

СЛЪНЧЕВИТЕ ИЗРИГВАНИЯ И ПРИЗЕМНИТЕ ФОНОВИ КОНЦЕНТРАЦИИ НА АЗОТНИ ОКСИДИ

Борис Комитов, Петър Духлев и Момчил Дечев

Институт по астрономия с НАО "Рожен"-БАН

Увод

Азотните окиси NO_x (NO , NO_2) и производните им съединения спадат към т.нар. "малки компоненти" в земната атмосфера. Заради токсичното си действие техните концентрации са сред основните параметри, които са обект на екологичен мониторинг на въздуха. От друга страна азотните окиси играят важна роля в химическия баланс на стратосферата и средната атмосфера. Те са важни за процесите, свързани с запълването и възстановяването на озоновия слой. Увеличеното присъствие на азотни окиси и техните производни води до редуция на съдържанието на озон в стратосферата и мезосферата.

В ниската част на атмосферата е голяма ролята на антропогенните източници на азотните окиси – автомобилният и въздушният транспорт, металургичната и химическата индустрия, взривовите и др. Сериозен източник на азотни окиси през 50-те и началото на 60-те години са били и ядрените взривове в атмосферата.

Естествените източници на азотни окиси в ниската атмосфера са различни процеси на изветряне и изпарение, а така също и гръмотевичната активност.

Важен източник за образуването на азотни окиси в стратосферата и мезосферата са фактори пряко или косвено свързани със слънчевата активност. Към тях спадат слънчевата ултравиолетова и рентгенова радиация, а също така и вариациите на потока на частиците, идващи от далечния космос – т.нар. галактични космически лъчи (ГКЛ). Тези вариации представляват "огледален образ" а нивото на слънчевата активност, т.е. на висока слънчева активност съответства слаб поток на ГКЛ и обратно. Явлението се нарича "Форбуш – ефект". Под действие на слънчевата ултравиолетова и рентгенова радиация и ГКЛ в стратосферата и мезосферата първичните молекули N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 и др. се разпадат на свободни атоми, радикали и йони. В резултат на различни други реакции (неутрал-неутрални, йонно обменни и рекомбинации) в стратосферата и мезосферата възникват голям брой вторични (малки) газови компоненти, сред които и азотни окиси и техни производни.

Особено съществена и интересна е ролята на слънчевите изригвания. Много често мощните слънчеви изригвания (рентгенов клас M5 или по-висок) са съпроводени с отделяне не само на голямо количество рентгенова и ултравиолетова радиация, но също така и на слънчеви протони с висока енергия ($E \geq 10 \text{ MeV}$). Това са т.нар. "слънчеви енергетични частици" (СЕЧ). Тези явления се наричат "протонни ерупции". При най-мощните слънчеви протонни ерупции сумарната енергия на навлизащите в земната атмосфера частици е съпоставима със съответната енергия на ГКЛ, но в рамките цял един 11-годишен слънчев цикъл (Smart and Shea XXXX)[1].

Периодът 2003-2005 година се отличава с десетина на брой особено силни слънчеви изригвания, чийто мощностен бал беше X9 или по-голям. За такива събития се използва много често терминът "mega-flares", т.е. "свръхизригвания". Протонните ерупции по време на мегаизригванията са особено мощни. При тях се оказва много съществено нарастването на потока на частици с особено висока енергия ($E > 300 \text{ MeV}$), които са в състояние да достигат до земната повърхност. В резултата на това възниква

естествено покачване на приземния радиационен фон (GLE- Ground Level Enhancement). От 28 февруари 1942 г., когато е регистрирано първото подобно събитие, до края на месец май 2013 г. общия брой GLE- явления е 68. Закономерен е въпросът как подобни мощни слънчеви събития влияят върху физическите и химически процеси в ниската атмосфера на Земята?

За големите нараствания на концентрациите на азотни окиси, особено над полярните райони в стратосферата и мезосферата на Земята в продължение на няколко седмици след силни слънчеви изригвания, съпроводени с протонни ерупции в периода 2003-2005 година съобщават много автори (Rinsland et al. 2005, Seppala et al. 2007, Jackman et al. 2011) [2, 3, 4]. Увеличението след СЕЧ- ерупциите специално за NO₂ достига до няколко десетки пъти спрямо спедностатистическите съдържания на тази компонента в земната атмосфера (Jackman et al. 2011 [2]). В своята работа авторите са изследвали ефекта от двете силни слънчеви изригвания от 16 и 20 януари 2005г въз основа както на преки наблюдателни данни, така също и на числени модели. Увеличението на концентрациите на азотните окиси е съпроводено с разрушаване на озона в полярната стратосфера и мезосфера.

В цитираната работа (Jackman et al. 2011) [2] е показано също, че процесът на интензивно взаимодействие на СЕЧ-потока с атмосферата е обхванал областта над 20-25 км височина над земната повърхност, а максимумът на образуване на азотни окиси и по-специално на NO₂ е на около 70 км. Освен това е показано, че главна роля играят слънчевите протони в енергетичния интервал между 10 и 300 MeV. Ролята на протоните с енергия >300 MeV, т.е. тези които причиняват GLE- събитията е незначителна за образуването на азотни окиси.

Ефектът върху химическите процеси в стратосферата и средната атмосфера по време от силните слънчеви изригвания в края на м.октомври – началото на ноември 2003 г (т.нар. “Хелоуински бури”) също е изследван подробно, включително и по отношение на азотните окиси. Получени са резултати, аналогични с тези на Jackman et al. (2011) [2].

“Залповото” образуване на азотни окиси в средната атмосфера на Земята под въздействието на СЕЧ-радиацията по време на слънчеви протонни ерупции е в основата на един от индиректните методи за изследване на вариациите на слънчевата активност в миналото и по-специално на слънчевите изригвания. Идеята на метода се състои в това, че образуването под действието на слънчевите протони азотни окиси, както и техните преки продукти в резултат на гравитачно-дифузионни процеси достигат до повърхността на Земята. След това те се включват в различни естествени среди там. Специално що се отнася до районите със студен климат каквито са високите планини и полярните райони, включването може да стане в намиращите се там ледници. Слоистата структура на ледниците позволява календарна калибровка. Допълнително в някои случаи калибровката се тества и по следите от натрупване в леда на вещества, свързани с известни вулканични изригвания. По този начин натрупването на нитратни съединения в слоеве на различни дълбочини дава възможност да се разграничат пикове в техните концентрации, които се свързат с определени мощни слънчеви изригвания и съответни протонни ерупции.

Първите успешни изследвания в тази насока датират от края на 80-те и началото на 90-те години. До момента има анализи и резултати от няколко сондажни ледени проби в Антарктида и Гренландия (Palmer et al. 2001, Ogurtsov et al. 2004, Shea and Smarth 2004) [5,6,7]. Най- дългата изследвана редица обхваща период от около 400 години (1561-1950 г.) (Shea and Smarth 2004) [6]. За успешни изследвания на нитратни концентрации и връзката им със силни слънчеви изригвания и дългосрочните вариации на слънчевата активност по данни от сондаж във високопланински ледник в Западен Китай съобщават

Wang, Thompson, and Cole-Dai (2000) [8]. Типичното време на закъснение (т.нар. “резидентно време”) между залповото образуване на азотни окиси и др. азотни съединения в стратосферата и мезокферата и тяхното натрупване в континенталните ледници според усреднените оценки от различните изследователи е между един и няколко месеца. Максимумът на процеса се достига около три месеца след слънчевото изригване (Wang, Thompson, and Cole-Dai 2000, Palmer et al. 2001, Shea and Smarth 2004, Ogurtsov et al. 2004) [5-8].

В това изследване ние фокусираме нашето внимание върху един интересен аспект на връзката между слънчевите изригвания и образуването на азотни съединения в земната атмосфера. Той се отнася до отговор на следните въпроси:

1. Има ли статистически забележимо влияние на залповото образуване на азотни съединения в средната атмосфера свързано със слънчеви протонни ерупции и измерваните на земната повърхност данни за азотни окиси от станции за “фонове наблюдения”? Става въпрос за станции за екологичен мониторинг на въздуха, разпорожени в райони, които са достатъчно отдалечени от източници на антропогенно замърсяване.

2. В случай, че такава връзка съществува, какво е закъснението, т.е. “резидентното време”, за което тя се осъществява?

3. Как действат процесите на пренос на азотни окиси между средната атмосфера и земната повърхност? Каква част от достигащите до земната повърхност в пункта за наблюдение азотни окиси се формират в средната атмосфера и каква част са резултат от тяхното формиране над други райони от Земята? Имат се в предвид полярните области, където интензивността на тяхното образуване по време на слънчеви изригвания е най-голяма.

4. Дали статистическите връзки (ако такива бъдат намерени) са достатъчно силни за да могат да се използват за целите на прогнозата? С други думи – дали е възможно по информация за дадено протонно изригване да се направи прогноза за очаквано покачване на фоните концентрации, обект на измерване в изследвана приземна станция?

Отговорът на така поставените въпроси и особено на No 4 би бил много полезен в много случаи, свързани с интерпретация на данните за азотни окиси. Става въпрос за много от тези случаи, когато не може да се установи източник на конкретно антропогенно замърсяване. В този случай причината би могла да бъде от естествен (неантропогенен) характер. В това число влиза и възможността наблюдаваното покачване на измерените концентрации да бъде свързано със слънчево протонно събитие, станало например от един до няколко месеца преди това. За подобни случаи би могъл да се разработи алгоритъм за ранно предупреждение.

2. Данни и методи

2.1. Данните

За решаването на дефинираните в края на &1 бяха избрани за ползване среднодневните стойности на концентрациите на азотни окиси (NO , NO_2 и NO_x) от автоматичната станция за измерване на фоните съдържание на атмосферните замърсители, разположена в района на Националната астрономическа обсерватория “Рожен”.

Станцията се намира на връх Рожан в Средните Родопи, на надморска височина приблизително 1760 метра. В близките 60-70 км около нея няма никакви значителни източници на индустриално замърсяване. По-близко разположените населени места са сравнително малки и са поне на 400-500 метра по-малка височина. Основните стопански дейности в тях са свързани с туризма, търговията и дърводобива, т.е. не са значителни източници на атмосферно замърсяване.

Станцията за наблюдение на фоновите концентрации на атмосферните замърсители е в действие от лятото на 2004 г. През първите 3 месеца обаче тя е била очевидно в процес на настройване. Има твърде много прекъсвания и голяма част от регистрираните стойности са недостоверни. Приблизително около средата на октомври качеството на регистрацията съществено се подобрява и всички данни след 15 октомври 2004 г. могат да се считат за достоверни. В тях обаче има големи прекъсвания, чиято продължителност понякога достига до 18-20, а в един случай дори над 150 дни. Това се отнася за периода между 15 октомври 2004 г. и 1 септември 2009 г. Общата дължина на всички "прозорци" с липсващи данни възлиза на 302 дни - Това съответства на 16% от целия посочен времеви интервал. Тази част от данните може да се използва за качествен и полуколичествен анализ. Пълноценният количествен анализ на тази част от данните обаче е значително затруднен. Това особено силно важи за анализ на временните редове както и за изследване на отместени във времето връзки (крос-корелационен анализ).

От началото на месец септември 2009 г. и до края на 2012 г. "прозорците" с липсващи данни са много по-малко на брой и много по-кратки. Обикновено те са само в изолирани единични дни и има само 3 случая когато няма данни в продължение съответно по веднъж от 3, 4 и 5 дни. Общият брой на дните без данни за периода 1 септември 2009 г. - 31 декември 2012 г. е 31, което представлява само 2.55% от всичките 1216 дни за посочения интервал. Много по-малкият относителен дял на липсващите данни прави възможно и целесъобразно ползването на интерполационна процедура. Чрез нея редиците от среднодневни стойности на концентрациите на азотните окиси ($[NO]$, $[NO_2]$ и $[NO_x]$) се превръщат във временни редове с постоянна стъпка (1 денонощие), които вече могат да бъдат обект на пълноценен статистически анализ – от изследване на временните редове за трендове и цикли, до търсене на връзки със слънчеви, геофизични и метеорологични фактори, включително и крос-корелация.

Месец септември 2009 година приблизително съвпада с началото на активната фаза, т.е. първоначалното нарастване на настоящия 11-годишен петнообразователен цикъл на Швабе-Волф под номер 24 в Цюрихския ред (SC 24). От друга страна околномаксимумната фаза на същия, определена по 13-месечни изгладени стойности на международното число на Волф е през януари 2012 г. По този начин пълноценният количествен анализ на тази по-пълна част от данните може да даде информация за връзката между азотните окиси и слънчевата активност за целия възходящ клон на SC 24.

Данните за потока на слънчевите протони с висока енергия ($E \geq 10$ MeV; SEU), измервани от спътниците GOES, за периода след 1994 г. могат да бъдат намерени в архива на Центъра за прогнози на космическото време в Боулдър (Колорадо, САЩ) (<http://www.swpc.noaa.gov/Data/index.html#indices>). Те са по данни на геостационарните спътници GOES-11 и GOES-13. Стойностите на сумарните дневни потоци са дадени за два енергийни диапазона ($E \geq 10$ MeV и $E \geq 100$ MeV). Тъй като потоците на SEU се качват с до няколко порядъка по време на слънчевите протонни ерупции, ние използваме на всички етапи в това изследване не самите тях, а техните десетични логаритми.

2.2. T-R периодограмен анализ

В настоящата работа за разкриването на цикли се използва процедура, която за пръв път тя е описана накратко и приложена от автора в средата на 80-те години (Комитов 1986) [9]. За нея е възприето названието "T-R периодограмен анализ" (Комитов 1997) [10]. Тя включва следните работни етапи:

1. Изследваният временен ред се апроксимира по метода на най-малките квадрати (МНК) със серия от прости периодични функции от вида

$$f(t) = A_0 + A \cos(2\pi t/T) + B \sin(2\pi t/T) \quad (1)$$

където: A_0 е средната стойност на членовете на временния ред. Коефициентите A и B за всяка една от минимизиращите функции (при фиксиран период T) се получават от решаването на системата алгебрични уравнения:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (y_i - A_0) \cos \frac{2\pi(i-1)}{T} &= A \sum_{i=1}^N \cos^2 \frac{2\pi(i-1)}{T} + B \sum_{i=1}^N \sin \frac{2\pi(i-1)}{T} \cos \frac{2\pi(i-1)}{T} \\ \sum_{i=1}^N (y_i - A_0) \sin \frac{2\pi(i-1)}{T} &= A \sum_{i=1}^N \cos \frac{2\pi(i-1)}{T} \sin \frac{2\pi(i-1)}{T} + B \sum_{i=1}^N \sin^2 \frac{2\pi(i-1)}{T} \end{aligned} \quad (2)$$

В случая е положено, че $y_i = f(t)$; $t = i - 1 = 0, 1, 2, 3, \dots$

Периодът T варира от избрана начална до някаква максимална стойност със стъпка ΔT . Пределната минимална стойност на T е $T_0 = 2$. Тъй като се разглежда временен ред с равноотстоящи по време стойности, то е твърде удобно да се използва за единица време интервалът между две съседни стойности /напр. Денонощие, ако данните представляват средноденонощни стойности на изследваната величина/. От своя страна ΔT може да приема както целочислени, така и дробни стойности, изразени във възприетата единица за време (стъпка на временния ред).

За всяка една от намерените прости периодични функции се изчислява коефициентът на линейна корелация R между нея и временния ред, и грешката на същия

$$R / SR = \frac{1 - R^2}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

където N е дължината на временния ред. Получената последователност от стойности на $R(T)$ (T-R корелограма) има локални максимуми, около тези стойности на периода T , които съответствуват на потенциалните цикли, присъстващи в изследвания временен ред. Амплитудата (мощността) на цикъла може да се изчисли по формулата:

$$a = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (4)$$

2. Проверява се за статистическата достоверност на намерените цикли. За целта се използват два критерия. Според първия от тях /сигма-тест/ коефициентът на корелация трябва да отговаря на условието $R/SR > 1.96$. Твърде често обаче в редиците от псевдослучайни числа, възникват слаби цикли, удовлетворяващи този критерий, които при това много добре личат след прилагането на процедура на пълзящо усредняване. Вторият, по - твърд критерий е установен емпирично, на базата на анализа на повече от 20 000 редици от псевдослучайни числа. В съответствие с него, ако коефициентът на корелация отговаря на условието

$$R/SR \geq 4,54/N^2 + 3.46 \quad (5)$$

то установената околоредна стойност на R е нетипична за редиците от случайни числа. В този случай цикълът не е възникнал случайно, а е реален и причинно обусловен. Ако локалният максимум на R попада между праговите граници на двата критерия, то въпросът за това дали намереният слаб цикъл е реален или не, следва да се решава по преценка на изследователя на базата на допълнителна информация.

Получените с помощта на Т-Р периодограмния анализ резултати могат да се използват за построяване на модели на временни редове. Същите могат да бъдат екстраполирани извън времеви интервал, в който са получени с цел прогноза.

2.3. Крос-корелационен анализ

Изследването на отместени във времето връзки от типа “фактор (предиктор)-предиктант” в нашия случай е наложително. Причината за това е голямото закъснение (“резидентно време” от един до няколко месеца) на достигащите до повърхността “залпови” нараствания на азотните окиси и техните съединения спрямо предизвикващите ги слънчеви протонни ерупции и съответно сумарните дневни потоци на СЕЧ.

В нашия анализ е изследвано изменението на коефициента на линейна корелация R_c между сумарните дневни потоци на СЕЧ и приземните концентрации на азотни окиси ($[NO]$, $[NO_2]$ и $[NO_x]$) в района на станцията за фонове измервания “Рожен” за отместена връзка в интервала между 0 и 500 дни. Всяка една от получените стойности на R_c е получена при стъпка на отместване от 1 ден. По този начин за връзката между СЕЧ и всяка една от концентрациите на трите изследвани азотно-окисни компоненти е получен набор от по 501 стойности на R_c . Коефициентът на достоверност на R_c се проверява с помощта на “сигма-теста”, т.е. отношението между R_c и неговата грешка SR_c , изчислена по формулата (3).

Методите, описани в &2.2 и 2.3 са използвани за анализ на късната част от редиците данни, т.е. между 1 септември 2009 г. и 31 декември 2012 г.

3. Резултати и анализ

3.1 Слънчевите енергетични частици (СЕЧ) и приземните фонове концентрации на азотни окиси за периода 2004-2012 г.

На фиг.1 , 2 и 3 (горните панели на фигурите) са показани среднодневните стойности на концентрациите (тегловните съдържания в единици $\mu\text{g}/\text{m}^3$) на NO , NO_2 и NO_x (респективно $[NO]$, $[NO_2]$ и $[NO_x]$). Средните панели на графиките представят в

логаритмичен мащаб сумарните денонощни потоци на слънчевите протони с енергия ≥ 100 MeV на геостационарна орбита, а долните панели – на тези с енергия ≥ 10 MeV. В долния панел с линия и обозначение “S1” е посочено праговото ниво, над което се счита, че СЕЧ-потокът вече е достигнал параметрите на радиационна буря. Подобни високи нива на слънчева протонна радиация се считат за потенциално опасни за техниката, навिरеща се в околоземна орбита, както и за тази в самолетите, летящи във високата тропосфера и ниската стратосфера. С червени кръгчета са показани и моментите на GLE-явленията (покачванията на естествения радиационен фон).

От фиг.1-3 се вижда, че СЕЧ-потоките и в двата избрани енергетични диапазона (над 10 и над 100 MeV) може да се раздели на две части:

1. Спокойна компонента- характеризира се с ниски стойности и с много бавно и плавно покачване от началото (октомври 2004 г.) приблизително до м. септември 2008 г. След това тенденцията се обръща към плавно и постепенно намаляване до края на изследвания период (декември 2012 г.). Видът на графиката на тази компонента наподобява фон, който обаче се мени в антикорелация с нивото на слънчевата активност през този период: Около края на 2008 г. приключва предишният 11-годишен слънчев цикъл под номер 23 (SC 23), а както казахме, началото на активната фаза на SC 24 започна в края на лятото на 2009 г. Това дава основание да считаме, че тази “спокойна” компонента не е просто приборен шум, а съдържа и значителен принос от ГКЛ (галактичните космически лъчи). Обратната връзка със слънчевата активност е просто проява на характерния за ГКЛ “Форбуш ефект” .

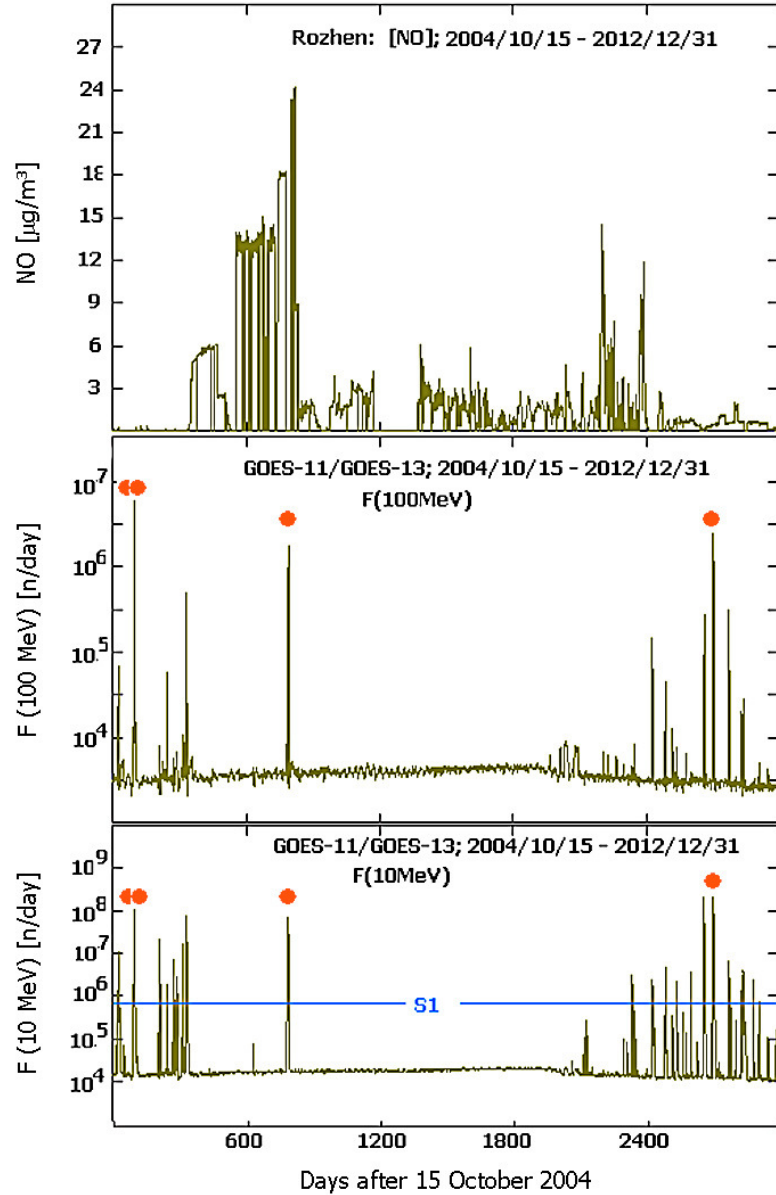
2. Кратки по-силни или по-слаби пикове, при които стойността на потоците на СЕЧ се променя до няколко порядъка. Тези скокове в потока са свързани със слънчевите протонни ерупции. Всъщност това са явленията, които причиняват залповите покачвания на азотните окиси в стратосферата и мезосферата. Виждат се два периода на протонни изригвания – единият между 2004 и 2006 г, който е много по-мошен и много добре изразен, и вторият, който съответства на началото на активната фаза на новият 24-ти цикъл – т.е. от септември 2009 г.

Най-мощните слънчеви протонни събития през ранния период са свързани с изригванията от 16 и 20 януари 2005 г., 14 май 2005 г. и 11 септември 2005 г.. Специално трябва да се отбележат и двете много мощни изригвания на 7 и 13 декември 2006 г. През периода 15 октомври 2004 г. - 31 декември 2006 г. има общо 3 на брой GLE –събития. Те са съответно на 16 и 20 януари 2005 г. и на 13 декември 2006 г.

Вторият период на протонни изригвания, свързан с възходящата фаза на 24-ти слънчев цикъл се характеризира с повече на брой, но по- слаби протонни изригвания. Двете най-мощни измежду тях съвпадат по време с петнообразувателния максимум на слънчевия цикъл. Те са съответно на 23 януари и 7 март 2012 г. По време на второто събитие е наблюдавано и покачване на естествения радиационен фон (GLE).

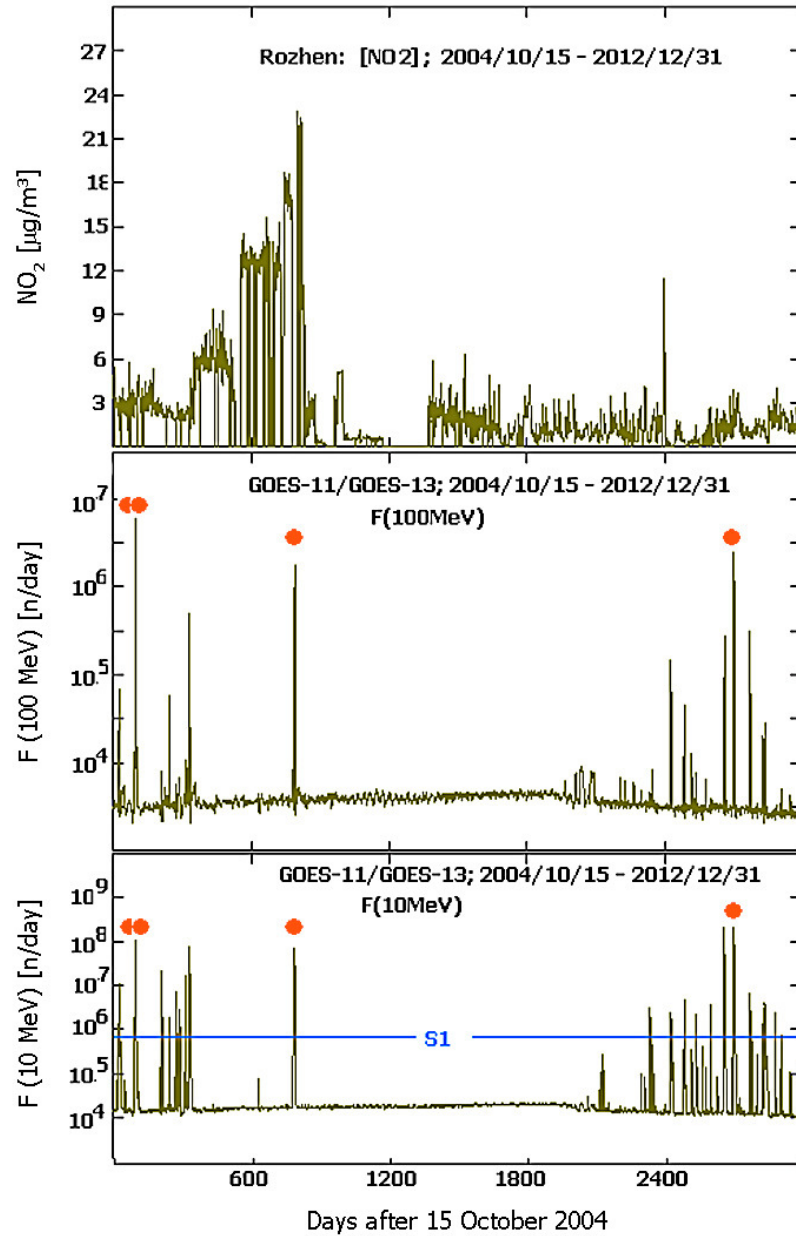
Нека сега да разгледаме вариациите на концентрациите на азотните окиси, както и това как те се съотнасят по време към данните за СЕЧ-потоките. В най-горните панели и на трите фигури (1-3) се вижда период на много високи концентрации на измерваните газови компоненти. Той започва приблизително в началото на октомври 2005 г. (~350-ти ден от началото на изследвания период, т.е. 15 октомври 2004 г.). Абсолютният максимум на концентрациите е в средата на месец януари 2007 г. (820-ти ден). След това стойностите им много бързо падат в началото на 2007 г. Има обаче едно по-слабо изразено, но все пак отчетливо покачване през юли същата година. Това нарастване е най-добре изразено при $[\text{NO}_2]$, значително по-слабо, но също видимо е при $[\text{NO}_x]$, а отсъства при $[\text{NO}]$. След лятото на 2007 г. концентрациите на азотните окиси падат в предела на $1\text{-}2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Тези стойности впоследствие леко се повишават, но остават много ниски в сравнение с периода октомври 2005 г. - януари 2007 г. Тук разбира се, трябва да се вземе предвид и отсъствието на данни в продължение на около половин година в

края на 2007 г. и първите месеци на 2008 г. Това налага да приемем извода за ниски концентрации с известни резерви в предела над 150 дни.



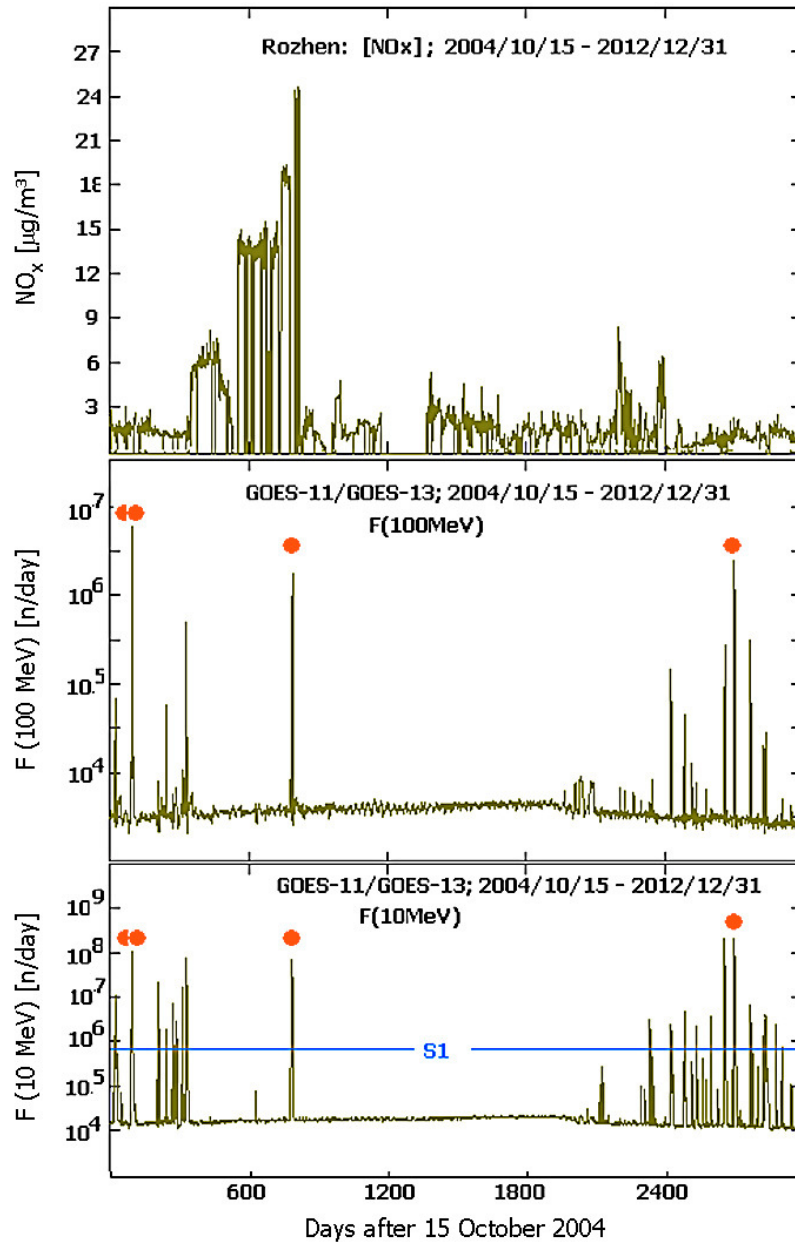
Фиг.1. Среднодневни стойности на концентрациите на азотния окис [NO] и сумарните дневни потоци на слънчевите протони с висока енергия на геостационарна орбита за $E \geq 100\text{MeV}$ (средния панел) и съответно $E \geq 10\text{MeV}$ (долния панел).

Ситуацията се променя **изведнџ** около ден 2200, т.е. в края на октомври 2010 г. Тогава възниква кратко внезапно покачване на [NO] и [NOx] с продължителност от около 20 дни, последвано от друго подобно събитие, приблизително 7 месеца по-късно. При данните за [NO₂] добре изразен е само вторият пик, а първият не се вижда.



Фиг.2. Среднодневни стойности на концентрациите на азотния диоксид [NO₂] и сумарните дневни потоци на слънчевите протони с висока енергия на геостационарна орбита за $E \geq 100$ MeV (средния панел) и съответно $E \geq 10$ MeV (долния панел).

Не се забелязват никакви следи от наличие на годишен (сезонен) цикъл в изменението на [NO], [NO₂] и [NO_x] за ранната част от извадката до септември 2009 г. Това показва визуалният оглед на графиките на тези величини. Както вече бе отбелязано, поради многото "прозорци" с липсващи данни не е възможен пълноценен количествен анализ на тази част от извадката.



Фиг.3. Среднодневни стойности на концентрациите на азотния окиси [NO_x] и сумарните дневни потоци на слънчевите протони с висока енергия на геостационарна орбита за $E \geq 100$ MeV (средния панел) и $E \geq 10$ MeV (долния панел).

От сравняването на двата вида данни (слънчевите протони и концентрациите на азотните окиси) се вижда, че: 1. Има съответствие между двата вида величини - високите измерени стойности на NO], [NO_2] и [NO_x] попадат в период на силни протонни изригвания; 2. Основната връзка е силно отместена по време – концентрациите на азотните окиси закъсняват по време спрямо пиковете на СЕЧ- потоците с по 7-10 месеца; 3. Има и втора по- изразена тенденция на закъснение на концентрациите на азотните окиси спрямо СЕЧ- ерупциите от около един месец; 4. Периодът на ниски стойности на концентрациите на азотни окиси между 2007 г. и 2009 г. съвпада с дълбокия минимум на слънчевата активност между слънчевите цикли с номера 23 и 24 (SC 23 и SC 24).

3.2 Слънчевите протонни изригвания и концентрациите на азотни окиси през възходящата фаза на SC 24 (2009-2012 г.)

Както вече бе посочено, късната част от данните за азотните окиси, започваща от 1 септември 2009 г. се характеризира с много малък процент дни без наблюдения. Същите са попълнени с интерполирани стойности. По този начин попълнената редица позволява пълноценен количествен анализ с помощта на различни статистически методи.

Първият въпрос, който трябваше да се изясни беше: Има ли някакви статистически изявени цикли в тези редици (по една за NO , NO_2 и NO_x)? Особено полезно беше да се провери дали има статистически достоверни годишни, т.е. сезонни цикли в тези редици. Ако този въпрос по отношение на ранните части от редиците (преди септември 2009 г.) беше решен на базата на визуален оглед на графиките, то за късните части е възможно да се приложи количествен метод – T-R периодограмният анализ.

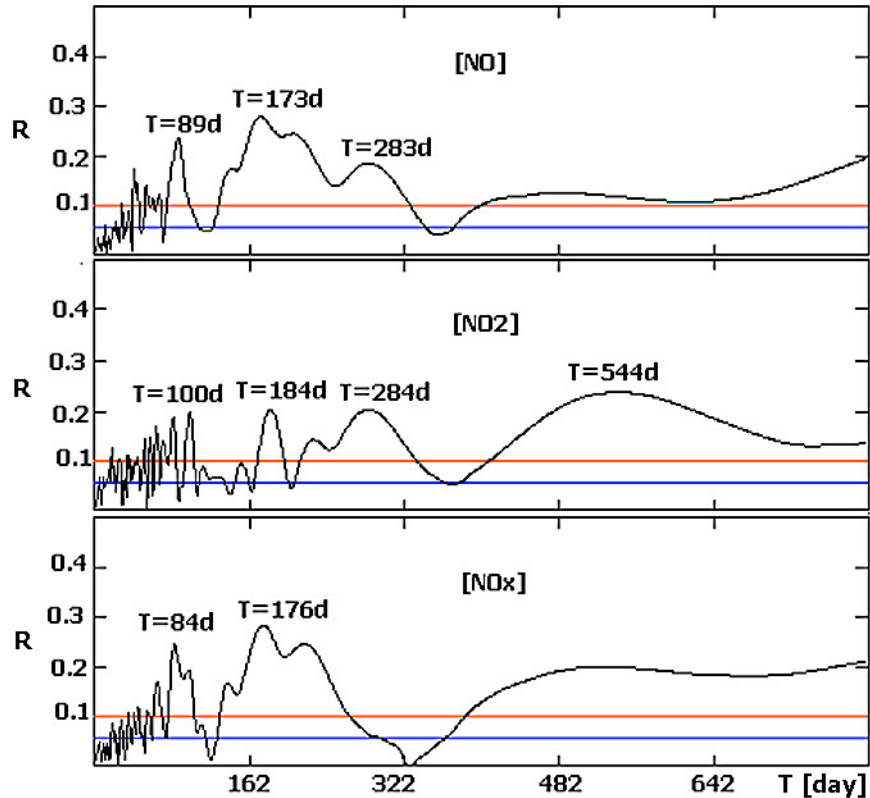
Процедурата беше изпълнена и за трите редици данни за концентрациите на азотните окиси при следните параметри: начален период на сканиране $T_0=2$ дни, стъпка на сканиране (т.е. стъпка на нарастване на периода) $\Delta T=1$ ден. Броят на стъпките на сканиране е 800. По този начин T-R корелограмите включват информация за 800 периодични функции, получени по МНМК с периоди между 2 и 800 дни.

Резултатите са показани на фиг.4 В най-горния панел е корелограмата на редицата на данните за NO , в средния панел е показана корелограмата за NO_2 , а в най-долния панел е тази за NO_x .

На нито една от тези T-R корелограми не се вижда квази-годишен цикъл, т.е. статистически достоверен цикъл с период $T \sim 360-370$ дни. Това потвърждава, че изводът за липса на годишен цикъл за извадките до 2009 година е валиден и за периода 2009-2012 г. На фиг. 4 обаче се вижда, че и в трите редици (за NO , NO_2 и NO_x) присъства достоверен полугодишен цикъл (около 180 дни), а в редиците на NO и NO_2 се наблюдават и достоверни вариации с продължителност около 9-10 месеца, т.е. 270-290 дни. От корелограмата в средния панел се вижда, че специално в редицата на NO_2 има и силно изявен цикъл от около 540 дни, т.е. резонансно кратен на 9-месечния.

Би могло да се предположи, че всъщност наблюдаваният квази-6 месечен цикъл в концентрациите на азотните окиси е , може би, вид проява на годишен цикъл. Това би могло да се случи ако поради някакви причини има два периода в годината , които да благоприятстват екстремално високите или ниски стойности на NO , NO_2 и NO_x -например пролет и есен или лято и зима. Другото възможно обяснение би било, че има някакъв друг природен фактор, за който през изследвания период е действал 6-месечен цикъл.

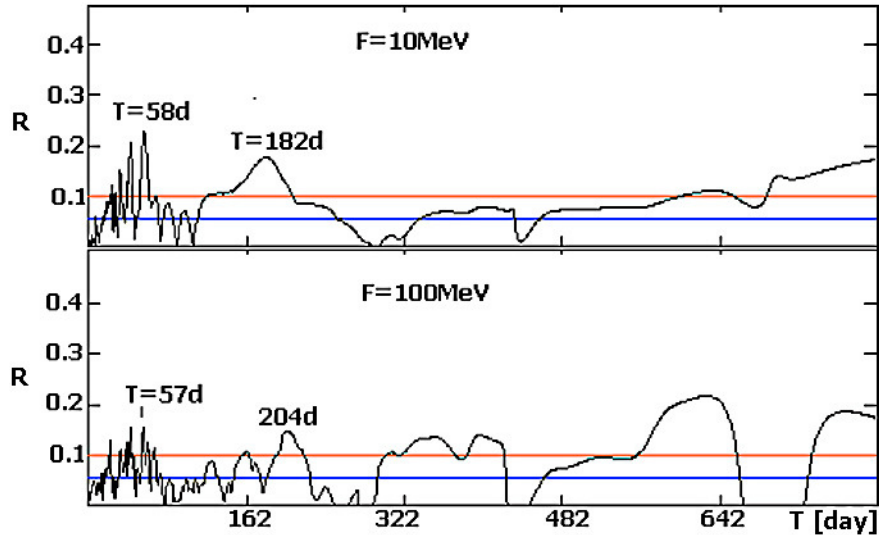
В предвид целта на настоящия проект с помощта на T-R периодограмния анализ бяха изследвани и двете редици на потоците слънчеви протони с висока енергия – тези с енергия над 10 и над 100 MeV, обозначени тук съответно като F10 MeV и F100 MeV. Както и при концентрациите на азотните окиси бяха търсени статистически достоверни цикли в диапазона между 2 и 802 дни. Резултатите са показани на фиг.5.



Фиг4. T-R корелограми на временните редове на $[NO]$, $[NO_2]$ и $[NO_x]$ за периода 1 септември 2009-31 декември 2012 г.

Най-важният резултат в случая е, че в данните за СЕЧ-потоците се наблюдава цикъл с продължителност около 180-200 дни ($T=182$ дни за F10 MeV и $T=204$ дни за F100 MeV). От гледна точка на спецификата на T-R периодogramният анализ като метод с по-голяма тежест е резултата за F10 MeV, тъй като поведението на потока на тези “по-нискоенергетични” частици е относително по-регулярно и следователно, по-добре би могло да се опише с просто-периодична функция. От своя страна изменението на F100 MeV е “по-накъсано” във времето. Наличието на полугодишен цикъл в данните за СЕЧ-потоците дава сериозно основание да се смята, че е твърде възможно именно на него, а не на сезонните метеорологични промени да се дължи цикълът с подобна дължина при концентрациите на азотните окиси в рамките на изследвания период септември 2009-декември 2012 г. Произходът на квази 180-дневният цикъл в данните за СЕЧ-потоците не е много ясен. По наше мнение е твърде възможно той да е причинен от повторимост с подобна продължителност в честотите и мощността на слънчевите изригвания през възходящата фаза на 24-тия слънчев цикъл.

От друга страна, наличието на квази 180-дневен цикъл и в двата вида данни е косвено доказателство, че между концентрациите на азотните окиси от една страна и нивата на СЕЧ-потоците от друга би могла да съществува статистически значима крос-корелационна връзка. Какви са характерните фазови отмествания и колко силни са въпросните корелационни връзки може да се разбере с помощта на крос-корелационен анализ.



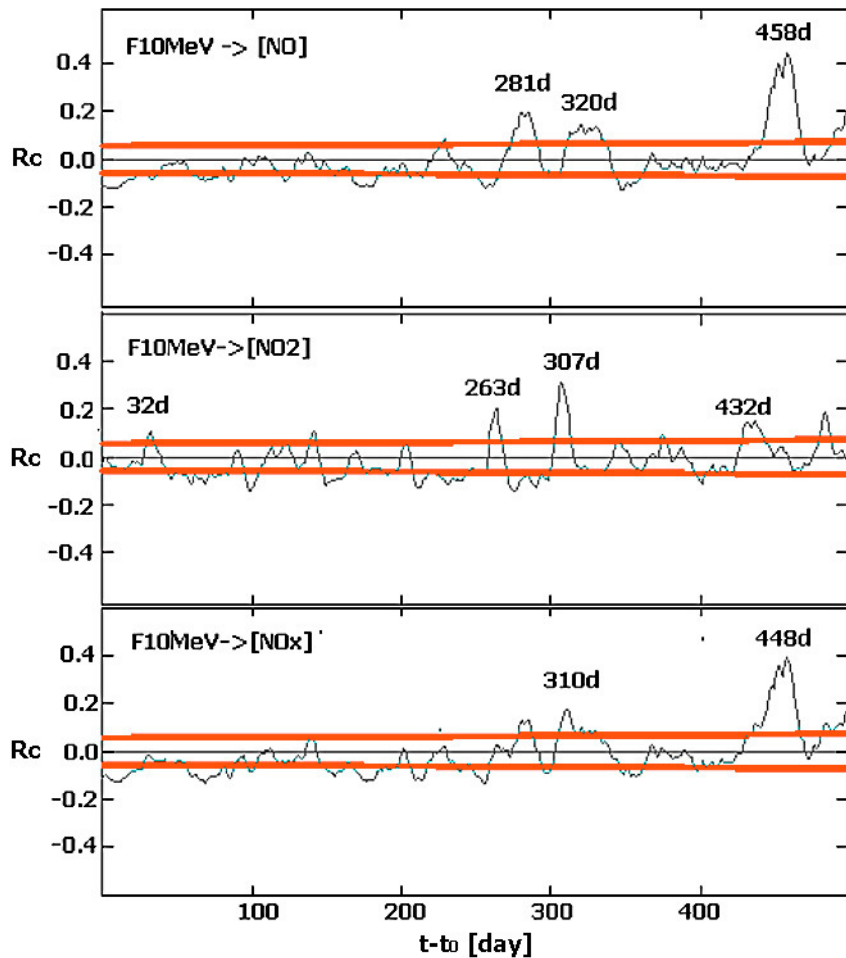
Фиг.5. T-R корелограми на временните редове на *думарните* дневни потоци на слънчевите протони с висока енергия на геостационарна орбита $E \geq 10$ MeV (горния панел) и $E \geq 10$ MeV (долния панел), за периода 1 септември 2009-31 декември 2012 г.

В T-R корелограмите и на двете редици F10 MeV и F100 MeV се наблюдава 57-58 дневен цикъл. Появата на такова колебание не е изненадващо. Удвоеният 27 дневен цикъл на Бартелс е типична особеност в поведението на повечето слънчеви и геофизични индекси по време на възходящите фази на слънчевите 11-годишни цикли.

3.3 Резултати от крос- корелационния анализ:

Резултатите от крос-корелационния анализ са показани на фиг. 6 и 7. Първата от тях е комбинирана графика, представяща фазово-отместените връзки между редиците на всяка една от измерваните газове компоненти (NO), $[\text{NO}_2]$ и $[\text{NO}_x]$ и F10MeV. По абсцисната ос е фазовото отместване между двете величини в дни. Стойностите на СЕЧ-потока изпреварват тези на концентрациите на азотните окиси. По ординатната ос са представени съответните стойности на коефициентите на корелация R_c . Областите на трите панела, ограждащи в червени линии хоризонтаните оси, съответстващи на $R_c=0$ представят праговете критични стойности на R_c . Те показват дали съответният коефициент на корелация е над или под прага на статистическа достоверност от над 95% ($R_c/SR_c < 1.96$). Зоните между двете червени граници и в трите панела съответстват на ниски по абсолютна стойност и статистически недостоверни коефициенти на корелация R_c .

От фиг.6 се вижда, че статистически достоверни, при това положителни пикове на R_c има при отместване t - to от около 260-280 дни (~ 8-9 месеца), 305-320 дни (10- месеца) и 430-460 дни (~15 месеца). Специално при $[\text{NO}_2]$ се откроява слаб пик при отместване t - $to = 32$ дни.

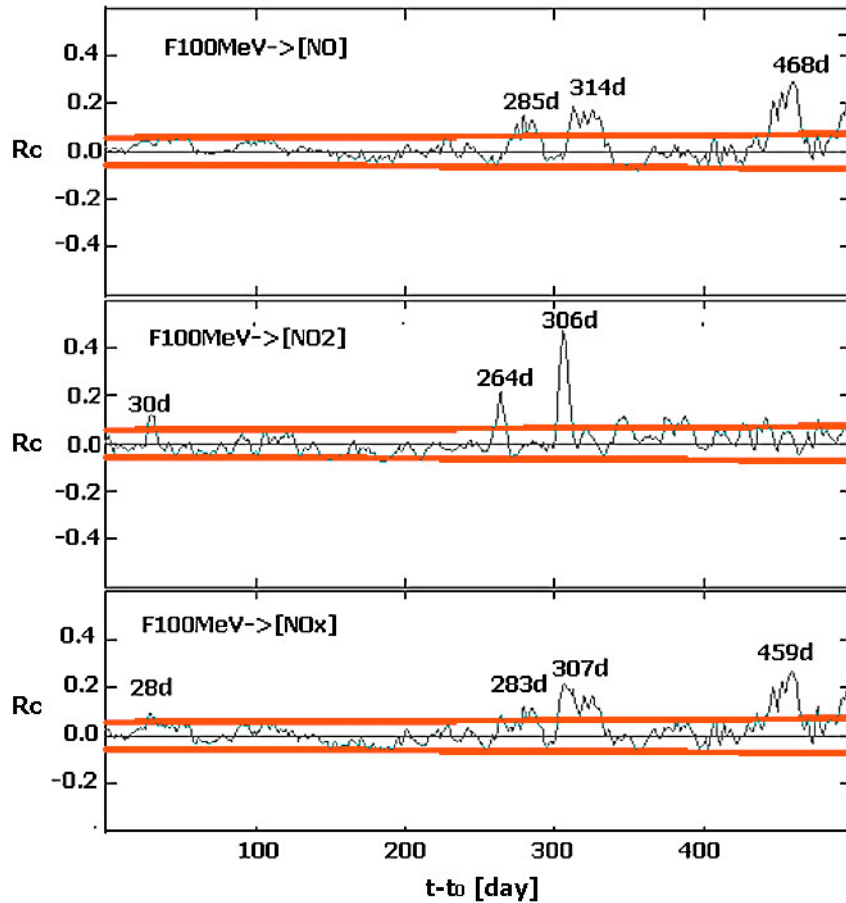


Фиг.6 Коэффициенти на крос-корелация R_c между $F10\text{ MeV}$ и концентрациите на азотни окиси $[NO]$, $[NO_2]$ и $[NOx]$.

На фиг. 7 са представени резултатите от крос-корелационния анализ, свързани с $F100\text{ MeV}$. И тук има ясно изразени пикове на R_c при фазово отместване $t-to=9, 10$ и 15 месеца при редиците на $[NO]$ и $[NOx]$. При $[NO_2]$ отново се наблюдава пик при фазово отместване от около месец ($t-to=30$ дни; средният панел). Подобен пик при отместване от 28 дни е видим и за $[NOx]$.

Много интересна особеност има при крос-корелограмата за $[NO_2]$. При поголемите фазови отмествания (над един месец) има само два, пика, от които единият е много силен. Той съответства на $t-to=306$ дни (~ 10 месеца). Коэффициентът на корелация е $R_c=0.48$. Той надхвърля грешката си 18 пъти, т.е. неговата досотверност е практически 1. Вторият пик е при фазово отместване от 263 дни. Нарастването на коэффициента на корелация от ниски стойности до висок пик и последвалия спад се проявява в интервал от фазово отместване в рамките само на 2-3 седмици. Това е индикация, че става въпрос за залпово покачване на $[NO_2]$, чиято основна фаза настъпва около 9-10 месеца след предполагаемия причинител – слънчево протонно изригване. Наличието на два или повече пика в коэффициента на корелация най-вероятно се дължат на това, че измерваните стойности на концентрациите се формират от дадено протонно изригване на различни височини в атмосферата, а вероятно и в различни географски зони на Земята. Посредством процесите на пренос (дифузия, конвекция и ветрове) те достигат до

наблюдателния пункт в различни моменти време след формиането им. Това води до възникване на повече от един пик на R_c .



Фиг.7 Коефициенти на крос-корелация R_c между $F100\text{ MeV}$ и концентрациите на азотни окиси $[NO]$, $[NO_2]$ и $[NO_x]$.

Получените резултати са в много добро съответствие с направения в &3.1 извод относно фазовото закъснение на връзката между концентрациите на азотните окиси и слънчевите протонни изригвания за по-ранния период на наблюденията между 2004 и 2009 г.

3. Дискусия

Както вече бе посочено в уводната част, в по-високите широчинни зони на Земята и особено тези около двата полярни овала (авроралните зони) “залповата” продукция на азотни окиси под действието на слънчеви протонни изригвания е много по-ефективна, отколкото на по-ниски ширини. Макар, че използваме определението “залпово” тези явления далеч не са много кратки като събития. Те обикновено продължават с дни, понякога дори седмица и повече. Това се дължи до голяма степен и на факта, че протонните изригване много често не са единични събития, а са в последователност от 2–3 и дори повече такива в продължение на дни, понякога и на седмици. Това става в случай, че източникът им е някой голям и развит активен център на Слънцето. От представените в изследването на Jackman et al. [2] резултати за двете мощни изригвания

на 16 и 20 януари 2005 г. се вижда, че покачванията на потоците на СЕЧ на геостационарна орбита и съответно йонизационните процеси силно са се застъпили. По такъв начин те са продължили общо около цяла седмица между 16 и 23 януари. Следователно, ефектът от подобни събития независимо от процесите свързани с химически реакции и пренос в атмосферата на Земята не винаги затихва бързо. Това е много силно валидно особено за образуването на азотните съединения в средната атмосфера.

Имайки предвид всичко това и изхождайки и от нашите получени резултати, ние считаме за много вероятно измерваните пикове във фоновите концентрации в станцията на НАО "Рожен да се дължат главно на залпово образуване на азотни окиси в резултат на слънчеви протонни ерупции. Източникът (или източниците) на тези събития обаче са много отдалечени от наблюдателния пункт. Вероятно това е високоширочинния пояс на Северното полукълбо (около и над 50 градуса северна магнитна ширина). Поради отместването в ориентацията (11 градуса) на магнитната спрямо ротационната ос на Земята въпросната област от средната атмосфера е разположена основно над Северна Америка, северната част на Атлантическия океан и по-голямата част от Северния ледовит океан. Преносът на формираните "залпови излишъци" от азотни съединения от високите към ниски ширини е бавен. Доколко даден залпов процес на образуване на азотни окиси ще даде отражение на измерените стойности в станцията на Рожен при всички случаи ще зависи не само от мощността и продължителността на "залпа" на високи ширини. Значение имат също и конкретните условия на атмосферната циркулация, които са силно сезонно обусловени. Това би могло да обясни защо например някои от пиковете на измерените концентрации са много по-слабо изразени, въпреки че са свързани с мощни протонни изригвания. Анализът показва, че такива са например случаите с пикове на азотните окиси, които са свързани с изригвания станали през топлата част от годината, когато меридионалният пренос север-юг е отслабен.

Малка част от азотните окиси по всяка вероятност се образуват и на средни ширини под действието на слънчевите протонни изригвания. За тях би могло да се приеме, че те имат доста по-къс път за да достигнат до повърхността, т.е. фазовото отместване по време е по-малко. Възможно е слабият пик в R_c който се получава при отместване на около 30 дни в някои от изследваните редици да се дължи именно на поодобен слаб ("местен") източник. Това е областта от средната атмосфера непосредствено над района над станцията или над относително близки съседни райони.

5. Изводи

Получените в хода на това изследване резултати показват, че има много голяма вероятност наблюдаваните значителни пикове в концентрациите на азотните окиси в станцията за екомониторинг на въздуха в района на НАО "Рожен" да са резултат от залпов ефект на образуването им в средната атмосфера в интервала от един месец до около една година преди това. От друга страна обаче трябва да се има предвид, че независимо от привидно голямата продължителност на провежданите наблюдения - вече около 8 години - все още се чувства сериозен дефицит на информация. От една страна това е поради големите прекъсвания в наблюденията. Това обстоятелство важи особено през първите няколко години от функционирането на станцията. От друга страна, поради дълбокия минимум между слънчевите цикли с номера 23 и 24 от началото на 2007 г. до есента на 2009 г. няма практически никакви активни явления на Слънцето, включително и протонни ерупции.

За да се стигне до окончателен и категоричен отговор на въпроса влияят ли слънчевите протонни изригвания върху фоновите концентрации на азотните окиси и докава степен е тяхното влияние, е необходимо да се проведе анализ върху значително

по-голяма съвкупност от данни. Във връзка с това е необходимо да се продължи изпълнението на задачите, свързани с този проект поне още няколко години, до края на настоящия 24-ти слънчев цикъл през 2018-2019 г. Продължението на проекта могло да основа за организиране на дейност по предварително предизвестяване на възможните периоди на повишени фоновы концентрации. Последното би помогнало много на дейностите, свързани с мониторинга на въздуха осъществявана от регионалните инспекции по околната среда в страната, както и на Националната агенция за околна среда.

ЛИТЕРАТУРА

- Jackman, C. H., Marsh, D. R., Vitt, F. M., Roble, R. G., Randall, C. E., Bernath, P. F., Funke, B., Lopez-Puertas, M., Versick, S., Stiller, G. P., Tylka, A. J., and Fleming, E. L., 2011, Northern Hemisphere atmospheric influence of the solar proton events and ground level enhancement in January 2005, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 6153–6166, www.atmos-chem-phys.net/11/6153/2011/doi:10.5194/acp-11-6153-2011
- Komitov B., 1997, The Schove's series. Centural and Supercentural variations of the solar activity. Relationships between adjacent 11-year cycles, *Bulg. Geoph. J.*, **23**, 74 –82.
- Ogurtrsov M., Jingner H., Kocharov G., Lindholm M., Eronen M., 2004, Nitrate Concentration in Greeland Ice: An Indicator of Changes in Fluxes of Solar and Galactic High-Energy Particles, *Solar Physics*, **222**, 177–190.
- Palmer, A.S., van Ommen T.S., Curran M., Morgan V., 2001, Ice-core evidence for a small solar-source of atmospheric nitrate. , *Geophys. Res. Lett.*, **28**, No 10, 1953-1956.
- Rinsland, C. P., Boone, C., Nassar, R., Walker, K., Bernath, P., McConnell, J. C., and Chiou, L.: 2005, Atmospheric Chemistry Experiment (ACE) Arctic stratospheric measurements of NO_x during February and March 2004: Impact of intense solar flares, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L16S05, doi:10.1029/2005GL022425.
- Seppala, A., Verronen, P. T., Clilverd, M. A., Randall, C. E., Tamminen, J., Sofieva, V., Backman, L., and Kyrölä, E.: 2007, Arctic and Antarctic polar winter NO_x and energetic particle precipitation in 2002–2006, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L12810, doi:10.1029/2007GL029733.
- Shea M., Smarth D.F., 2004, The Use of Geophysical Data in Studies of the Historical Solar-Terrestrial Environment, *Solar Physics* (2004) 224, 483–493.
- Smart D.F and Shea M.A, Impulsive Nitrate Deposition Events in Polar Ice. The results of Solar Proton Events, (http://www.acd.ucar.edu/Events/Meetings/HEPPA/pdf_files/Indirect_Effects_Coupling/Smart.pdf)
- Wang Ninglian¹, L. G. Thompson., J. Cole-Dai, 2000, The nature of the solar activity during the Maunder Minimum revealed by the Guliya ice core record, *Chinese Science Bulletin* **45**, No. 1 January 2000
- Комитов Б., 1986, О возможном влиянии солнечных циклов на климат в Болгарии, *Солн. данные*, No 5, 73-78.