

СОНЯЧНА АКТИВНІСТЬ, АТМОСФЕРНИЙ ОЗОН І ГЛОБАЛЬНА ТЕМПЕРАТУРА В МІНІМУМІ ЦИКЛІВ 23/24

Іван ЛАБА¹, Ігор ПІДСТРИГАЧ¹, Павло ЛІСНЯК²

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія 8, Львів 79005

² Тернопільський національний педагогічний університет
ім В. Гнатюка
вул. Кривоноса 2, Тернопіль 46009

Редакція отримала статтю 6 березня 2013 р.

За даними спостереження Сонця (www.swpc.noaa.gov/solar-cycle), центрів дослідження клімату Землі (Велика Британія), моніторингу загального вмісту озону обсерваторії Ароса (Швейцарія) вивчено роль атмосферного озону в сонячно-земних зв'язках. Із озоном пов'язано як природні, так і антропогенні зміни клімату, а також залежність клімату від сонячної радіації. Спостережуване значне виснаження (руйнування) озонного шару в останній чверті ХХ і на початку ХХІ ст. призвело до посилення парникового ефекту.

До 1998 р. глобальна температура (T_{glob}) зростала, а далі вона достатньою мірою стабілізувалась, включаючи мінімум циклів 23/24. Значне виснаження озонного шару стратосфери спричинило також збільшення сонячної енергії, що досягла поверхні Землі у мінімумі циклів 23/24 і, таким чином, зберегло T_{glob} досить стабільною.

1. ВСТУП

Цикл сонячної активності (СА) № 23, який розпочався у травні 1996 р., завершився у грудні 2008 р. тривалим і глибоким мінімумом, рекордним за останніх 100 років. Як з'ясувалось, його особливості перекликались із актуальною проблемою глобального потепління клімату Землі і її природи. Якщо в другій половині ХХ ст. антропогенні чинники і СА діяли в одному напрямі, збільшуючи температуру Землі, то надалі з'явилась можливість розділити ці два чинники впливу у зв'язку з теперішнім спадом СА, що припадає на мінімум циклів 23/24 і наступні цикли, починаючи з циклу № 24.

Зміна клімату Землі – вельми важлива проблема людства. До кінця 60-х років ХХ ст. не було сумнівів у тому, що зміна клімату зумовлена природними причинами і, насамперед, постійною циклічною зміною СА. У цей час була висунута гіпотеза про те, що поступово зростаючі викиди

(CO_2 , SO_3 та ін.) в атмосферу Землі призведуть до парникового ефекту і, як наслідок, до зростання глобальної температури.

На початку 70-х років минулого століття було виявлено потенціальну можливість хлорфторвуглеводневих (ХФВ) сполук знищувати озон (O_3), що може призвести до небажаних екологічних наслідків.

У 1975 р. Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) створила робочу групу "Зміна озонного шару в результаті діяльності людини і деякі можливі геофізичні наслідки" для вивчення впливу антропогенних змін хімічного складу атмосфери на парниковий ефект і його можливе глобальне потепління. У 1985 р. британські вчені одержали переконливі дані знищення O_3 . Потепління в 70-х роках ХХ ст. було інтерпретоване як підтвердження наведеної вище гіпотези; ідея антропогенного впливу на клімат Землі стала домінуючою, як у світі науки, так і в ЗМІ.

Для оцінки зміни клімату, спричиненої техногенними чинниками, ВМО, згідно з Програмою ООН з навколишнього середовища, створила Міжнародну групу експертів зі зміни клімату (МГЕЗК), яка вживає відповідних заходів щодо зменшення антропогенного забруднення навколишнього середовища.

Проведено (під егідою ООН) низка Міжнародних конференцій про припинення (поступове) забруднення (Монреальський протокол 1987 р. із усіма доповненнями) навколишнього середовища.

Мінімуму циклів 23/24 присвячено низку статей. Так, Х.І. Абдусахматов [1,2] виявив залежність 11-річного циклу від фази вікового циклу і дав прогноз завершення циклу № 23 у липні 2007 р. Для вікових циклів минулого тисячоліття І.А. Eddy [3,4] виявив високу кореляцію між періодами значних варіацій СА і відповідними достовірними змінами клімату Землі як за фазою, так і за амплітудою; у кожному віковому мінімумі спостерігалось похолодання клімату, а в період великих максимумів – потепління. Кількість плям на Сонці протягом 1869–1989 рр. показала чудовий паралелізм з одночасною зміною T_{glob} [5] у північній півкулі. За даними обсерваторій США Маунт Вілсон і Джона Вілкокса (Стенфорд) напруженість полярного (полоїдального) магнітного поля Сонця зменшилась удвічі ради впродовж мінімумів трьох останніх циклів. Дослідження контрасту супергрануляційної сітки впродовж циклу № 19 показало високу кореляцію з числом Вольфа і відповідно значний внесок у загальне сонячне випромінювання [6]. S.K. Solanski зі співавторами [7] оцінили внесок (~ 90 %) поверхневого магнітного поля Сонця у зміні сонячної сталості. Виявлено зменшення напруженості магнітного поля плям протягом останніх 20 років [8]. P.V. Foukal [9] зафіксував зміну температури іоносфери на 300 % під впливом крайнього УФ впродовж циклу. Н. Svensmark [10] запропонував космокліматологічну теорію зміни клімату, згідно з якою крім прямої сонячної радіації є ще опосередкована дія – через галактичні космічні промені (ГКП). Експерименти Європейського центру ядерних досліджень підтвердили вплив ГКП на хмароутворення в тропосфері [11].

Автори вивчили роль стратосферного озонного шару в сонячно-земних зв'язках. З'ясувалось, що виснаження озонного шару є одним із найважливіших чинників, який впливає на зміну клімату на нашій планеті.

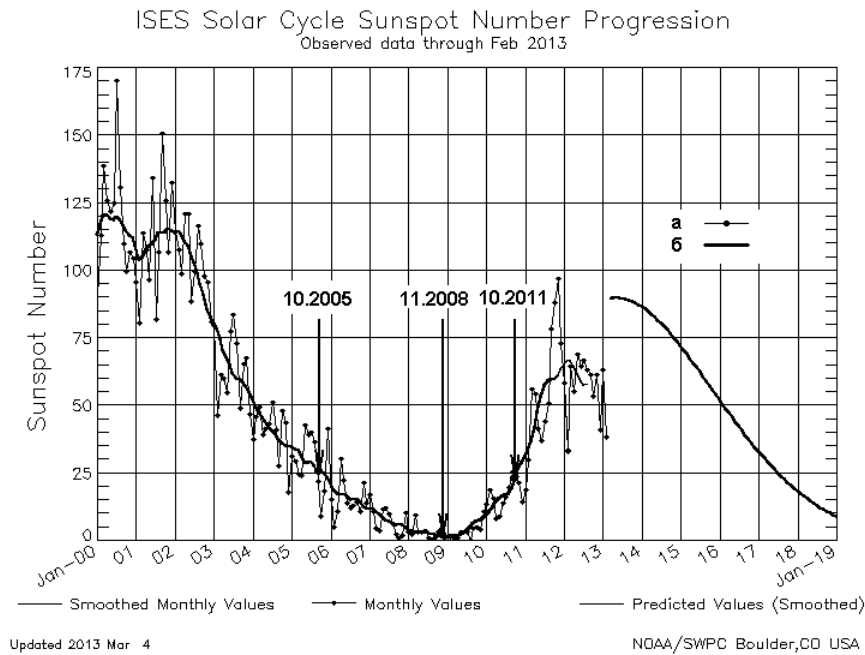


Рис. 1: Фаза мінімуму циклів 23/24: середньомісячні (а) та згладжені (б) значення W . Стрілки вказують на початок, кінець і момент мінімуму.

2. СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ

Спостереження Сонця проводяться як наземними, так і космічними апаратами (КА). Крім власних спостережень для дослідження використовують світові бази Інтернет-даних ([//ftp.ngdc.noaa.gov/SOLARDATA/](http://ftp.ngdc.noaa.gov/SOLARDATA/)) про Сонце та його активність.

Головним проявом СА є наявність плям на поверхні Сонця. За міру плямотворної діяльності прийнято відносне число сонячних плям (число Вольфа, W). Це число відображає зміну середньомісячних значень W упродовж циклу. Вольф остаточно обчислив середній період (11,1 року) циклічних змін СА. Кожний 11-річний цикл починається в мінімумі й завершується в мінімумі (наступному). Моменти мінімумів/максимумів визначаються за допомогою згладжених (по 13 точках) середньомісячних W . Змінюється як тривалість (9 – 13 років), так і амплітуда циклу (48–200 W).

Фаза мінімуму циклів 23/24, яка розпочалась у 2005 р., фактично тривала до кінця 2010 р., охопивши частину вітки спаду старого циклу № 23, глибокий перехідний період і початок вітки росту нового циклу № 24.

На рис. 1 представлена фаза мінімуму циклів 23/24 середньомісячних значень W . Проведено згладження, визначено згладжені значення для

кожного місяця, у т.ч. й момент мінімуму (екстремальне значення), який є межею двох циклів.

11-річний цикл W – основний параметр СА; з ним синхронізовано багато параметрів/індексів як сонячних, так і геофізичних.

Окремі спостереження озону в Європі розпочались у 20-х роках минулого століття, фактично після конструювання англійським ученим Добсоном спектрофотометра (1924), за допомогою якого можна було вимірювати загальний вміст O_3 (ЗВО) в повітрі. Обсерваторія в Швейцарських Альпах (м. Ароса) була однією з перших, яка започаткувала спостереження озону вже в 1926 р. (рис. 2). Систематичний моніторинг O_3 розпочався 50 років тому. Рознесена по всій земній кулі мережа станцій (близько 150 обсерваторій) систематично проводить виміри ЗВО, температури, стану забруднення навколишнього середовища і інші необхідні метеодані. Дані спостережень надходять у базу світового центру даних. Проводяться також супутникові спостереження за станом навколишнього середовища, завдяки яким спостереженням можна отримати інформацію про розподіл O_3 в атмосфері над поверхнею Землі, а також T_{glob} .

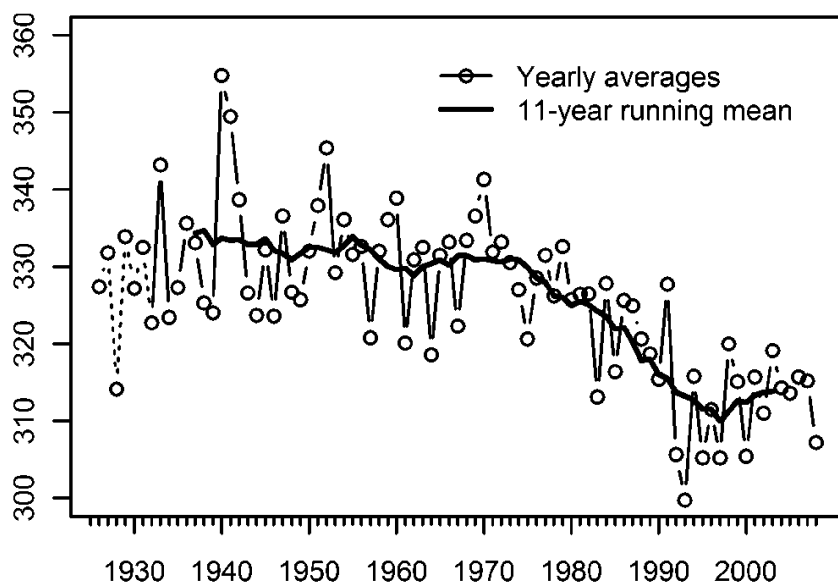


Рис. 2: Середньорічний і середньозгладжений за 11 років загальний вміст озону на обсерваторії Ароса, (Швейцарія) з 1927 по 2008 рік в од. Добсона (взято зі статей [15,16]).

На рис. 3 подано розподіл озону з висотою, а також поглинання ним УФ-випромінювання.

Тропічний озон характеризується порівняно тонким високо розміщеним максимумом озонного шару (26–27 км), в напрямку до середніх і ви-

соких широт ЗВО зростає, а озонний шар знижується поступово (до 22 км). На початку 70-х років ХХ ст. над полярними областями стали з'являтися озонні діри (ОД) з дуже зниженим ЗВО, які з часом зростали. Спостереження виявили велику нестабільність ЗВО: добові й річні зміни, залежність від висоти, широти і довготи.

3. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження СА і її дії в межах геліосфери і на клімат Землі – головна тема фізики Сонця і сонячно-земних зв'язків.

Фаза мінімуму циклів 23/24 розпочалась 2005 р. і тривала майже 5 років. Завершальна частина вітки спаду старого циклу № 23 розпочалась (згідно із згладженою кривою, рис. 1) у жовтні 2005 р. і завершилась у грудні 2008 р.

Сонячні спалахи – найбільш потужні прояви СА. Під час спалаху, який охоплює усі шари атмосфери Сонця, за 100-1000 с із обмеженої площі поверхні вивільняється енергія $10^{22} - 10^{25}$ Дж. 90 % цієї енергії вивільняється у вигляді рентгенівського і УФ-випромінювання, потоків прискорених частинок та гідродинамічних течій плазми. Ці процеси пов'язані з сонячними плямами. У мінімумі СА на видимій поверхні Сонця спостерігається невелика кількість груп плям порівняно з максимумом, тому й спалахів набагато менше. Дуже високий рівень СА зафіксовано 4.12.–7.12.2006 р. і 13.12.–14.12.2006 р. Спалах 5.12.06 р. дав максимальне випромінювання в оптичному діапазоні (4В) і потоки нейтрального водню. 6.12.06 р. та ж сама активна область AR10930 продукувала спалах ($X6.0 = 6.0 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²), який створив цунамоподібну ударну хвилю. У липні й грудні 2007 р. на Сонці виникали лише спалахи С-класу.

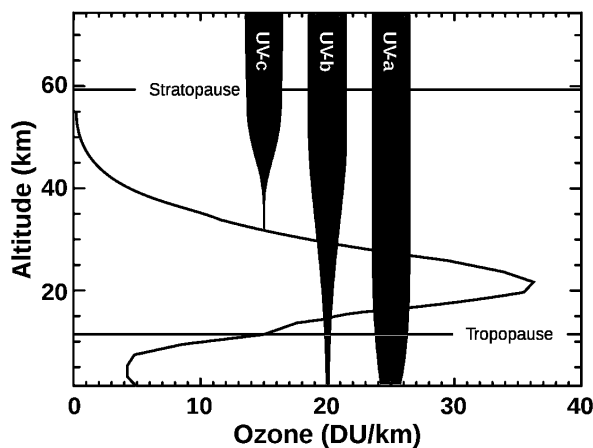


Рис. 3: Розподіл атмосферного озону і блокування ним УФ-випромінювання: УФ-А (400–320 нм); УФ-В (320–280 нм); УФ-С (280–100 нм).

Для вітки спаду характерне повільне зменшення згладжених середньо-

місячних W , екстремальне значення якого припадає на грудень 2008 р. Із огляду на те, що глибину мінімуму визначає кількість днів безплямового Сонця впродовж року, можна прийняти 2007 р. початком глибокого мінімуму (163 дні без плям). Найменші значення згладжених середньомісячних значень W випадають на 2008–2009 рр. (268 і 260 днів без плям відповідно з екстремумом 1.7 у грудні 2008 р.).

Перехідний період циклів 23/24 (коли на видимому диску Сонця одночасно перебувають групи плям обох циклів) розпочався в січні 2008 р. і завершився наприкінці липня 2009 р. Це період, упродовж якого на тлі великої кількості днів безплямового Сонця на його поверхні зароджуються групи плям дуже малих розмірів з простою конфігурацією магнітного поля, малою частотою виникнення і тривалістю існування та не супроводяться значними спалахами і викидами корональної плазми. Плямотворна діяльність Сонця в перехідний період циклів 23/24 досягла рекордно низьких значень, найнижчих за останніх 100 років.

2009 р. – перший рік нового циклу № 24, як і попередній рік, був дуже спокійний. Невелике зростання СА розпочалось у вересні-жовтні, й, особливо, у грудні 2009 р., а також протягом перших чотирьох місяців 2010 р. і було початком реального виходу з глибокого мінімуму (початок вітки росту). Це спричинило зростання геофізичного A_p -індексу, який характеризує стан космічної погоди. Загалом рівень СА у 2010 р. (березень–грудень) був низьким; як і геофізична активність. Перші місяці 2011 р. характеризувались значним поступовим зростанням середньомісячних W , що підтвердило вихід Сонця із затяжної фази мінімуму.

Повне сонячне випромінювання (сонячна стала) змінюється синхронно відносно W й безпосередньо зв'язане зі зміною T_{glob} та контролюється еволюцією магнітних полів на його поверхні. Зазначимо, що групи плям мають максимальну індукцію (>1500 Гс) магнітного поля на рівні фотосфери, яка різко зменшується як за висотою відносно місця виходу, так і за площею. Великі групи плям під час “проходження” видимим диском Сонця створюють помітний дефіцит у видимому діапазоні спектра, але факельні поля підвищеної яскравості біля плям дають відповідно надлишок випромінювання як у видимому, так і в близькому УФ діапазоні. З підвищенням температури у верхніх шарах атмосфери Сонця – хромосфері (флокульні поля) та короні (корональні конденсації, яскраві маленькі утворення температурою $2 \cdot 10^6$ К) – останні випромінюють в УФ і м'якому рентгенівському діапазонах. Магнітні поля з індукцією (< 1500 Гс) спричиняють нагрівання плазми й відповідно підсилюють її теплове випромінювання на всіх рівнях атмосфери Сонця.

Оскільки сонячний цикл є фактично циклом його магнітної активності, то в міру того як зростає зайнята магнітним полем площа сонячної поверхні зростає короткохвильове електромагнітне (УФ і м'яке рентгенівське) випромінювання, а отже, й сонячна стала на 0.1 % (1.4 Вт/м^2) від мінімуму до максимуму. Зміни в УФ діапазоні більші, ніж в оптичному діапазоні. У глибокому мінімумі циклів 23/24 випромінювання в крайньому УФ (10–100 нм) зменшилось на 10–15 %, в УФ – на 6 %, у видимому – на 0.02 % відносно попереднього мінімуму циклів 22/23.

Забруднення атмосфери Землі як природне (вулканічний газ і пил, пожежі лісових масивів і торфу), так і антропогенне (CO_2 , SO_3 , ХФВ) сьогодні становить ~ 1 млрд. т. газових викидів і ~ 400 млн. т. пилу.

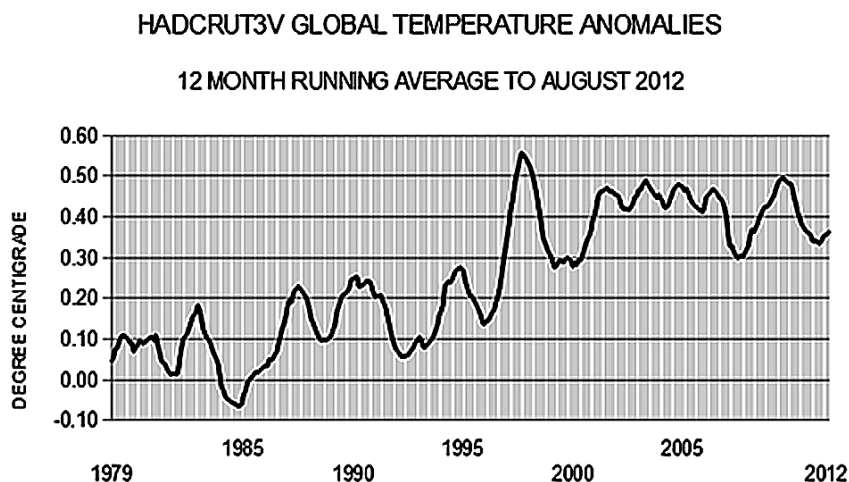


Рис. 4: Зміна T_{glob} з 1979 по 2012 р., наведена Метеорологічним бюро Центру Хедлі та Кліматичних досліджень Східної Англії.

Висока концентрація забруднювальних речовин в атмосфері спричинила глобальні екологічні проблеми: парниковий ефект, озонні діри, кислотні дощі, а також вплинула на динаміку й відповідно підсилила швидкість глобальної циркуляції повітря.

“Зелені легені” планети, поглинаючи CO_2 (фотосинтез), не дозволяють йому стати основною причиною глобального потепління, а кислотні дощі знижують врожайність с/г культур.

Проте з озоном можна пов’язати як природні (у т.ч. залежність від сонячної радіації), так і антропогенні зміни клімату [12–14].

Озон зосереджений головним чином у двох шарах атмосфери (рис. 3). Левова частка озону ($\sim 90\%$) міститься в нижній стратосфері, утворюючи озонний шар, і простягається вгору до 50–60 км. Решта озону локалізується в тропосфері. За останніх 20 років значно зріс загальний вміст приземного озону. Попри незначну частку в атмосфері й велику нестабільність, озон відіграє важливу роль у атмосферних процесах і в житті на Землі. Стратосферний озон захищає все живе від згубного впливу жорсткого УФ-випромінювання, його слід відновлювати, обмеживши викиди ХФВ-речовин. Приземний озон шкідливий, утворює у великих містах і промислових центрах отруйний смог.

Стратосферний (“доіндустріальний”) озон у нормальній кількості (нормальний загальний вміст озону, ЗВО) в атмосфері – антипарниковий газ, природний терморегулятор природи і клімату: захищає все живе від згубного впливу жорсткого УФ випромінювання, пропускаючи до поверхні Землі УФ (λ 4000 нм – 320 нм), поглинаючи УФ (λ 300 нм – 200 нм), також у видимій і ІЧ-областях (рис. 3). ЗВО став зменшуватись спочатку повільно до 1973 р. (рис. 2), а далі – швидше і досягнув мінімальних зна-

чень у 1997 р. [15]. На такому ж мінімальному рівні ЗВО був у максимумі циклу № 23, на його вітці спаду і в затяжному [16] мінімумі циклів 23/24 (з 2005 по 2010 р.). В окремих середньозширотних регіонах ЗВО зменшувався на 10 % - 20 % - 40 % над великими містами та промисловими регіонами.

Той самий стратосферний озон при значному виснаженні/руйнуванні (“індустріальний”, зменшення ЗВО, озонні діри) є парниковим газом. В обох випадках він є посередником у сонячно-земних зв’язках, лише в другому випадку більше сонячної енергії падає на поверхню Землі, унаслідок чого зростає T_{glob} (пропускає значну частину УФ (λ 320 нм – 200 нм)), а також у видимій і ІЧ-області – залежно від ступеня виснаженості.

Озоноруйнуючі речовини (ХФВ) викидають у атмосферу переважно в північній півкулі (Європа, Росія, Китай, Японія, США) і через один-два роки повністю переміщуються так, що їх кількість у повітрі вирівнюється. Оскільки процес викидів досить стабільний, спостереження дають надлишок T_{glob} в N-півкулі відносно S-півкулі. За період 1970–1998 рр. T_{glob} збільшилась на $0.6^{\circ}\text{C} - 0.8^{\circ}\text{C}$, а далі до 2012 р. – значною мірою стабілізувалась (рис. 4), хоч викиди в атмосферу CO_2 тривали й усі кліматичні моделі прогнозували зростання.

Отже, причина зростання T_{glob} (до 1998 р.) не у викидах в атмосферу CO_2 , а у підвищенні СА в цей період (віковий Modern Max) і виснаження озонного шару (рис. 4).

Оскільки в затяжному й глибокому мінімумі циклів 23/24 (2005–2010 р.) всі параметри Сонця досягли рекордно низьких значень за останніх 100 років, геліофізики очікували значного спаду T_{glob} . Однак прогнози кліматологів і геліофізиків не справдились. Поза увагою опинився один із найважливіших чинників впливу на зміну клімату – виснаження озонного шару з утворенням озонних дір.

Наукові дані підтверджують, що виснаження озонного шару триває і триватиме доти, доки рівень ХФВ в атмосфері не стане зменшуватись. Значне виснаження озонного шару стратосфери з утворенням озонних дір призвело до збільшення сонячної енергії, що досягла поверхні Землі в мінімумі циклів 23/24 і, таким чином T_{glob} збереглося (“компенсуючи” низький рівень СА) досить стабільною.

Якщо ж порівняти значення T_{glob} в мінімумах (рис. 4) 1986, 1996 і 2008 років, то очевидним є факт, що проблема потепління існує і в майбутньому залежить від СА та виснаження озонного шару. Згідно з Монреальським протоколом 1987 р. (із усіма додатками до нього, прийнятими на Міжнародних конференціях під егідою ООН і ЕООН про поступове припинення забруднення навколишнього середовища), прогнозується відновити стратосферний озон до “доіндустріального” рівня в 50-х роках ХХІ ст., а великі озонні діри над полярними регіонами – на 15 років пізніше. Забороняються викиди тих техногенних речовин, які спричиняють глобальне потепління.

6. ВИСНОВКИ

На тлі вікового Modern Max (підсиленої СА) у другій половині ХХ ст. в мінімумах останніх трьох циклів виявлено поступове зменшення полярного (полоїдального) магнітного поля Сонця удвічі, що спричинило появу мінімуму циклів 23/24 з рекордно низькими значеннями всіх сонячних параметрів за останні 100 років. Це також стало причиною появи вікового

мінімуму – декількох 11-річних циклів прогнозованої низької інтенсивності, починаючи з теперішнього циклу № 24 (рис. 1).

Руйнування озонного шару в другій половині ХХ ст., а не викиди CO_2 в атмосферу Землі, призвело до зростання T_{glob} до пікового значення у 1998 р.

Період стабілізації T_{glob} наприкінці ХХ – на початку ХХІ ст. пов'язаний із віткою спаду циклу № 23, мінімумом циклів 23/24 і стабільно низьким рівнем ЗВО в атмосфері Землі.

Виснаження озонного шару в атмосфері Землі виявилось одним з найважливіших чинників впливу на зміну клімату на нашій планеті. Значне виснаження озонного шару з утворенням озонних дір спричинило збільшення сонячної енергії, що досягла поверхні Землі, й таким чином зберегло (“компенсуючи” низький рівень СА) T_{glob} досить стабільною.

Порівняння значень T_{glob} (рис. 4) у мінімумах трьох останніх циклів (1986, 1996, 2008) свідчить, що проблема потепління існує і в майбутньому залежить від СА та рівня виснаження озонного шару.

Література

- [1] *Абдусахматов Х.И.* Кинематика и физика небесных тел. 2006. **22**, № 3. 183-186.
- [2] *Абдусахматов Х.И.* Кинематика и физика небесных тел. 2006. **23**, № 3. 141-147.
- [3] *Eddy I.A.* Science. 1976. **192**. 1189-1196.
- [4] *Eddy I.A.* Scientific American. 1977. **236**. 80-95.
- [5] *Friis E. Kristensen et al.* Science. 1991. **254**. 698-704.
- [6] *Цан Т.Т., Лаба И.С.* Изв. Крымской астрофиз. обс. 1973. **48**, № 73. 73-79.
- [7] *Solanski S.K. et al.* Adv. Space Res. 2002. **29**. 1933-1940.
- [8] *Livingston W. Penn M.* EOS. 2009. **90**, N 30. 257-258.
- [9] *Foukal P.V.* Scientific American. 1990. **262**. 34-39.
- [10] *Svensmark H.* Astronomy and Geophys. **48**, N 1. 1.18-1.24.
- [11] *Kirkby J. et al.* Nature. 2011. **476**. 429-436.
- [12] *Басманов Е.И.* Вестн. Харьков.ун-та. 1980. № 198. 68-70.
- [13] *Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л.* Сб. Гидрометиздат. 1992. 288 с.
- [14] *Феменберг Г.* Загрязнение природной среды. М.: Мир, 1997. 232 с.
- [15] *Rieder H.E. et al.* Atmos. Chem. Phys. 2010. **10**. 10021-10031.

- [16] *Kilifazska N.A.* J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 2012. **90-91**. 9-14.

**SOLAR ACTIVITY, ATMOSPHERIC OZONE
AND GLOBAL TEMPERATURE
IN THE MINIMUM OF THE 23/24 SOLAR CYCLES**

*Ivan LABA*¹, *Igor PIDSTRYHACH*¹, *Pavlo LISNYAK*²

¹ The Ivan Franko State University of L'viv,
8 Kyrylo and Mefodiy Str., L'viv 79005, Ukraine

² Ternopil Volodymyr Hnatyuk National Pedagogical University,
2 M. Kryvonis Str., Ternopil 46027, Ukraine

An important role of atmospheric ozone in Solar-Terrestrial relations was found according to the observations of the Sun ([//www.swpc.noaa.gov/SolarCycle](http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle)), data of the centers for Earth climate research in UK and monitoring of the total content of atmospheric ozone performed at Arosa observatory, Switzerland.

Both natural and anthropogenic climate changes are associated with ozone, as well as the climate dependence on the solar radiation. Significant depletion of the ozone layer observed in the last quarter of the XX-th and the beginning of the XXI-st century enhanced the greenhouse gas.

After the initial growth of the global temperature (T_{glob}) until 1998, it almost stabilized, including the period of the minimum of the 23/24 cycles. Significant depletion of the stratosphere ozone layer caused an increase of the solar energy that reaches the Earth surface in the minimum of the 23/24 solar cycles and, therefore, has preserved T_{glob} relatively unchanged, compensating for the low level of solar activity.