}^3$ ) спостережень

В цілому за територією України вміст діоксиду азоту коливається в значних межах з розмахом до 30% загального вмісту. Проте варто зазначити, що для більшої частини України середні значення  $\text{NO}_2$  за даними супутникових спостережень лежать в межах  $45 - 55 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Території з мінімальними значеннями чітко не виділяються, а ось максимальні значення спостерігаються на південному сході країни, переважно в Запорізькій області, і досягають  $70 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . За наземними даними цей регіон також характеризується максимальними значеннями вмісту діоксиду азоту (до  $0.11 \text{ мг/м}^3$ ). Це підтверджує факт того, що промисловість є одним з найбільших джерел емісії  $\text{NO}_2$ . На наземних даних, другий максимум спостерігається в районі м. Києва, де промисловість також розвинена, проте викиди діоксиду азоту тут менші. Супутникові дані не показують наявності другого максимуму, оскільки супутникові методи слабо чутливі до нижніх шарів тропосфери [5] і не здатні виявити невеликі відхилення концентрацій в приземному шарі.

Середні концентрації  $\text{NO}_2$  протягом року мають подібний просторовий розподіл, однак в літні місяці (Рис. 3-б) концентрації вищі, ніж у зимові (Рис. 3-а).

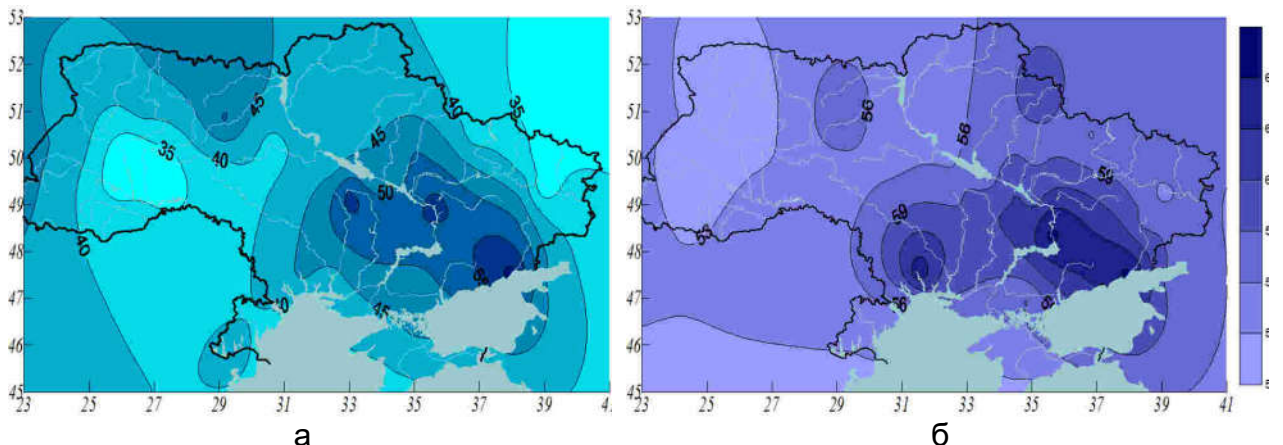
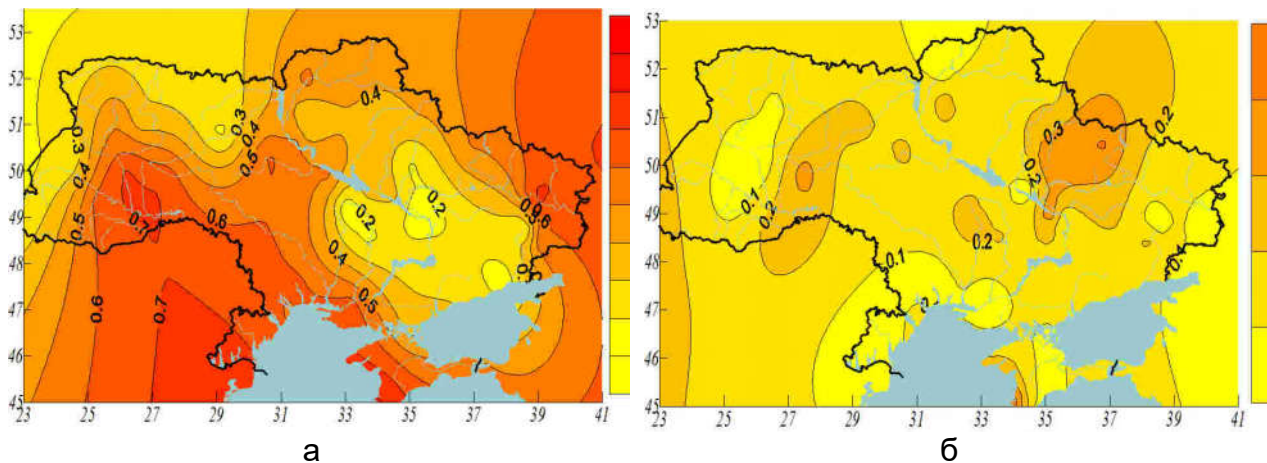


Рис. 3 – Географічний розподіл середніх значень вмісту  $\text{NO}_2$  в січні (а) та липні (б) за даними супутникових спостережень ( $10^{14} \text{ см}^{-2}$ )

Поясненням більш низьких концентрацій взимку може бути збільшення впливу головного джерела стоку – вологого осадження. Оскільки вміст водяної пари в зимові місяці значною мірою переважає вміст в літні місяці [6], виведення  $\text{NO}_2$  з атмосфери відбувається більш інтенсивно. По-перше, підсилюється реакція з гідроксидом  $\text{OH}$ , а по-друге, більша кількість опадів сприяє інтенсивному вологому осадженню  $\text{NO}_2$ .

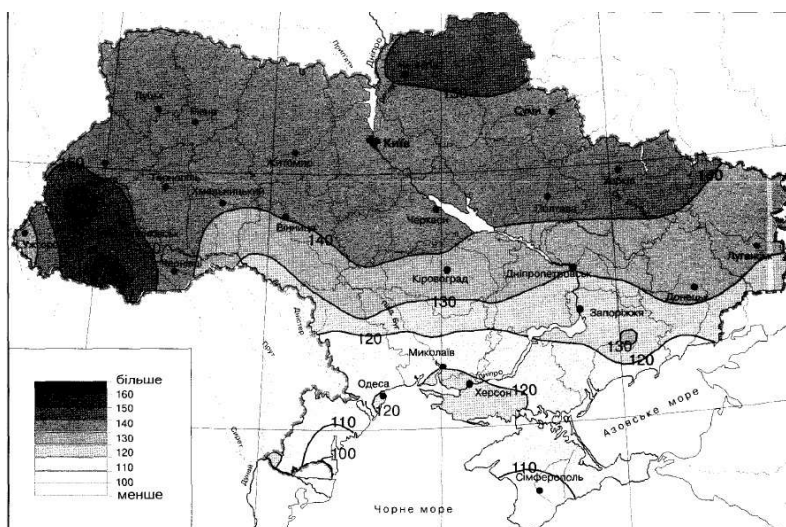


Аналіз сезонного ходу діоксиду азоту показав різні результати за супутниковими даними (Рис. 4-а) та наземними спостереженнями (Рис. 4-б). За даними наземних спостережень, сезонний хід діоксиду азоту практично відсутній ( $R < 0.3$ ). Проте супутникові дані вказують на високі значення коефіцієнту детермінації сезонного ходу на півдні та крайньому сході України ( $R = 0.5 \dots 0.7$ ). Оскільки в приземному шарі концентрації формуються під впливом промислової діяльності та автотранспорту, сезонний хід  $\text{NO}_2$  буде відсутній, через постійну емісію газу в атмосферу. Проте максимальні концентрації діоксиду азоту спостерігаються на висотах 25 – 35 км [5] і коливання на цих висотах визначаються сукупним впливом природних чинників. В результаті цього коефіцієнт детермінації сезонного ходу за даними супутникових спостережень  $\text{NO}_2$  вказує на наявність сезонних коливань газу.



**Рис. 4 – Просторовий розподіл коефіцієнту детермінації сезонного ходу  $\text{NO}_2$  за супутниковими даними (а) та наземними спостереженнями (б)**

Хмарність також значним чином впливає на показники вмісту  $\text{NO}_2$ . Якщо проаналізувати розподіл хмарності та сезонний хід, то можна виявити дві залежності. Перша залежність проявляється на характеристиках сезонного ходу. З Рис. 5 видно, що просторовий розподіл середнього числа похмурих днів в деяких регіонах співпадає з розподілом коефіцієнту детермінації сезонного ходу. Оскільки волога в атмосфері є основним джерелом стоку  $\text{NO}_2$ , то хмарний покрив можна вважати індикатором вмісту газу та сезонних коливань на висотах до 10 км.

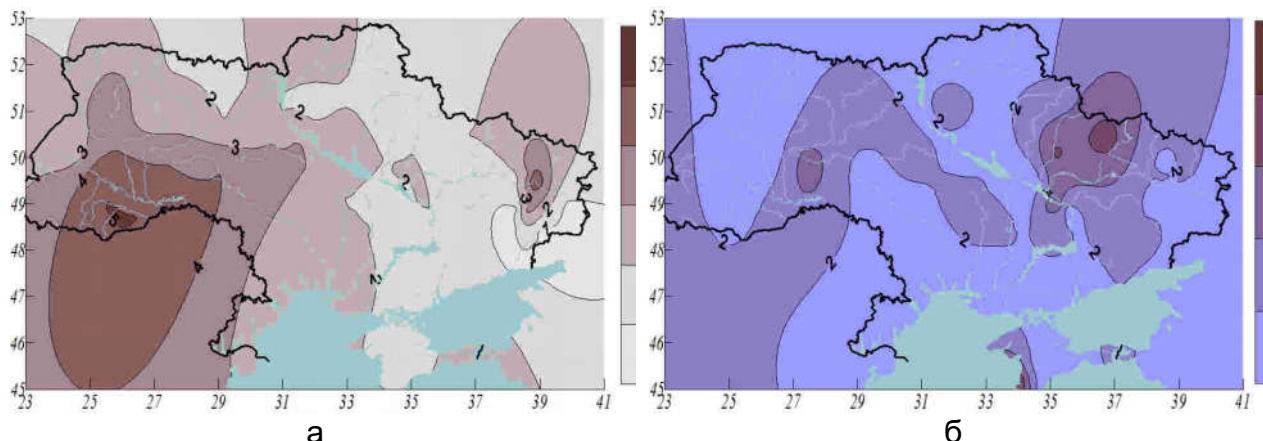


**Рис. 5. – Середнє число похмурих днів із загальною хмарністю за рік [6]**

Друга залежність власне проявляється на показниках середніх концентрацій. Алгоритм розрахунку концентрацій діоксиду азоту в підмарному шарі несе в собі похибки, тому спостерігається взаємозв'язок динаміки діоксиду азоту і хмарності.

В зв'язку із попереднім висновком про відсутність сезонних коливань діоксиду азоту за даними наземних спостережень, подальший розгляд особливостей сезонних коливань буде здійснюватись тільки за даними супутникових спостережень.

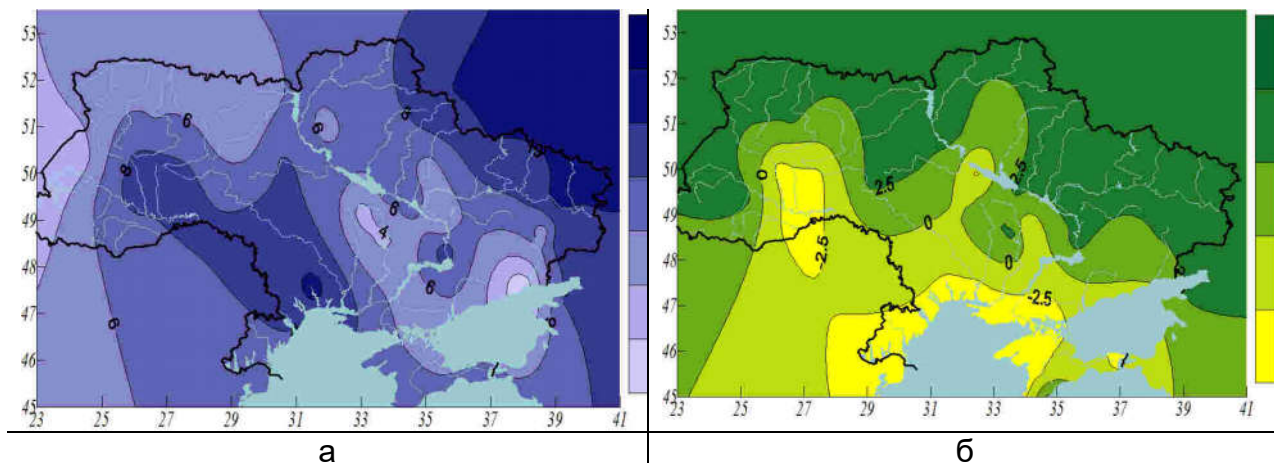
Аналіз кількості значимих гармонік (Рис. 6) показує, що найбільше їх у районах з наявним сезонним ходом  $\text{NO}_2$ .



**Рис. 6 – Просторовий розподіл кількості значимих гармонік  $\text{NO}_2$  за даними супутникових спостережень (а) та наземними спостереженнями (б)**

У приземному шарі регіональні чинники формування концентрацій спостерігаються на незначних територіях навколо міст (Київ, Харків, Дніпропетровськ, Вінниця та ін.). Супутникові дані, що охоплюють вміст у всьому стовпі атмосфери, вказують на значні території, де концентрації формуються під впливом регіональних чинників. Відсутність істотного регіонального впливу на динаміку діоксиду азоту за даними наземних спостережень пояснюється його значною постійною емісією від промислових регіонів, а подальше розповсюдження і перенесення, що фіксується супутником, більшою мірою залежить від регіональних особливостей територій.

Краще зрозуміти сезонні варіації вмісту  $\text{NO}_2$  на території України можна проаналізувавши амплітуди та фази коливань (Рис. 7).



**Рис. 7 – Просторовий розподіл амплітуди (а) та фаз (б) коливань  $\text{NO}_2$  за даними супутникових вимірювань**

Карта амплітуди коливань багато в чому повторює географічний розподіл коефіцієнту детермінації сезонного ходу, з відповідними найбільшими значеннями амплітуд в регіонах з наявністю сезонного ходу та найменшими значеннями – в регіонах, де сезонний хід не проявляється.

Фази коливань першої гармоніки (Рис. 7-б) показуються час настання максимумів концентрацій. У напрямку на північ та на південь максимуми концентрацій запізнюються на 2 – 3 кутові одиниці (що відповідає 110 – 180 днів) по відношенню до центральних регіонів України.

**Висновки.** Проведений аналіз короткострокової динаміки діоксиду азоту показав наявність перевищення ГДК за даними наземних спостережень для більшості регіонів України, при чому регіони з найбільшими концентраціями відповідають регіонам з розвиненою промисловістю, що простежується і на даних супутникових спостережень. На відміну від даних наземних спостережень за супутниковими даними відмічається яскраво виражена сезонна динаміка вмістів діоксиду азоту.

Питання взаємозв'язку даних наземних та супутникових спостережень, а також впливу на динаміку діоксиду азоту різноманітних чинників є актуальним і потребує подальшого поглиблення і додаткового вивчення, що буде обов'язково зроблено в наступних дослідженнях.

#### **Список літератури**

1. Near-real time retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> from OMI / Boersma, K. F., H.J. Eskes, J.P. Veefkind, E.J. and other // *Atm. Chem. Phys.* – 2013. – №2128. – S. 1680-1732. 2. *Chemistry of the Lower Atmosphere/* ed. S. I.Rasool. – NY : Plenum Press, 1973. – 335 p. 3. Moller D. *Chemistry of the Climate System / D. Moller.* – Berlin, NY : Walter de Gruyter, 2010. – 722 p. 4. Quantitative analysis of lead in paint Relative vs. Absolute measurements // Letter is in response to several comments about the different methods of lead paint analysis described in the HUD. – Chapter 7 : Document and possible discrepancy in interpretation of the results. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.brandtinst.com](http://www.brandtinst.com) – Назва з екрану. 5. *Иванов В. А.* О восстановлении вертикального профиля двуокиси азота в атмосфере Земли по сумеречным измерениям рассеянного в зените солнечного излучения / Иванов В. А., Елохов А. С., Постыляков О. В. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2011. – Т.8, №3. – С. 263–268. 6. *Клімат України / за ред. Ліпінського В. М.* – К. : Вид-тво Раєвського, 2003. – 343 с. 7. *Клімат Києва / за ред. В. І. Осадчого, О. О. Косовця, В. М. Бабіченко.* – К. : Ніка-Центр, 2010. – 320 с. 8. *Суркова Г. В.* Химия атмосферы : учеб. пособие / под ред. Ю. К.Васильчука. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2002. – 210 с. 9. *Химия загрязняющих веществ и экология : монография / В. Н. Вернигорова, Н. И. Максимов.* – М. : Палеотип, 2005. – 240 с. 10. OMI, NASA site. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/aura/spacescraft/omi.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/aura/spacescraft/omi.html) – Назва з екрану.

**Дворецька І. В., Савенець М. В., Савченко В. М.** Основні характеристики сезонно-широтного розподілу діоксиду азоту над територією України за даними наземних та супутникових вимірювань. Дослідження присвячене аналізу сезонної динаміки та просторового розподілу діоксиду азоту над територією України за даними наземних та супутникових спостережень. Особливу увагу приділено порівнянню результатів вимірювань за різними системами базування. Проведено аналіз причин виникнення сезонних коливань за результатами супутникових спостережень.

*Ключові слова:* діоксид азоту, супутникові спостереження, наземні спостереження, емісія, сезонний хід, амплітуда і фаза коливань, хмарність.

**Dvoretska I., Savenets M., Savchenko V.** The main characteristics of nitrogen dioxide seasonal-latitude's distribution over the territory of Ukraine by ground-based and satellite measurements data. Research dedicated to the analysis of nitrogen dioxide seasonal dynamics and spatial distribution over the territory of Ukraine by ground-based and satellite

measurements data. Particular attention is given to the comparing measurements results of different based systems. The reasons of seasonal variations emergence by satellite data was analyzed.

*Keywords:* nitrogen dioxide, satellite observations, ground-based observations, emission, seasonal variation, amplitude and phase of fluctuations, cloudiness.

**Дворецкая И. В., Савенец М. В., Савченко В. М. Основные характеристики сезонно-широтного распределения диоксида азота над территорией Украины за данными наземных и спутниковых измерений.** Исследование посвящено анализу сезонной динамики и пространственного распределения диоксида азота над территорией Украины по данным наземных и спутниковых исследований. Особое внимание уделено сравнению результатов измерения за разными системами базирования. Проведён анализ причин возникновения сезонных колебаний по результатам спутниковых наблюдений.

*Ключевые слова:* диоксид азота, спутниковые наблюдения, наземные наблюдения, эмиссия, сезонных ход, амплитуда и фаза колебаний, облачность.

**Надійшла до редколегії 01.12.2014**

УДК 551.509.313.43: 551.509.313.5

**Шпиг В. М.**

*Український гідрометеорологічний інститут*

**ТОЧНІСТЬ ПРОГНОЗУ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ВЕЛИЧИН І  
ОПАДІВ В УМОВАХ ГІРСЬКОЇ МІСЦЕВОСТІ ЗА ГІДРОСТАТИЧНОЮ ТА  
НЕГІДРОСТАТИЧНОЮ ЧИСЕЛЬНИМИ АТМОСФЕРНИМИ  
МЕЗОМАСШТАБНИМИ МОДЕЛЯМИ**

*Ключові слова:* прогноз; модель; верифікація

**Вступ.** Протягом останніх десятиліть чисельні моделі прогнозу погоди утвердились як високоефективний засіб в повсякденній оперативній практиці прогностичних центрів багатьох країн світу. Їх використання значно прискорює та спрощує процес створення різноманітної інформації для широкого кола користувачів, котрий до того ж не залежить від самопочуття прогнозиста (синоптика). Точність таких моделей, як правило, перевищує точність синоптичних прогнозів, особливо, якщо мова йде про їх просторово-часову дискретизацію. Не зважаючи на всі переваги чисельних моделей, їх створення та експлуатація несе в собі і певні труднощі, пов'язані із повнотою фізичних схем, спрощеннями та математичними методами, котрі в них використовуються, потребою в обчислювальних ресурсах та у разі використання емпіричних величин своєрідною територіально-географічною обмеженістю у використанні. Більшість із моделей цього класу потребують окремих досліджень щодо специфіки прогнозування конвективної хмарності, погодних умов у гірських та прибережних районах.

Чисельне моделювання опадів у гірських районах є досить складною проблемою, пов'язаною з рельєфом місцевості. Складність рельєфу супроводжується великою різноманітністю масштабів смуг та осередків хмар та опадів, пов'язаних з атмосферними фронтами та мікроциклонами. На окрему увагу до того ж заслуговує питання вибору фізичних схем (параметризацій фізичних процесів), джерел вхідних даних для моделі, просторово-часової дискретизації та програмного забезпечення, що, зрештою, прямим чи опосередкованим чином впливає на її експлуатаційні характеристики та якість прогнозу погоди.

**Історія становлення і розвитку мезомасштабної моделі прогнозу погоди WRF та її використання в Україні.** Однією з кращих за своїми експлуатаційними характеристиками і найпоширеніших чисельних мезомасштабних моделей у світі є модель WRF (*англ. The Weather Research & Forecasting Model*). Ідеї щодо