

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

КРАВЧЕНКО Володимир Олексійович

УДК 550.3; 551.526; 551.513.7

**Динаміка озонowego шару під впливом планетарних хвиль та тропічних
аномалій**

05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Міліневський Геннадій Петрович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
головний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Залізовський Андрій Владиславович,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
завідувач відділу радіофізики геокосмосу;

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Краковська Світлана Володимирівна,
Український гідрометеорологічний інститут
ДСНС України і НАН України,
завідувачка лабораторії прикладної кліматології відділу
прикладної метеорології й кліматології.

Захист відбудеться 8 квітня 2021 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: Головна астрономічна обсерваторія НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03143.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотечі ГАО НАН України за адресою: Головна астрономічна обсерваторія НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03143.

Автореферат розіслано “ 03 ” березня 2021 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Озон належить до малих складових атмосфери, які мають великий вплив на життя на планеті. Озон поглинає більшу частину ультрафіолетового (УФ) випромінювання і захищає землю від небезпечної УФ-радіації. Область найбільшої концентрації озону в атмосфері розташовується в озоновому шарі на висотах від 15 до 25 км. Актуальність вивчення процесів у озоновому шарі викликана як щорічними, так і довготривалими змінами вмісту озону, особливо у південній полярній області. З 1980 року почало спостерігатись зменшення загального вмісту озону (ЗВО) над Антарктикою за даними станцій Халлі та Сьова (озонова діра). У 1985 р. вперше була опублікована інформація про значне весняне зменшення ЗВО над Антарктикою – явище “озонової діри”. Для визначення озонової діри було введено критерій – це область, де значення ЗВО зменшується нижче 220 одиниць Добсона (ОД). Упродовж другої половини 1980-х – 1990-х років площа озонової діри та дефіцит маси озону у весняні місяці південної півкулі різко зростали, а на початок 2000-х ця тенденція припинилася і в подальшому відзначено ознаки зменшення озонової діри. На фоні довготривалих змін, спричинених впливом озоноруйнуючих речовин (переважно хлорфторвуглеців та окислів азоту) на стратосферний озон, в окремі роки спостерігалася аномально велика (1998, 2006 та 2015 рр.) або мала (1988, 2002 та 2019 рр.) площа озонової діри. Втім, ці аномалії не були завчасно передбачені, що свідчило про недостатнє вивчення зимових передумов для весняної еволюції озонової діри. Такі аномалії вважають результатом динамічного впливу на антарктичну стратосферу – низької або високої активності планетарних хвиль відповідно. Але статистично достовірних співвідношень, які пов’язують параметри планетарних хвиль у зимовий сезон та озонової діри у весняні місяці, досі не було встановлено, і їх визначення є важливою задачею сучасних досліджень стану антарктичного озонового шару.

Активні дослідження варіацій вмісту озону в атмосфері та його розподілу за допомогою дистанційних наземних та космічних засобів дозволили суттєво збагатити уявлення про глобальні тенденції у змінах ЗВО. Однак, незважаючи на значний прогрес, фактори міжрічної та довготривалої змінності озонової діри залишаються недостатньо дослідженими. Зокрема, існує прогалина у вивченні віддалених впливів тропічних температурних аномалій на антарктичну стратосферу. Це позначається на ефективності прогнозування еволюції озонової діри на часових масштабах від сезонів до десятиліть. Тому виявлення стійких зв’язків характеристик озонової діри із атмосферними збуреннями та їх джерелами є актуальною задачею досліджень озонового шару.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати, викладені в дисертації, отримані автором упродовж роботи в лабораторії фізики космосу кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка під час виконання науково-дослідних робіт комплексної наукової програми “Астрономія та фізика космосу” № 01БФ051-14 “Дослідження динамічних процесів у геліосфері, магнітосфері та атмосфері Землі за результатами наземних та супутникових вимірювань” (№ держреєстрації 0101U002469); № 06БФ051-12 “Динамічні процеси

в навколосезонному космосі, верхній атмосфері та озоносфері в аспекті сонячно-земних зв'язків” (№ держреєстрації 0106U006356); №11БФ051-01 “Фундаментальні дослідження в галузі фізики конденсованого стану і елементарних частинок, астрономії і матеріалознавства для створення основ новітніх технологій” (*Підрозділ 12: “Динаміка навколосезонного космічного простору та атмосфери Землі: залежність від стану геліосфери”*) (№ держреєстрації 0106U006356), у яких здобувач був виконавцем.

Автор також брав участь у роботах за договорами № 03ДФ051-01 “Дослідження хвильових зв'язків у системі тропосфера-іоносфера та іоносферних ефектів планетарних і акусто-гравітаційних хвиль” (№ держреєстрації 0103U001549) та Н/2-2005 “Хвильові процеси в озоновому шарі і іоносфері над Антарктичним півостровом” (№ держреєстрації 0105U001421) з Національним антарктичним науковим центром Міністерства освіти і науки України за напрямом досліджень “Фізика атмосфери та ближнього космосу” Державної програми досліджень в Антарктиці на 2002–2010 рр., розпорядження КМУ від 13.09.2001 р. № 422-р., у яких здобувач був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи є визначення міжрічних варіацій та довготривалих змін загального вмісту озону, визначення внеску планетарних хвиль та тропічних аномалій у змінність озонового шару.*

Завдання дослідження:

1. Провести вимірювання ЗВО на станціях спостережень в Україні.
2. Визначити середню десятирічну різницю між локальними супутниковими та наземними вимірюваннями ЗВО в Антарктиці та в Україні.
3. Дослідити залежність різниці між супутниковими та наземними вимірюваннями ЗВО від умов спостережень.
4. Визначити за статистичними даними кореляційну залежність характеристик антарктичної стратосфери від передумов, пов'язаних з активністю планетарних хвиль та з віддаленим впливом тропічних температурних аномалій.
5. Оцінити ймовірні аномалії в характеристиках озонової діри навесні за аномаліями в характеристиках, які описують зимові передумови її формування.

Об'єкт дослідження – озоновий шар в атмосфері Землі.

Предмет дослідження – зміни загального вмісту озону під впливом планетарних хвиль та теплових тропічних аномалій.

Методи дослідження. Методами дослідження є статистичний аналіз багаторічних рядів даних параметрів атмосфери та океану для визначення змінності озонового шару та виявлення віддалених впливів на нього. Кореляційний аналіз для виявлення статистично значущих взаємозв'язків між досліджуваними характеристиками стратосфери, озонового шару та океану. Наземні дистанційні спостереження вмісту озону, порівняння дистанційних супутникових та наземних вимірювань, візуалізація розподілів вмісту озону, температури стратосфери та океану, включаючи власні вимірювання, міжнародні бази та реаналізи атмосферних параметрів.

Наукова новизна одержаних результатів.

- виявлено вплив активності планетарних хвиль в кінці антарктичної зими на зміни характеристик озонової діри у весняні місяці;

- вперше визначено прогнозний індекс стану озонної діри у вересні–листопаді, за амплітудою квазістаціонарних планетарних хвиль у температурі антарктичної стратосфери у серпні, з випередженням 1–3 місяці;

- вперше визначено вплив аномалій поверхневої температури в тропічній частині Тихого океану на весняні рівні ЗВО над Антарктидою із затримкою 3–5 місяці;

- введено прогнозний індекс для озонної діри у вересні–листопаді за рівнем аномалій поверхневої температури у тропічній частині Тихого океану у червні;

- розроблено методику оцінки та визначено розбіжність між наземними та супутниковими вимірюваннями вмісту озону в залежності від сезону, рівня хмарності, рівня ЗВО та структури планетарних хвиль в розподілі ЗВО;

- визначено меридіональну структуру планетарних хвиль, пов'язаних із тропічними аномаліями у червні і відповідальних за інтенсифікацію тропічного впливу на тропосферу та стратосферу антарктичного регіону у жовтні.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена методика та виявлена залежність різниці між наземними та супутниковими озонними даними від умов спостережень для запровадження поточного та ретроспективного контролю якості вимірювань. Результати роботи можуть бути використані метеорологічними станціями, обладнаними озонметричними приладами, та розробниками алгоритмів аналізу даних супутникових спостережень озону. Введені прогнозні індекси для озонної діри мають практичне значення при оцінюванні можливих втрат озону над Антарктичним регіоном та рівня ультрафіолетового опромінення на поверхні з випередженням на 1–5 місяців, а також є корисними додатковими вхідними параметрами для моделювання динамічних змін озонної діри. Виявлена структура планетарних хвиль вказує регіони, найбільш чутливі до тропічних впливів, що важливо для прогнозування регіональних кліматичних змін.

Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень. Результати роботи опубліковано у фахових реферованих журналах та апробовано на міжнародних наукових конференціях.

Особистий внесок здобувача. Викладені в дисертації результати отримані автором самостійно або за його участю.

Робота [8] виконана одноосібно.

У роботах [1, 10] виконано аналіз спостережених даних, постановка задачі та інтерпретація результатів здійснювалася разом зі співавторами.

У роботі [2] автором за допомогою кроскореляційного аналізу визначено часове запізнення дії тропічного джерела впливів на рівень ЗВО та проаналізовано механізми віддалених впливів.

У роботах [3, 4, 11 – 13] автором розроблено методику та проведено математичну обробку результатів, інтерпретація результатів здійснювалася разом зі співавторами.

У роботах [5, 9] автор брав безпосередню участь у вимірюваннях ЗВО та проводив математичну обробку результатів.

У роботах [6, 7, 14] здобувач брав участь у постановці наукових задач, частково обробці наземних даних, обговоренні отриманих результатів та висновків.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені на наступних міжнародних конференціях:

Міжнародна наукова конференція “Україна в Антарктиці – національні пріоритети і глобальна інтеграція”, Київ, Україна, 2008 р.

Міжнародна наукова конференція “Polar Research – Arctic and Antarctic perspectives in the International Polar Year”, Санкт-Петербург, Росія, 2008 р.

Міжнародна наукова конференція “Міжнародний полярний рік в Україні: підсумки та перспективи”, Харків, Україна, 2009 р.

Міжнародна наукова конференція “36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods”, Київ, Україна, 2009 р.

Дев’ята Українська конференція з космічних досліджень, Євпаторія, Україна, 2009 р.

Міжнародна конференція “Global and regional climate changes”, Київ, Україна, 2010 р.

Одинадцята Українська конференція з космічних досліджень, Євпаторія, Україна, 2011 р.

Міжнародна наукова конференція “European Geophysical Union General Assembly”, Відень, Австрія, 2011 р.

Міжнародна конференція “Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko National University of Kyiv, dedicated to 90-th Anniversary of P.R. Romanchuk”, Київ, Україна, 2011 р.

Міжнародна наукова конференція “European Geophysical Union General Assembly”, Відень, Австрія, 2012 р.

Міжнародна наукова конференція “XXXII Open Science Conference, SCAR”, Портленд, США, 2012 р.

Міжнародна конференція “Astronomy and Space Physics, dedicated to the memory of A.V. Mandzhos”, Київ, Україна, 2012 р.

Міжнародна наукова конференція “Астрономія та фізика космосу в Київському університеті”, Київ, Україна, 2013 р.

Міжнародна наукова конференція “Астрономія та фізика космосу в Київському університеті”, Київ, Україна, 2015 р.

Публікації. Викладені в дисертації результати опубліковані протягом 1998 – 2019 рр.: всього 31 робота: 14 статей у фахових наукових журналах [1–14] та 17 у матеріалах та тезах конференцій [15–31].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 174 найменувань на 21 сторінках та додатку. Рисуноків – 44, таблиць – 8. Повний обсяг дисертації становить 207 сторінок, основний текст – 167 сторінок.

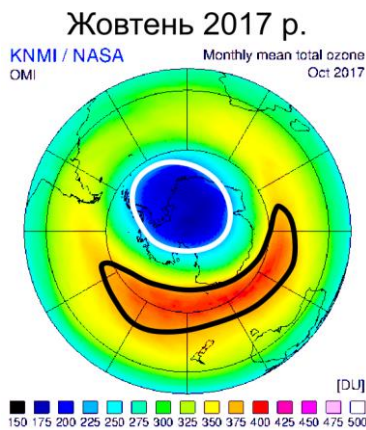
ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У Вступі викладено мету роботи, описано засоби її досягнення. Відображено зв’язок роботи із науковими програмами та темами, наведено інформацію про апробацію результатів, наявність публікацій за темою дисертації. Обґрунтовано актуальність і наукову новизну роботи та коротко викладено зміст кожного розділу.

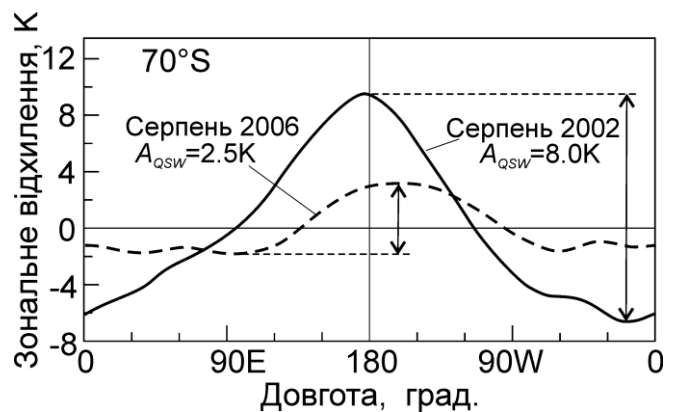
У першому розділі “Вимірювання загального вмісту озону: апаратура та дослідження часових варіацій” наведено огляд інструментальних досліджень озонового шару та можливий вплив планетарних хвиль і тропічних теплових аномалій на його динаміку. Розглянуто принцип дії наземної (спектрофотометр Добсона та фільтровий озонometr M-124) та супутникової апаратури (спектрометри TOMS та OMI) для озонових вимірювань, результати яких використані у даній роботі, та зроблено огляд попередніх робіт, де розглядаються питання, що досліджуються у дисертації.

Супутникові дані сприяли встановленню того, що рівень ЗВО не зменшився глобально протягом останнього десятиліття (у 2000-ні та на початку 2010-х років) і навіть спостерігаються ознаки відновлення озонового шару. За порівнянням вимірювань з супутників та наземних станцій встановлено, що головні джерела розбіжностей між значеннями вмісту озону – це низька висота Сонця над горизонтом, наявність хмарного покриву, труднощі з урахуванням відбивної здатності поверхні у високих широтах та залежність чутливості приладів до величини ЗВО.

В дисертації розглянуто вплив планетарних хвиль на характеристики озонової діри (рис. 1). З літературних джерел відомо, що динамічні збурення і внесена в стратосферу енергія планетарних хвиль (ПХ) призводять до нагрівання стратосфери, зменшення стійкості полярного стратосферного вихору та скорочення тривалості його існування, і, як наслідок, до зменшення незворотних утрат маси стратосферного озону навесні.



а)



б)

Рис. 1. а) Асиметрія озонової діри відносно південного полюса у жовтні 2017 р. Білий контур обмежує рівні ЗВО <220 ОД для озонової діри, а чорний – >380 ОД для середньоширотного максимуму ЗВО. Дані вимірювань супутником OMI (http://www.temis.nl/protocols/o3field/o3mean_omi.php). б) Зональні аномалії температури для 100 гПа на широті 70°S в серпні 2002 р. (суцільна крива) та серпні 2006 р. (пунктирна крива) в умовах слабого та сильного стратосферного полярного вихору відповідно.

Хвильова активність у весняні місяці здатна зміщувати полярний вихор відносно полюса під дією планетарної хвилі із зональним хвильовим числом $m = 1$ (рис. 1) та пришвидшити його розпад і скоротити загальний дефіцит маси озону. Довготний максимум ($\sim 180^\circ\text{E}$) та мінімум ($\sim 0^\circ\text{E}$) на рис. 1 характеризують планетарну хвилю із зональним хвильовим числом 1, яка зміщує вихор та озонову діру відносно полюса. Свідченням цьому була подія 2002 р., яку пов'язують не лише з підвищеною активністю ПХ в масштабах південної півкулі, а й з віддаленими джерелами атмосферних збурень у тропіках. Тоді аномалії температури поверхні океану (ТПО) в екваторіальній області спричинили зміни горизонтальної і вертикальної структури ПХ у південній півкулі, що також призвело до зниження втрат озону в антарктичній стратосфері.

Ефекти запізнення у взаємозв'язках між тропічними аномаліями ТПО та озоною дірою досліджено менше. Увага приділялася здебільшого аналізу динаміки стратосферного полярного вихору та озонової діри у весняний період в залежності від генерованих у тропічній чи позатропічній тропосфері хвильових збурень, проте кліматично усереднені і статистично значущі дані в літературі відсутні. Заповненню цієї прогалини присвячено розділ 4.

У другому розділі “Розбіжність між наземними та супутниковими вимірюваннями загального вмісту озону” здійснено аналіз відносної різниці ЗВО за 1996–2005 рр. між вимірюваннями супутниковим спектрометром EP-TOMS та наземними спектрофотометрами на чотирьох антарктичних і одній арктичній станції. Зіставлення наземних та супутникових вимірювань дало нові кількісні показники, які характеризують розбіжність даних та її залежність від 1) версії алгоритму TOMS, 2) сезонних змін стану хмарного покриву над наземною станцією (рис. 2), 3) положення краю озонової діри відносно станції (рис. 3) рівня ЗВО в умовах існування озонової діри ($\text{ЗВО} < 220 \text{ ОД}$) та за її відсутності ($\text{ЗВО} > 220 \text{ ОД}$).

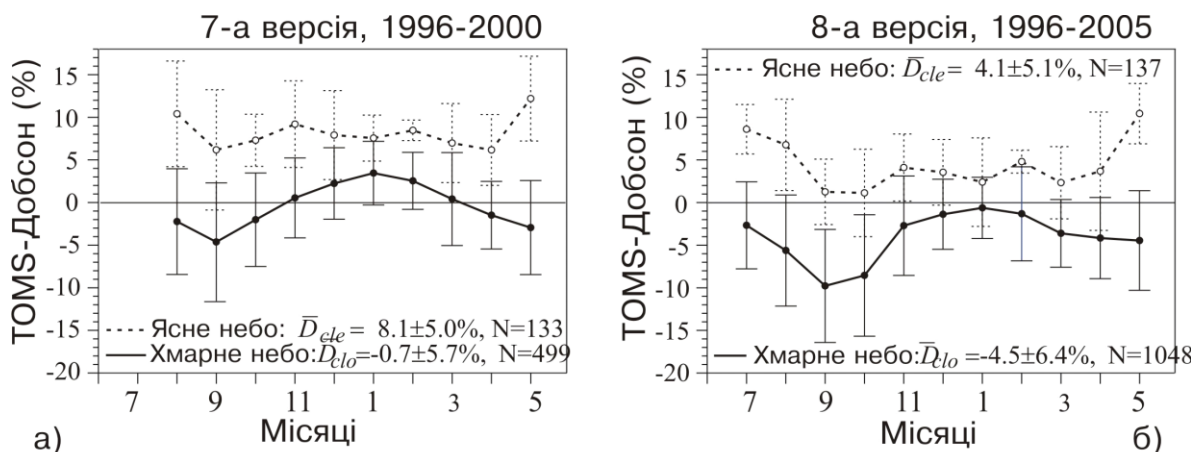


Рис. 2. Середньомісячні різниці ЗВО $D_{\text{TOMS-Добсон}}$ а) для 7-ї версії супутникових даних, усереднені за 1996–2000 рр. та б) для 8-ї версії, усереднені за 1996–2005 рр. Використано дані <https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/data/ozone/>.

Визначення вмісту озону у версії алгоритму TOMS V7 базується на порівнянні вимірюваного нормованого розсіяного назад випромінювання та отриманого шляхом розрахунків для різних кількостей ЗВО та умов спостереження. Загальний вміст озону отримується шляхом інтерполяції освітленості як функції озону. Для кутів зенітної відстані Сонця менше 80° , похибка не залежить від кута.

Основний алгоритм TOMS V8 використовує дві довжини хвилі для обчислення ЗВО: слабе поглинання на довжині хвилі (331.2 нм) для оцінки ефективної відбивної здатності поверхні (або ефективної хмарної фракції) та іншої довжини хвилі (317.5 нм) із сильнішим поглинанням. Робиться неявне припущення, що у ефективної відбивної здатності або хмарної частки немає значних коливань між 331.2 і 317.5 нм. Використовується зворотний алгоритм дистанційного зондування. Враховується профіль озону та корекція за сферичність земної поверхні до зенітної відстані Сонця менше 88° .

Встановлено, що узгодженість між результатами вимірювань спектрофотометром Добсона на станції Академік Вернадський та даними EP-TOMS після переходу від 7-ї до 8-ї версії алгоритму TOMS в абсолютних значеннях суттєво не змінилася. Проте середня додатна різниця 1.8% для 7-ї версії (за оцінками вимірювань у 1996–2003 рр.) змінилася на від'ємну -2% для 8-ї версії (1996–2005 рр.).

Визначено середні значення різниці $\bar{D}_{cle} = 4.1\%$ (137 безхмарних днів) та $\bar{D}_{clo} = -4.5\%$ (1048 хмарних днів), які свідчать, що розбіжність супутникових і наземних даних значною мірою залежить від наявності хмарного покриву. В той же час цей результат показує, що середній діапазон між \bar{D}_{cle} та \bar{D}_{clo} не змінився (близько 9% в обох версіях). Отже, причин значних відмінностей різниці між даними для ясних та хмарних умов спостережень при переході до 8-ї версії розробниками алгоритму не виявлено і не усунуто.

EP-TOMS, 2005

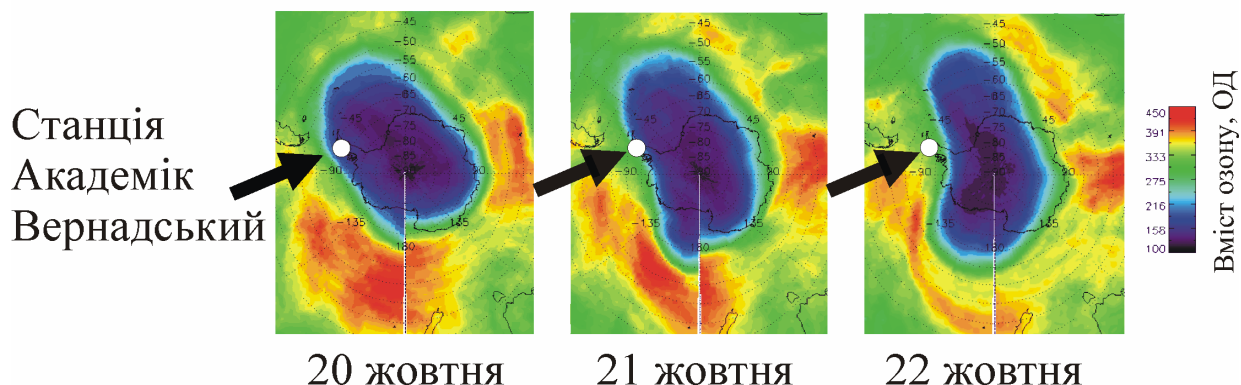


Рис. 3. Щоденне зміщення краю озонової діри (ЗВО < 220 ОД, темно-синя область) відносно антарктичної станції Академік Вернадський (білий кружок) призводить до різкого зростання розбіжності наземних та супутникових вимірювань ЗВО в період озонової діри (вересень–листопад). Зображення поля ЗВО для 20–22 жовтня 2005 р. наводяться за даними <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov>.

Виявлено значне зростання дисперсії відносної різниці між супутниковими та наземними даними для антарктичних станцій (до $\pm 20\%$ і більше) в період існування озонової діри (серпень–листопад). Оскільки тривалість такого ефекту чітко обмежена періодом озонової діри, а станція Академік Вернадський розташована в крайовій області діри (рис. 3), це вказує на вплив динамічної змінності положення краю озонової діри на розбіжність даних.

Встановлено стійку і статистично достовірну залежність різниці від рівня ЗВО над антарктичними станціями. В період озонової діри для ЗВО < 220 ОД одержано значення від -9.5% до -19.7% на 100 ОД, які суттєво відрізняються від даних, отриманих при відсутності озонової діри для ЗВО > 220 ОД та даних для арктичної станції Барроу у північній півкулі ($1-2\%$ на 100 ОД).

Результати вказують на те, що розбіжність TOMS–Добсон при ясному небі, ймовірно, пов'язана переважно з похибками супутникових вимірювань (додатна різниця \bar{D}_{cle} внаслідок завищення ЗВО_{TOMS} над ЗВО_{Добсон}), а в умовах хмарності – наземних (від'ємна різниця \bar{D}_{clo} внаслідок завищення ЗВО_{Добсон} над ЗВО_{TOMS}).

Загалом, результати порівняння свідчать про вплив на розбіжність даних кліматичних особливостей антарктичного регіону, сезонного розвитку озонової діри, а також змін, пов'язаних з удосконаленням алгоритму обробки супутникових вимірювань озону та індивідуальних характеристик спектрофотометра Добсона.

Визначені кількісні показники для проаналізованих залежностей “ D – хмарність”, “ D – алгоритм”, “ D – ЗВО” та “дисперсія D – положення краю озонової діри” можуть бути використані для вдосконалення методики аналізу похибок як наземних, так і супутникових вимірювань, для виявлення джерел значної розбіжності даних та для їх усунення.

Слід зробити висновок, що на вимірювання загального вмісту озону в полярних регіонах, особливо в Антарктиці, впливає залежність від рівня ЗВО, яка, ймовірно, найбільш значна для спектрофотометра Добсона при рівнях нижче 220 ОД та для спектрометра EP-TOMS вище цього рівня. Наведені висновки ґрунтуються на десятилітніх вимірюваннях озону одним супутниковим приладом EP-TOMS. Тим не менш, раніше було показано, що систематичні різниці між різними супутниковими і наземними інструментами між 60°S і 60°N є типовими в межах $\pm 3\%$, тобто схожі на різниці у високих широтах.

Загалом, узгодженість між наземними та супутниковими даними відповідає середній відносній різниці в $1-2\%$ для чотирьох високоширотних станцій, оснащених спектрофотометрами Добсона, проте спостерігається більша невизначеність даних (зростання дисперсії різниць) в умовах озонової діри. Беручи до уваги значне географічне покриття і високе просторове розділення, супутникові дані виглядають більш придатними для оцінки ефектів Монреальського протоколу у змінах озонового шару над Антарктикою. Отримані в дисертації результати слугуватимуть для підвищення точності вимірювань озону як супутниковими, так і наземними дистанційними методами.

У третьому розділі “Вплив квазістаціонарних планетарних хвиль на міжрічні варіації весняних рівнів антарктичного озону” увагу зосереджено на

передумовах та причинах міжрічних змін і, зокрема, на ролі квазістаціонарних планетарних хвиль (КСХ) у варіаціях весняних втрат озону.

Автором показано, що амплітуда квазістаціонарних планетарних хвиль $A_{КСХ}$ у розподілі температури антарктичної стратосфери в кінці зими (у серпні) є індикатором стану озонової діри наступної весни.

Для обчислення лінійної кореляції між двома рядами даних використовувалася формула:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (B_i - \bar{B})^2}},$$

де A_i , B_i – члени двох рядів даних, між якими обчислюється коефіцієнт кореляції; N – їх кількість; \bar{A} , \bar{B} – середні значення рядів.

Міжрічні варіації $A_{КСХ}$ у 1985–2019 рр. корелюють з площею озонової діри та ЗВО над південним полюсом з коефіцієнтами до -0.7 та 0.7 відповідно (рис. 4). Максимум кореляції із температурою стратосфери $r_{\max} = 0.83$ свідчить про значний позитивний зв'язок між проаналізованими часовими рядами.

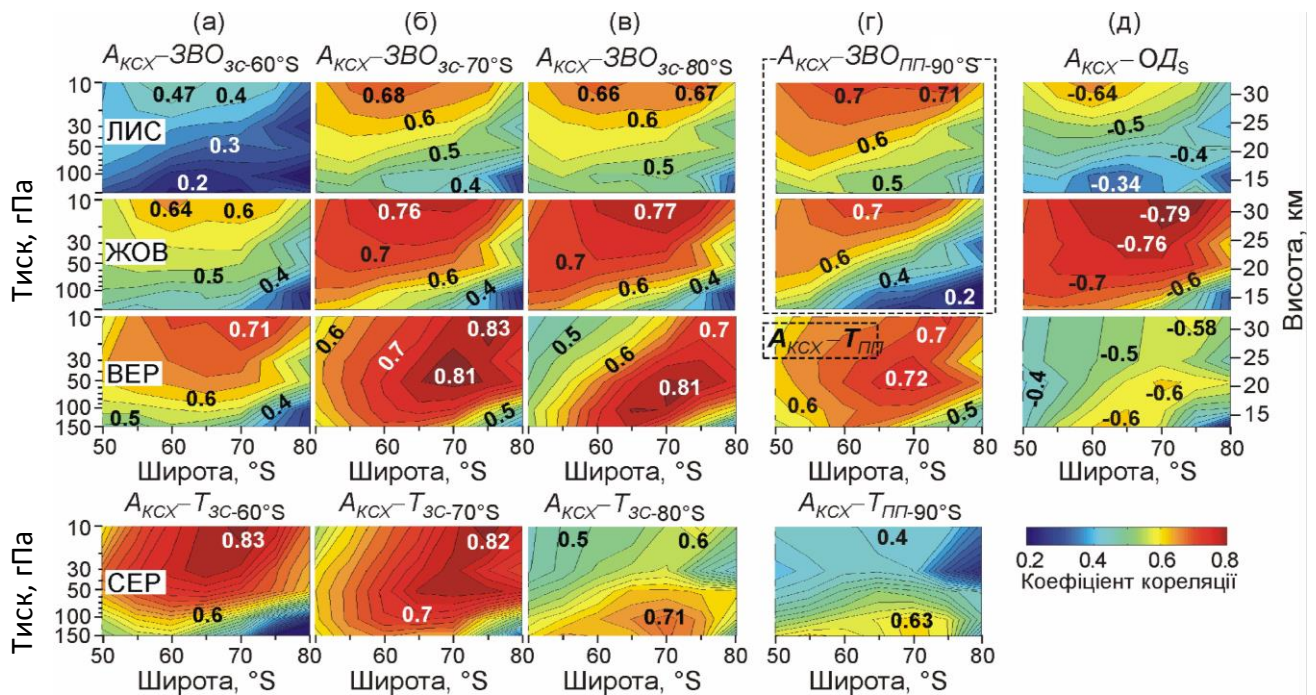


Рис. 4. Широтно–висотний розподіл коефіцієнтів кореляції між амплітудою квазістаціонарних планетарних хвиль $A_{КСХ}$ на широтах $50\text{--}90^\circ\text{S}$ у серпні та (а–в) середньозональною температурою стратосфери $T_{ЗС}$ у серпні (рядок СЕР) та середньозональним загальним вмістом озону $ZVO_{ЗС}$ у вересні (рядок ВЕР), жовтні (рядок ЖОВ) і листопаді (рядок ЛИС); (г) температурою $T_{ПП}$ та вмістом озону $ZVO_{ПП}$ над південним полюсом у ті ж місяці згідно з позначеннями; (д) площею озонової діри $ОД_S$ у вересні–листопаді (знак кореляції протилежний).

Одержані кореляційні співвідношення та їх статистична значущість ($p < 1\%$) вказують на те, що **динамічні** збурення в антарктичній стратосфері на початку сезону озонової діри суттєво впливають на перебіг процесів, які визначають рівень **хімічних** втрат озону в антарктичній стратосфері та сезонну еволюцію озонової діри загалом.

Вказано на основні фактори, спричинені активністю КСХ1, спільна дія яких дозволяє пояснити широтне та висотне розташування максимумів кореляції, зумовлюючи особливу індикативну роль серпня для стану озонової діри у вересні–листопаді:

1) зміни зональної асиметрії стратосферного полярного вихору у серпні та відповідний перерозподіл умов освітлення Сонцем на краю вихору впливають на початкові темпи хімічних втрат озону на краю вихору;

2) варіації у зміщенні полярного вихору відносно південного полюса у серпні впливають на площу низьких температур всередині вихору, сприятливих для існування стратосферних хмар, і, як наслідок, на початкову площу озонової діри;

3) від інтенсивності взаємодії “хвиля – зональний потік” у серпні (через варіації внесеного планетарними хвилями в стратосферу східного моменту руху) залежать умови проникнення ПХ із тропосфери в стратосферу на початку сезонного посилення хвильової активності у південній півкулі, що визначає темпи подальшого наростання динамічних збурень навесні.

Дія трьох вказаних факторів у серпні через вплив КСХ1 на геометрію вихору, температуру стратосфери всередині вихору та на швидкість зонального потоку вносить **незворотні зміни** як у початкові умови формування озонової діри, так і в її сезонну еволюцію. Це позначається на підсумковій масі втрат озону в антарктичній стратосфері.

Фактори (1) та (2) є визначальними для темпів хімічного руйнування молекул озону у нижній стратосфері (100–50 гПа, або 15–20 км) у серпні–вересні, на початковому етапі формування озонової діри. Фактор (3), модулюючи темпи сезонного посилення активності ПХ, діє на варіації температури та вмісту озону в середній стратосфері у серпні–листопаді. Тому амплітуда КСХ на рівні тиску поблизу 10 гПа (~30 км) може слугувати індикатором стану озонової діри упродовж всього сезону її існування. Застосування серпневого індексу для КСХ у 2017 р. дозволило досить точно передбачити площу озонової діри (ПД) у наступні місяці вересень–листопад (рис. 5).

Хоча вплив планетарних хвиль на антарктичну стратосферу вивчено досить ґрунтовно, одержані результати виокремлюють раніше недосліджені ефекти квазістаціонарної складової ПХ в сезонній еволюції озонової діри.

В майбутньому додаткова інформація може бути отримана з використанням кращого просторового розділення при аналізі впливу не лише амплітуди, а й фази КСХ на варіації ЗВО в антарктичному регіоні.

Особливої уваги потребує крайова область полярного вихору, де починається активізація каталітичного циклу озоноруйнуючих хімічних реакцій в кінці зими (нижня стратосфера) і де кардинально змінюються умови горизонтального змішування повітряних мас навесні (середня стратосфера).

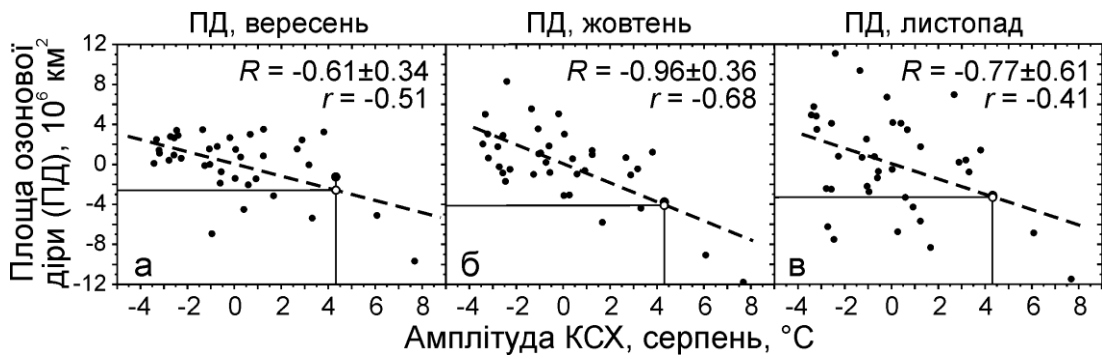


Рис. 5. Регресія між аномалією амплітуди КСХ у серпні та площею озонної діри (ПД) у вересні–листопаді. Вертикальна лінія відповідає аномалії $A_{\text{КСХ}}$ у серпні 2017 р. та на перетині з регресійною прямою (кружок на пунктирній лінії) визначає прогнозоване значення ПД.

У четвертому розділі “Відгук антарктичної стратосфери на варіації поверхневої температури Тихого океану в тропіках” проведено аналіз відгуку стратосферної температури та вмісту озону над антарктичним регіоном на аномалії температури поверхні океану у тропіках. Застосовано метод лінійної кореляції з часовим зсувом для рядів даних за період 1979–2011 рр. Аналіз розпочато із стандартного кліматичного індексу Ніньо-4 та визначено локалізацію його максимальної кореляції з температурою стратосфери у південній півкулі. Послідовно вводячи індекси змінності температури у взаємопов’язаних віддалених регіонах, вперше визначено просторові характеристики теплового джерела атмосферних збурень у тропіках, області відгуку в антарктичному регіоні, шляху розповсюдження тропічного сигналу в атмосфері та часові характеристики максимального зв’язку між тихоокеанським тропічним та антарктичним регіонами.

Загальновідомий критерій Чарні–Дразіна дає значення критичної швидкості зонального вітру U_c , при якому можливе розповсюдження хвиль Россбі угору:

$$u < U_c = \beta \left[(k^2 + l^2) + \frac{f_0^2}{4N^2 H^2} \right]^{-1},$$

$$\beta = \frac{2\Omega \cos \phi}{a},$$

$$k^2 + l^2 = \frac{m(m+1)}{(a \cdot \cos \phi)^2},$$

$$f_0 = 2\Omega \sin \phi \approx 0.0001,$$

де a – радіус Землі, Ω – кутова швидкість обертання, ϕ – широта, H – висота однорідної атмосфери (≈ 8000 м), N – частота Брунта–Вайсяля для незбуреного руху ($N \approx 0.02 \text{ c}^{-1}$), f_0 – середнє значення величини $2\Omega \sin \phi$.

Оцінка для планетарної хвилі $m = 1$ на широті 60°S дає для критичної швидкості зонального вітру $U_c = 52 \text{ м/с}$.

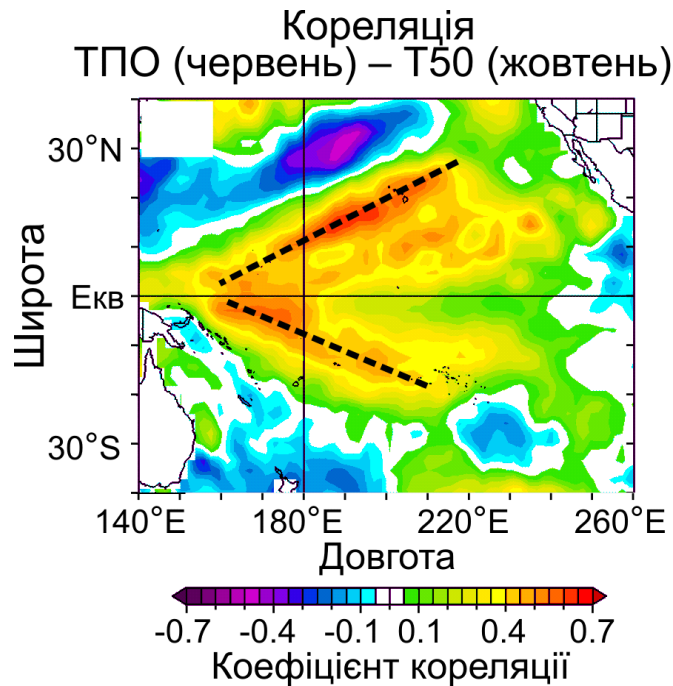


Рис. 6. Розподіл аномалій ТПО у червні за результатами ковзної кореляції з індексом стратосферної температури Т50–ЖОВ, що відповідає часовому зсуву 4 місяці. Пунктирні лінії окреслюють контур V-структури, температурні аномалії в області якої викликають збурення, що поширюються в стратосферу і в бік полюса, впливаючи на озонову діру. Використані дані реаналізу NCEP-NCAR (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>).

Отримані в дисертації результати сприяють покращенню прогнозних оцінок стану озонової діри зокрема та сезонних змін в атмосферній динаміці південної півкулі загалом.

Так, встановлена властивість затримки тропічного впливу на атмосферу південної півкулі дозволяє виділити не враховану раніше складову регіональної змінності атмосферних параметрів у весняні місяці, яка накладається на поточну картину атмосферних збурень.

Східно–західна асиметрія в розподілі кореляції навколо південного полюсу, спричинена переважним впливом КСХ1, робить малоефективним пошук відгуку на тропічні впливи в зонально усереднених параметрах антарктичної стратосфери.

Виявлені кореляційні зв'язки індексу ЦТТІ із зональним вітром та стратосферною температурою в антарктичному регіоні є сильнішими, ніж для стандартних кліматичних індексів, введених для вузької екваторіальної зони. Це визначає особливу роль температурних аномалій у широтних межах всієї тропічної зони та, зокрема, в області V-структури (рис. 5) як фактора впливу на атмосферну циркуляцію південної півкулі завдяки розповсюдженню збурених планетарних хвиль (рис. 7).

Сформулюємо найбільш важливі результати четвертого розділу:

1) виявлено V-подібну структуру аномальної міжрічної змінності поверхневої температури в центральній тропічній частині Тихого океану (область 30°N–20°S, 160–220°E, охарактеризована індексом ЦТТІ), яка є джерелом атмосферних збурень,

здатних досягати антарктичної стратосфери (рис. 5);

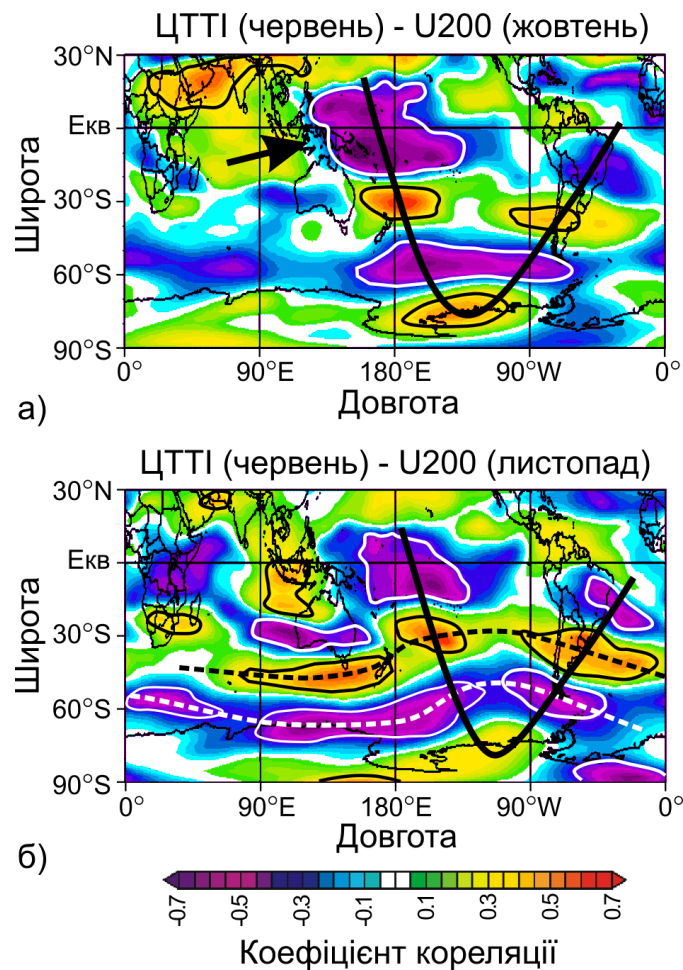


Рис. 7. Кореляція між ЦТТІ в червні і зональним вітром на рівні тиску 200 гПа а) в жовтні та б) в листопаді. Суцільними кривими позначено меридіональні ланцюги хвиль Россбі, які на нижньому зображенні поєднуються з елементами зональної хвилі КСХ3 (пунктирні криві). Вплив червневих тропічних аномалій досягає південного полярного регіону із часовою затримкою 4–5 місяців.

2) максимальний сигнал із тропіків зумовлюють варіації ЦТТІ у червні, а максимальний відгук спостерігається у західній Антарктиці у жовтні ($r_{\max} = 0.7$) – із запізненням на 4 місяці;

3) виявлено міграцію зонально асиметричної області відгуку на схід у весняні місяці вересень–листопад, що свідчить про зсув фази КСХ в антарктичній стратосфері по довготі більше ніж на 180° ;

4) існує антикореляція ЦТТІ із зональним вітром у стратосфері ($r_{\min} = -0.7$); її екстремум рухається в бік полюса та вниз, вказуючи на переважання стратосферного шляху розповсюдження тропічного сигналу та на значну роль індукованої тропічними збуреннями аномалії зональної циркуляції в сезонному ослабленні стратосферного полярного вихору;

5) виявлено проникнення аномалії зональної циркуляції із стратосфери у тропосферу у жовтні з одночасною генерацією меридіонального цуга

квазістаціонарних планетарних хвиль у тропосфері та нижній стратосфері (рис. 6); модифікація структури КСХ характеризує поширення тропічного сигналу по вертикалі від середньої стратосфери до поверхні у західній Антарктиці та від тропіків до високих широт у тихоокеанічному секторі тропосфери.

Збагачуючи знання про тісні зв'язки “океан – атмосфера” у віддалених регіонах, результати розділу 4 виявляють напрями досліджень, які сприятимуть кращому розумінню причин регіональних змін клімату. Ці результати дозволяють визначити процеси взаємодії поверхневого шару тропічного Тихого океану із системою пасатних вітрів, пов'язаною із субтропічними антициклонами, та їх роль у формуванні V-структури з великою площею когерентних варіацій ТПО ($50^\circ \times 60^\circ$ за широтою та довготою відповідно). Отримано інформацію, яка дозволяє визначити внесок океанічних хвиль Росббі в синхронізацію варіацій поверхневої температури в області V-структури та дослідити розповсюдження атмосферних збурень вгору від поверхневих теплових аномалій в області V-структури з проникненням у верхню стратосферу.

Додаток А містить список опублікованих праць за матеріалами роботи та відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

У дисертації вивчено динаміку та розподіл загального вмісту озону за даними багаторічних наземних та супутникових вимірювань. Також проаналізовано чинники, які впливають на цей розподіл.

1. Вперше показано, що амплітуда квазістаціонарних планетарних хвиль у розподілі температури антарктичної стратосфери в кінці зими є індикатором стану озонної діри наступної весни. Одержані кореляційні співвідношення вказують на те, що динамічні збурення в антарктичній стратосфері на початку сезону озонної діри суттєво впливають на перебіг процесів, які визначають рівень втрат озону в антарктичній стратосфері та сезонну еволюцію озонної діри.

2. Запропоновано новий прогностичний індекс, який дозволяє прогнозувати стан озонної діри з випередженням у один-два місяці, та успішно застосовано його для прогнозування аномального зменшення озонної діри навесні 2017 р. Визначено, що основні фактори, які дають внесок у передумови сезонної еволюції озонної діри, пов'язані з активністю квазістаціонарних планетарних хвиль та змінами зональної асиметрії стратосферного полярного вихору.

3. Вперше визначено просторові характеристики теплового джерела атмосферних збурень у тропіках, області відгуку в антарктичному регіоні, шляху розповсюдження тропічного сигналу в атмосфері та часові характеристики максимального зв'язку між тропічним та антарктичним регіонами. Вперше виявлено V-подібну структуру аномальної міжрічної змінності поверхневої температури в центральній тропічній частині Тихого океану, яка є джерелом атмосферних збурень, здатних досягати антарктичної стратосфери. Запропоновано індекс змінності аномалій температури в області V-структури взимку (червень) в якості прогностичного показника стану антарктичної стратосфери у вересні–листопаді, з випередженням на 3–4 місяці.

4. Вперше виявлено проникнення аномалії зональної циркуляції із стратосфери у тропосферу у жовтні з одночасною генерацією меридіонального цуга квазістаціонарних планетарних хвиль у тропосфері та нижній стратосфері; модифікація структури КСХ відображує поширення тропічного сигналу від тропіків до високоширотної стратосфери у тихоокеанському секторі довгот та по вертикалі від середньої стратосфери до поверхні у західній Антарктиці. Встановлена властивість затримки тропічного впливу на атмосферу південної півкулі дозволяє виділити не враховану раніше складову регіональної змінності атмосферних параметрів у весняні місяці, яка накладається на поточну картину атмосферних збурень.

5. Здійснено ґрунтовний та різнобічний аналіз різниць вимірювань ЗВО супутниковим спектрометром EP-TOMS та наземними спектрофотометрами на чотирьох антарктичних і одній арктичній станції. Зіставлення наземних та супутникових вимірювань дало нові кількісні показники, які характеризують розбіжність даних та її залежність від параметрів інструментів для спостережень та умов спостережень.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У реферованих наукових журналах:

1. Kravchenko V.O. Quasi-stationary planetary waves in late winter Antarctic stratosphere temperature as a possible indicator of spring total ozone / Kravchenko V.O., Evtushevsky O.M., Grytsai A.V., Klekociuk A.R., Milinevsky G.P., Grytsai Z.I. // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 2865–2879, doi:10.5194/acp-12-2865-2012, 2012.
2. Evtushevsky O.M. Teleconnection between the central tropical Pacific and the Antarctic stratosphere: spatial patterns and time lags / Evtushevsky O.M., Kravchenko V.O., Hood L.L., Milinevsky G.P. // *Climate Dynamics*, 44(8), 1841–1855, doi:10.1007/s00382-014-2375, 2015.
3. Evtushevsky O. / Evtushevsky O., Milinevsky G., Grytsai A., Kravchenko V., Grytsai Z., Leonov M. // Comparison of ground-based Dobson and satellite EP-TOMS total ozone measurements over Vernadsky station, Antarctica, 1996–2005. *International Journal of Remote Sensing*, 29(9), 2675–2683, doi: 10.1080/01431160701767591, 2008.
4. Kravchenko V. Total ozone dependence of the difference between the empirically corrected EP-TOMS and high-latitude station datasets / Kravchenko V., Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G., Shanklin J. // *International Journal of Remote Sensing*, 30(15–16), 4283–4234, 2009.
5. Milinevsky G. Recent developments of atmospheric research in Ukraine / Milinevsky G., Danylevsky V., Grytsai A.V., Evtushevsky O., Kravchenko V.O., Bovchaliuk A., Bovchaliuk V., Sosonkin M., Goloub Ph., Savitska L., Udodov E., Voytenko V. // *Advances in Astronomy and Space Physics*, 2(2), 114–120, 2012.
6. Evtushevsky O. The influence of large amplitude planetary waves on the Antarctic ozone hole of austral spring 2017 / Evtushevsky O., Klekociuk A.R., Kravchenko V., Milinevsky G., Grytsai A. // *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 69, 57–64, doi:10.22499/3.6902.004, 2019.

7. Klekociuk A.R. The Antarctic Ozone Hole during 2017 / Klekociuk A.R., Tully M.B., Krumme P.B., Evtushevsky O., Kravchenko V., Henderson S.I., Alexander S.P., Quere R.R., Nichol S., Smale D., Milinevsky G.P., Grytsai A., Fraser P.J., Zheng X., Gies H. P., Schofield R., Shanklin J.D. // *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 69, 29–51, doi: 10.22499/3.6902.001, 2019.

8. Кравченко В.О. Зіставлення наземних та супутникових вимірювань загального вмісту озону над антарктичними станціями / Кравченко В.О. // *Український антарктичний журнал*, №6–7, 135–142, 2007–2008.

9. Грицай З.И. Сопоставление наземных и спутниковых измерений общего содержания озона по данным антарктической станции Академик Вернадский и обсерватории Лесники / Грицай З.И., Евтушевский А.М., Кравченко В.А., Леонов Н.А., Милиневский Г.П. // *Бюлетень Українського антарктичного центру*, Вип. 2, 44–49, 1997–1998.

10. Кравченко В.О. Віддалені тропосферно-стратосферні зв'язки за даними 30-річних супутникових вимірювань антарктичного озону / Кравченко В.О., Євтушевський О.М., Міліневський Г.П. // *Космічна наука і технологія*, 18(5), 46–58, 2012.

11. Євтушевський О.М. Порівняння наземних та супутникових вимірювань загального вмісту озону над антарктичною станцією Академік Вернадський (1996–2005 рр.) / Євтушевський О.М., Грицай А.В., Міліневський Г.П., Кравченко В.О., Грицай З.І. // *Космічна наука і технологія*, 14(5), 74–84, 2008.

12. Кравченко В.О. Міжрічні варіації загального вмісту озону над Антарктикою у весняні місяці / Кравченко В.О., Євтушевський О.М. // *Наук. праці УкрНДГМІ*, Вип. 257, 106–118, 2008.

13. Євтушевський О. Зміни загального вмісту озону над Антарктикою / Євтушевський О., Грицай А., Кравченко В., Міліневський Г., Лозицький В., Леонов М. // *Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія*, Вип. 46, 55–60, 2010.

14. Кравченко В.О. Передумови зменшення озонової діри у 2017 році / Кравченко В.О., Євтушевський О.М., Грицай А.В., Міліневський Г.П., Клекочук А.Р. // *Український журнал дистанційного зондування Землі*, Вип. 18, 53–58, 2018.

У матеріалах та тезах конференцій:

15. Грицай А.В. Comparison of total ozone from EP-TOMS and Dobson spectrophotometer measurements for Vernadsky station 1996–2005 / Грицай А.В., Грицай З.І., Євтушевський О.М., Кравченко В.О., Міліневський Г.П. // *Матеріали Міжнар. конф. “EGU2007”*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 05681, 2007.

16. Євтушевський О.М. Comparison of the ground-based and satellite total ozone measurements over the Antarctic stations / Євтушевський О.М., Кравченко В.О. // *Міжнародна наукова конференція “Україна в Антарктиці – національні пріоритети і глобальна інтеграція”* 23–25 травня 2008 року, м. Київ, Україна. Р. 61.

17. Грицай А.В. Comparison of total ozone from EP-TOMS and Dobson spectrophotometer measurements for Antarctic stations. Polar Research – Arctic and Antarctic perspectives in the International Polar Year / Грицай А.В., Грицай З.І., Євтушевський О.М., Кравченко В.О., Міліневський Г.П. // *SCAR/IASC IPY Open Science Conference*. St. Petersburg, Russia, July 8–11, 2008 S3.4/P04.

18. Грицай А.В. Quasi-stationary planetary waves in the late winter Antarctic stratosphere temperature distribution / Грицай А.В., Євтушевський О.М., Кравченко В.О., Міліневський Г.П. // Міжнародна Антарктична конференція (ІАС2009) "Міжнародний полярний рік в Україні: підсумки та перспективи". 22–24 травня 2009, Харків, Україна, С. 30.

19. Грицай З.І. The ozone hole variability preconditions related to the Antarctic stratosphere temperature distribution layer / Грицай З.І., Євтушевський О.М., Кравченко В.О., Міліневський Г.П. // 36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods. – August, 17–22, 2009, Kyiv, P. 77.

20. Євтушевський О.М. Disagreements between EP-TOMS and Dobson total ozone measurements during Antarctic spring / Євтушевський О.М., Кравченко В.О. // 9th Ukrainian Conference on Space Research. Abstracts. Aug, 31–Sep, 5, 2009, Yevpatoria, Ukraine. P. 36.

21. Міліневський Г. Ozone layer study over Kyiv by Dobson spectrophotometer measurements / Міліневський Г., Сосонкін М., Грицай А., Кравченко В., Лозицький В., Данилевський В., Грицай З., Ковальонюк С., Єременко Н. // International Conference "Global and regional climate changes". 16–19 November, 2010, Kyiv, Abstracts. P. 28.

22. Міліневський Г.П. Исследование озонового слоя над Киевом с помощью спектрофотометра Добсона / Міліневський Г.П., Грицай А.В., Євтушевський О.М., Кравченко В.О., Грицай З.І. // Збірник праць Міжнародної конференції "Глобальні та регіональні зміни клімату". 16–19 листопада 2010, Київ, Україна, 8 P.

23. Evtushevsky O.M. Ozone layer study over Kyiv by Dobson spectrophotometer. EGU / Evtushevsky O.M., Kravchenko V.O., Milinevsky G.P. // April, 3-8, 2011. Vienna, Austria. EGU2011-4994.

24. Грицай З.І. Dobson spectrophotometer ozone measurements in Kyiv / Грицай З.І., Євтушевський О.М., Кравченко В.О., Міліневський Г.П. // International Conference "Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko National University of Kyiv, dedicated to 90-th Anniversary of P.R. Romanchuk". May, 24-27, 2011. Kyiv. С. 86–87.

25. Грицай З.І. Two years ozone layer study at Kyiv-Goloseyev site by Dobson spectrophotometer / Грицай З.І., Євтушевський О.М., Кравченко В.О. // EGU General Assembly. Geophysical Research Abstracts. – April, 22–27, 2012. Vienna, Austria. EGU2012-6196.

26. Evtushevsky O.M. Antarctic spring total ozone response to the sea surface temperature variations in the Tropical Pacific / Evtushevsky O.M., Kravchenko V.O., Milinevsky G.P. // EGU General Assembly. Geophysical Research Abstracts. April, 22–27, 2012. Vienna, Austria. EGU2012-6148.

27. Evtushevsky O.M. Total ozone in Antarctic spring and sea surface temperature variations in the Tropical Pacific / Evtushevsky O.M., Kravchenko V.O., Milinevsky G.P. // XXXII Open Science Conference, SCAR. July, 13-25, 2012, Portland, USA. P. 554.

28. Міліневський Г.П. Umkehr vertical ozone distribution in the atmosphere over Kyiv–Goloseyev site / Міліневський Г.П., Кравченко В.О. // International Conference "Astronomy and Space Physics, dedicated to the memory of A.V. Mandzhos". Book of abstracts. May, 22–25, 2012. Kyiv, Ukraine. P. 100–101.

29. Evtushevsky O.M. Delayed responses of the Antarctic stratosphere to Tropical Pacific SST anomalies / Evtushevsky O.M., Kravchenko V.O., Hood L.L., Milinevsky G.P. // I. Spatial patterns. *Астрономія та фізика космосу в Київському університеті: Міжнародна наукова конференція*. 2013. P. 102.

30. Milinevsky G.P. Lagged correlations of the Antarctic stratosphere with tropical pacific SST anomalies / Milinevsky, G.P., Evtushevsky, O.M., Hood, L.L. Kravchenko, V.O. // American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting. 2015. Vienna, Austria. 2, 3401.

31. Grytsai A.V. Calibration of M-124 filter ozonometers with Dobson spectrophotometer No. 040 at Kyiv-Goloseyev station / Grytsai A.V., Milinevsky G.P., Sosonkin M.G., Kravchenko V.O., Evtushevsky O.M., Grytsai Z.I. // *Астрономія та фізика космосу в Київському університеті: Міжнародна наукова конференція*. 2015. P. 64.

АНОТАЦІЯ

Кравченко В. О. Динаміка озонowego шару під впливом планетарних хвиль та тропічних аномалій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження (104 – Фізика та астрономія). Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, Київ; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена визначенню та аналізу динаміки і розподілу загального вмісту озону (ЗВО) під дією планетарних хвиль в атмосфері та теплових тропічних аномалій за даними дистанційних наземних та супутникових вимірювань. Проведено детальне порівняння супутникових та наземних вимірювань ЗВО. Розглянуто вплив планетарних хвиль на характеристики озонowej діри. Показано, що амплітуда квазістаціонарних планетарних хвиль в кінці зими (у серпні) є індикатором стану озонowej діри наступної весни. Визначено, що від інтенсивності взаємодії “хвиля – зональний потік” у серпні залежать умови проникнення планетарних хвиль із тропосфери в стратосферу, що визначає темпи подальшого наростання динамічних збурень навесні. Вперше виявлено джерело атмосферних збурень в центральній тропічній частині Тихого океану, здатних досягати антарктичної стратосфери. Вперше визначено просторові характеристики цього теплового джерела атмосферних збурень, області відгуку в антарктичному регіоні, шляху розповсюдження тропічного сигналу в атмосфері та часові характеристики максимального зв'язку між тропічним та антарктичним регіонами. Виявлено проникнення аномалії зональної циркуляції із стратосфери у тропосферу у жовтні з одночасною генерацією меридіонального цуга квазістаціонарних планетарних хвиль у тропосфері та нижній стратосфері.

Ключові слова: джерело атмосферних збурень, загальний вміст озону, зональний вітер, дистанційні наземні і супутникові вимірювання, озонowa діра, планетарні хвилі, полярний вихор, стратосферна циркуляція, тропічна аномалія.

Kravchenko V.O. Dynamics of the ozone layer under the influence of planetary waves and tropical anomalies. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the candidate of science degree in physics and mathematics, specialty 05.07.12 – remote aerospace research (104 – Physics and Astronomy). Taras Shevchenko National University of Kyiv, MES of Ukraine, Kyiv; The Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis deals with the study and analysis of the dynamics and distribution of the total ozone (TOC) according to long-term groundbased and satellite measurements under the influence of processes that affect this distribution and dynamics: planetary waves in the atmosphere and thermal tropical anomalies.

A detailed comparison of satellite and ground-based TOC measurements was made and it was established that the main sources of discrepancies between the TOC values are the presence of cloud cover, difficulties taking into account the reflectivity of the Earth's surface at high latitudes, and the dependence of the instrument on TOC value.

The analysis of the relative TOC difference between EP-TOMS satellite spectrometer and ground-based spectrophotometer measurements at four Antarctic and one Arctic station for 1996–2005. The results indicate that the TOMS-Dobson discrepancy in clear skies is probably related mainly to satellite measurement errors, and in cloudy conditions, to ground-based ones. A significant increase in the variance of the relative difference between satellite and ground-based data for Antarctic stations (up to $\pm 20\%$ or more) during the existence of the ozone hole (August–November) was revealed. This indicates the effect of dynamic displacement of the position of the edge of the ozone hole on the discrepancy in the data.

A stable and statistically significant dependence of the difference in the level of TOC over the Antarctic stations on the presence of an ozone hole has been established. During the ozone hole period, TOC values were obtained that significantly differ from data obtained in the absence of an ozone hole and data for the Arctic Barrow station in the northern hemisphere.

As the practical result, the comparison of ground-based and satellite measurements yielded new quantitative indicators characterizing the discrepancy between the data and its dependence on the version of the TOMS algorithm, seasonal changes in the state of the cloud cover above the ground station, the position of the edge of the ozone hole relative to the station, and the level of pollutants in the presence and absence of the ozone hole.

The influence of planetary waves on the characteristics of an ozone hole is considered in the thesis. It is shown that the amplitude of quasi-stationary planetary waves at the end of winter (in August) is an indicator of the state of an ozone hole in spring. The main factors caused by the activity of planetary waves are determined, the combined action of which allows us to explain the latitudinal and altitudinal location of the correlation maxima between the wave amplitude in temperature and the size of the ozone hole. This determines the special indicative role of August for the state of the ozone hole in September–November. It was found that the minimum of the zonal asymmetry of the

stratospheric polar vortex in August and the corresponding redistribution of the Sun lighting conditions at the edge of the vortex affect the initial rates of chemical losses of ozone at the edge of the vortex.

Variations in the displacement of the polar vortex relative to the south pole in August affect the area of low temperatures inside the vortex, favourable for the existence of stratospheric clouds, and, as a consequence, the initial area of the ozone hole. It was determined that the conditions of penetration of planetary waves from the troposphere into the stratosphere at the beginning of a seasonal increase in wave activity in the southern hemisphere, which determines the rate of further increase in dynamic dynamics, depend on the intensity of the wave-zonal flow interaction in August (through variations of the eastern moment of motion introduced by planetary waves into the stratosphere) disturbances in the spring. The action of these factors in August makes irreversible changes both in the initial conditions for the formation of the ozone hole and its seasonal evolution.

The analysis of the response of the stratospheric temperature and ozone content over the Antarctic region to the anomalies in the temperature of the ocean surface in the tropics is carried out. The spatial characteristics of the thermal source of atmospheric disturbances in the tropics, the response region in the Antarctic region, the propagation path of the tropical signal in the atmosphere, and the temporal characteristics of the maximum relationship between the tropical and Antarctic regions were first determined.

A source of atmospheric disturbances capable of reaching the Antarctic stratosphere was first discovered in the central tropical Pacific Ocean (CTP). To determine the magnitude of the interaction of tropical anomalies and the Antarctic stratosphere, the CTPI index was introduced. The maximum signal from the tropics according to the CTPI index appears in June, and the maximum response is observed in western Antarctica in October – with a delay of 4 months. The migration of a zonal asymmetric response region to the east in the spring months of September–November was revealed, which indicates a phase shift of the quasi-stationary waves in the Antarctic stratosphere by more than 180° in longitude. The penetration of the zonal circulation anomaly from the stratosphere into the troposphere in October was detected with the simultaneous generation of a meridional train of quasi-stationary planetary waves in the troposphere and lower stratosphere.

For the first time, correlations between the CTPI and the zonal wind, as well as stratospheric temperature in the Antarctic region were revealed, which turned out to be more significant than the standard climatic indices introduced for the narrow equatorial zone.

The obtained results contribute to the improvement of forecast estimates of the state of the ozone hole in particular and seasonal changes in the atmospheric dynamics of the southern hemisphere as a whole, and also indicate research directions for a better understanding of the causes of regional changes in the stratospheric and tropospheric climate.

Keywords: source of atmospheric disturbance, total ozone content, zonal wind, remote ground and satellite measurements, ozone hole, planetary waves, stratospheric circulation, tropical anomaly.