

Изследвания на озоновия слой (стратосферен озон) над територията на Р. България

В началото на седемдесетте години на миналия век, озонът от газ с незначителни количества в атмосферата, обект на изследване само от малка група учени, се превърна в проблем, придобил глобално значение за планетата Земя. Причината за тази бързо натрупана известност е факта, който тези учени разкриха, а именно че той, озонът, е сериозно атакуван от антропогенната човешка дейност. За по-малко от 15 години от този начален момент, редицата научни проучвания и оценки убедиха световната общественост в необходимостта от изготвяне на обща световна конвенция за защита на озоновия слой. Тя бе подписана през 1985г. и е известна с името “Виенска конвенция за защита на озоновия слой”. Подписаният две години по-късно в Монреал Протокол, както и неговите последващи изменения и допълнения, определят насоките и начините за опазване на озоновия слой над планетата. България е ратифицирала Конвенцията и Протокола през 1989г. и става страна по тях от 1991г. През 1998г. бяха ратифицирани Лондонските и Копенхагенските изменения, през 1999г. – Монреалските изменения, а през 2002г. – Пекинските изменения към Протокола.

Какво представлява атмосферният озон?

Както е известно, молекулата на озона се състои от три атома кислород. Озонът е един нестабилен, бледо-синкав газ с характерна свежа проникваща миризма. Втечнява се при -112°C и се втвърдява при -251.4°C . По-активен е от кислорода и един път и половина по-гъст и по-разтворим във вода. Той е и по-активен окислител, нанасящ поражения на много органични компоненти. Произвежда се в резултат на многобройни химични реакции. Озонът се използва комерсиално като избелващо средство срещу бои от растителен произход, мазнини и други органични съставки и за прочистване на вода и въздух. Понякога е забележим в областта на околността на електрическите машини и под силна ултравиолетова светлина. Разпознава се по неговата характерна миризма.

Атмосферният въздух се състои основно от азот - 78% и кислород – 21%. Озонът е един от многото газове с незначително количество, съставляващи общо

около 1% от обема на въздуха. Наистина от 10 милиона молекули на въздуха само 3 са озон. В процентно отношение озонът представлява едва $10^{-6}\%$ от атмосферния въздух. Ако цялото количество озон в атмосферата се постави на земната повърхност, ще се получи слой дебел само около 3mm.

Макар в толкова малко количество, озонът е от жизненоважно значение за живота на нашата Планета. Той абсорбира почти напълно изключително вредните, на практика смъртоносни, ултравиолетови лъчи на Слънцето с дължина на вълната под 320nm, предпазвайки по този начин всички живи организми на Земята. Изпълнявайки тези си функции озонът в значителна степен определя и температурната структура на атмосферата в слоя 10-50км., където, както се вижда от фиг.1 температурата нараства с височината. Профилът на съдържанието на озон във височина в атмосферата, също показва, че основната част (около 90%) от озона е разположен в слоя 19-23км. в частта от атмосферата, наречена “стратосфера” – фиг.1. Затова и тази основна част от съдържанието на озон в атмосферата е известна с името “стратосферен озон” или още “добрия озон”, предвид изключително полезното му действие, за разлика от приземния, т.н. “тропосферен озон” или “лош озон” в близост до земната повърхност. Тоталното (общото) съдържание на озон в атмосферен стълб над дадено място е разбира се променлива величина, основно зависеща от атмосферната динамика. Именно то – тоталното (общото) съдържание на озон, ще бъде обект на измерване и изследване в настоящия проект. По него ние ще съдим за състоянието на “озоновия слой” над територията на Република България.

Исторически това съединение е открито в атмосферата от химика Schonbein през 1839г. Името му произлиза от гръцка дума за “миризма”, подчертавайки една от характерните му особености, когато е в по-голяма концентрация. През 1881 г. Hartley е демонстрирал съществуването на озон в атмосферата и е обяснил, че липсващата ултравиолетова ивица от слънчевия спектър върху земната повърхност се дължи именно на поглъщането и от атмосферния озон. Той е показал, че въздухът в по-ниската част на стратосферата (15-30км.) съдържа повече озон, отколкото въздуха близо до земната повърхност.

Измервания на озоновия слой над България 2008-2009 г

Апаратура и организация на измерванията

Измерванията са проведени със слънчевия фотометър Microtops II, производство на Solar Light Company, USA, <http://www.solarlight.com>.



Фиг.2. Фотография на прибора Microtops II.

Приборът е 5-канален слънчев фотометър, с теснолентови филтри за пет дължини на вълната в областта на ултравиолетовата радиация на Слънцето. Отчитането на потока слънчева радиация на повърхността на Земята на три от дължините на вълната - 300, 305 и 312 nm позволява да се определи тоталното съдържание на озон в атмосферата при зададени географски координати на мястото на измерване, универсално време и като се използват данните от вградения измервател на атмосферното налягане. Специалната електроника с ниско ниво на шума и вграденият 20-битов аналого-цифров преобразовател с висока линейност и динамичен диапазон осигуряват висока точност на измерванията. В прибора е вградена оригинален компенсиращ алгоритъм за коригиране на стойността, получена от отношенията на отделните канали. Резултатите се получават напълно автоматично от вградения в прибора микрокомпютър, единствената ръчна операция при измерването е насочването на датчиците на прибора към Слънцето, за която цел в прибора е предвидена оптичска система за насочване.

Точността на прибора, дадена от производителя е 1-2%.

Измерванията на тоталното съдържание на озон са правени в района на сградата на Геофизичен институт, в някои случаи измерванията са правени в други точки на гр. София, но на разстояние не повече от 10 км, което е несъществено за измерванията. Вграденият в прибора софтуер осигурява необходимите корекции на измерванията, наложени от влиянието на зенитния ъгъл на Слънцето и надморската височина. Но преизчислението на наклонения озонов стълб към вертикален е най-точно при минимални зенитни ъгли, по която причина, по възможност измерванията са правени в часове близки до местното пладне. Всяко измерване е повтаряно най-малко два пъти в рамките на 5-10 мин, а при възможност са правени измервания и в други часове на денонощието. Дневната стойност е средната от всички измервания, не по-малко от две. Всички измервания са правени при условие, че Слънцето не е засенчено от облаци. В краен случай е допускано наличие на прозрачни перести облаци.

В приложения графичен материал общото съдържание на озон (тотално количество озон, TCO) е представено в Добсън единици (DU).

Под Добсън единица се разбира озоновия слой който би бил 10 микрометра дебелина при стандартна температура и налягане. Т.е. 300 DU озон означава че на повърхността на Земята при 0° C това количество озон би заело 3 мм дебелина. Приема се че една Добсън единица съответства на 2.69×10^{16} озон молекули на кв.см

Контрол на точността на измерванията.

Известно е, че стойностите на тоталното съдържание на озон са сравнително устойчиви в зависимост от часовото време. Проведени бяха изследвания, които да установят наличие на денонощен ход или вариации на стойностите на тоталния озон в течение на едно денонощие. Беше направен експеримент на 01.08.2008 по време на частично слънчево затъмнение, при напълно ясно небе, който даде следните резултати:

UT	Тотален озон
09:19:45	286.9
09:26:08	282.9
09:31:09	291.3
09:35:46	284.9
09:41:39	285.7
09:46:57	276.6
09:50:40	284.0
09:56:26	287.4
10:00:21	287.2
10:08:23	284.7
10:11:37	287.0
10:15:26	285.6
10:21:08	289.8
10:25:35	286.2
10:30:57	285.4

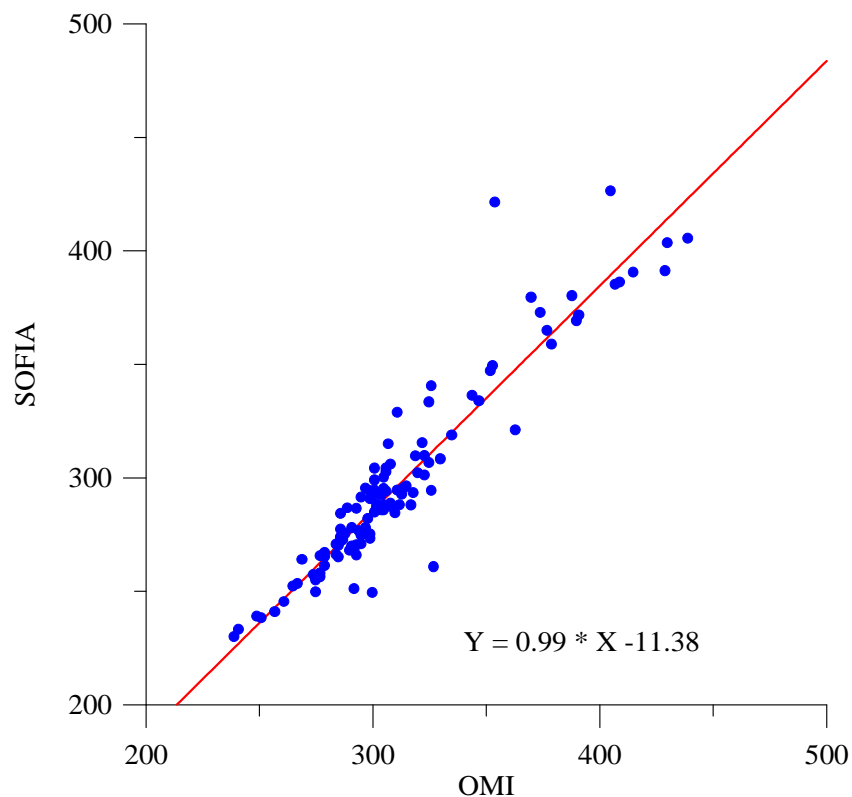
Средната стойност на тоталния озон е 275.7 DU, стандартното отклонение- 3.29 DU (около 1.2%). Не се наблюдава нито влияние на частичното слънчево затъмнение, нито на часовото време.

В таблицата са представени средните стойности за някои други денонощия, стандартното отклонение и броят измервания. Тези измервания са правени с отделен прибор Microtops II.

Дата	Средна стойност	Стандартно отклонение	Брой измервания
11.4.2009	354.85	1.42	4
16.4.2009	371.46	2.19	5
17.4.2009	338.81	2.65	10
18.4.2009	345.73	4.19	4
24.4.2009	359.72	5.17	6
08.5.2009	353.46	2.74	10

Стойности на стандартното отклонение до 5 DU могат да се считат за типични за болшинството денонощия. Те са от порядъка на регламентираната от производителя грешка, която е 1-2 %. В някои отделни случаи се получават стойности на стандартното отклонение до 20 DU. В тези случаи, обаче, винаги има съмнения за влияние на прозрачна облачна покривка. В болшинството случаи, обаче, вариациите на показанията на прибора в различни часове от денонощието са в границите на грешката на прибора. Възприетото осредняване на няколко измервания в денонощието свежда точността на среднодневната стойност до точността на прибора.

За допълнителен контрол на точността на измерванията са използвани спътникови данни от Ozone Monitoring Instrument (OMI), които са достъпни на Интернет адрес <http://toms.gsfc.nasa.gov/>. Данните се предлагат в мрежа със стъпка от един географски градус по географска ширина и дължина. Тези, които се отнасят за територията на България са от 42 до 44°N и от 23 до 28°E. Методът на измерване на тоталния озон се базира на отражението на слънчевата радиация от облачната покривка при условия близки до местното пладне и, вероятно, има по-ниска точност от наземните измервания. На Фиг. 3 е показана зависимостта между стойностите, получени от нашите измервания и съответните стойности от OMI за периода от септември 2008 до юни 2009.

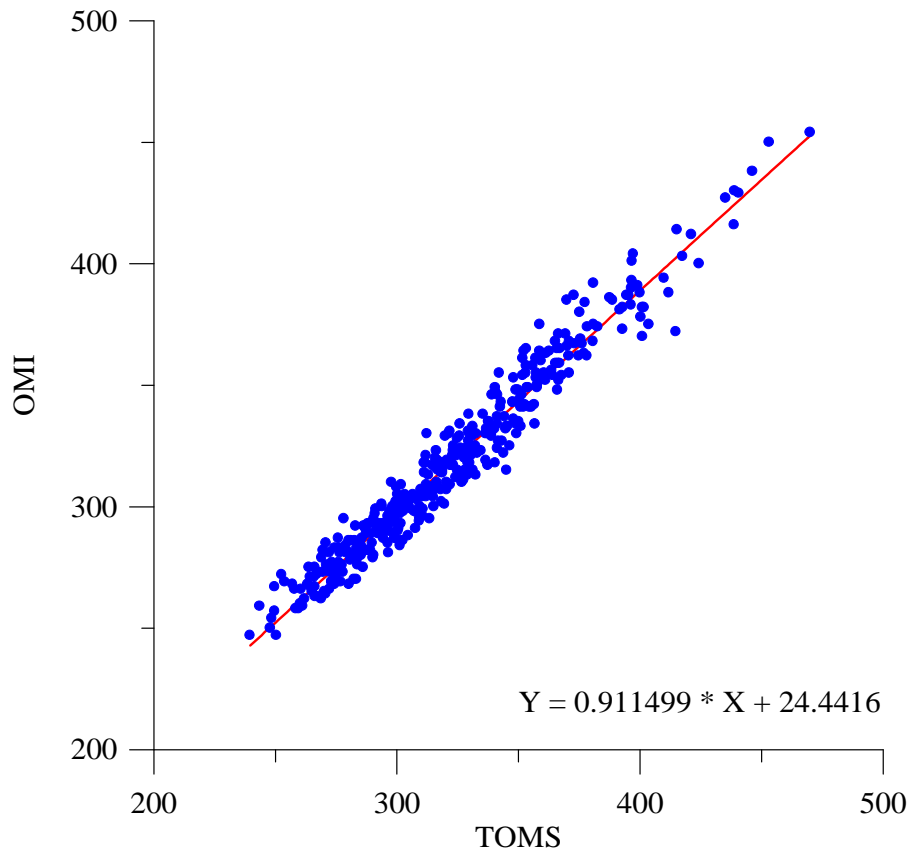


Фиг. 3. Зависимост между стойностите на тоталния озон, получени от измерванията в София и съответните спътникови данни на OMI.

Линейната регресия между двата вида независими измервания е получена по метода на най-малките квадрати. Тя показва наличие на систематично отклонение

от 11.38 DU. Спрямо средната стойност на тоталния озон (300 DU) тя възлиза на около 4%. Линеиният коефициент на регресията е практически единица. Това обстоятелство дава основание да се счита, че двата типа измервания, наземните с използвания прибор Microtops II и спътниковите от OMI имат достатъчно добро съвпадение. Получената средна зависимост между двата вида данни позволява да се използват данните от OMI за попълване на пропуските на измерванията в София, след съответна корекция по горната формула, което е полезно особено в есенно-зимния сезон, когато има продължителни заоблачавания и трайни мъгли, които не позволяват провеждането на измервания. Същото обосновава използването на спътниковите данни за изследване на поведението на атмосферния озон в предходните години.

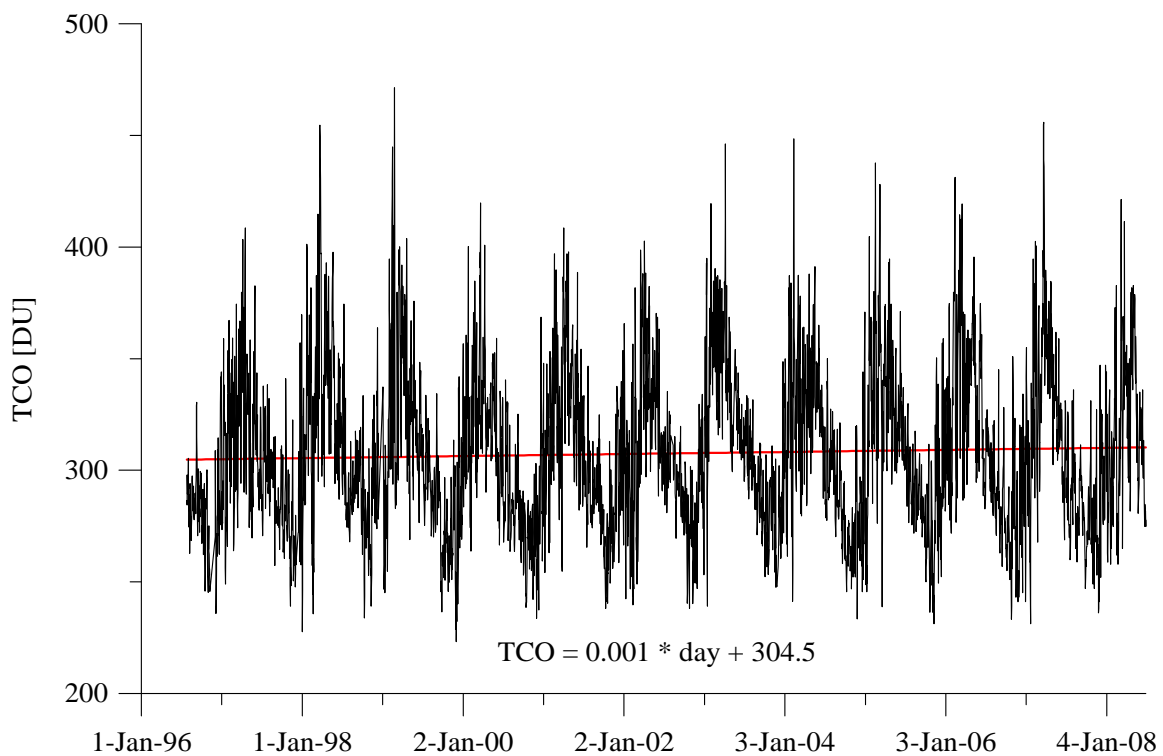
Изследване на поведението на озоновия слой над България може да се направи на базата на ежедневните спътникови измервания. В базата данни на NASA се разполага с ред стойности на тоталния озон от 1996 година до 2005 за координатите на София получени по метода TOMS V8. Комбинирането на данните по TOMS V8 и OMI позволява да се изследва ходът на тоталния озон над България през последните 12 години.



Фиг. 8. Регресионна зависимост между измерванията на тоталния озон от TOMS и OMI.

Данните от TOMS V5 приключват през декември 2005 г докато данните от OMI започват пре октомври 2004. Така се създава възможност да се създаде общ ред данни, като измерванията на двата спътника могат да се привържат количествено. На Фиг. 8 е показана регресионната зависимост (по метода на най-малките квадрати между стойностите от TOMS и OMI за периода на едновременна работа.

Получената регресионна зависимост дава възможност да се коригират данните на TOMS към получените с по-нова техника данни на OMI. Целият ред от спътникови данни е коригиран с представената по-горе регресионна зависимост на данните от OMI и наземните измервания в София през 2008- 2009 година. В резултат се получава почти непрекъснат ред от ежедневни стойности за периода от средата на 1996 г. до настоящия момент. На Фиг. 9 е показан ходът до края на м. юни 2008 година, преди започването на наземните измервания в София.



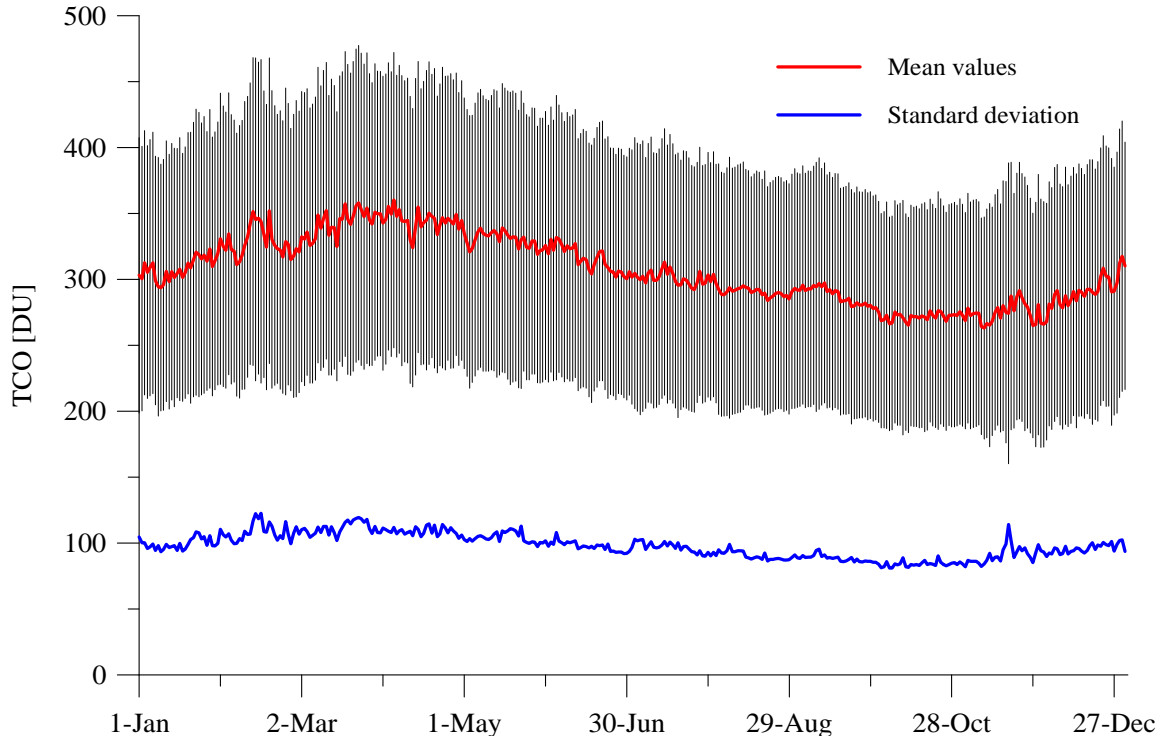
Фиг. 9. Ход на дневните стойности на тоталния озон съгласно спътникови данни от приборите TOMS и OMI за периода 1996- 2007.

С червена линия е показан линейният тренд на данните, получен по метода на най-малките квадрати. Средната стойност на тоталния озон за дадения период е 305.6 DU, а линейният коефициент (това всъщност е тенденцията на изменение на средния тотален озон- т.н. тренд) е 0.001. Общото количество дни е 4564, следователно изменението (в случая увеличение) на средния тотален озон за разглеждания период е $4564 * 0.001 = 4.5$ DU, което е по-малко от 2% от средната стойност и може да се счита за несъществено, понеже е от порядъка на грешката на измерванията. Следователно през последните 12 години не се наблюдават тенденции за изменение на средната стойност на тоталния озон над България. Очакваната средногодишна стойност за последната година е 309 DU.

Устойчивостта на средния озон слой позволява, на базата на спътниковите данни да се определи средният сезонен ход на тоталния озон, който може да се използва като база за изследване на вариациите му по сезони и даже по дни.

Полученият ред данни позволява да се изчисли средният сезонен ход на тоталния озон по дни от годината. Цялата е изчислена средната стойност за всяка календарна дата от разглеждания интервал време и нейното стандартно отклонение.

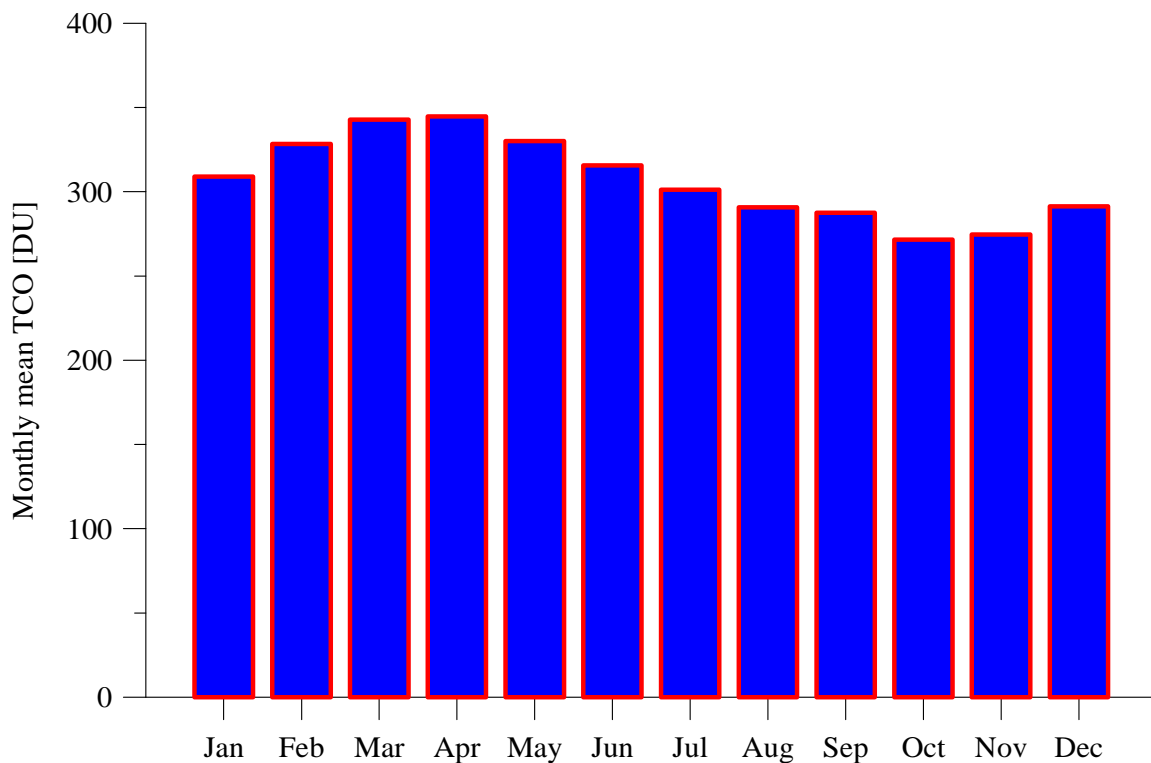
На Фиг. 10 е показан средният сезонен ход на тоталния озон, като за всеки ден е означен и диапазонът на разсейване на стойностите в различните години, определен от стандартното отклонение, показано със синя линия.



Фиг. 10. Среден сезонен ход на тоталния озон в зависимост от календарната дата и неговото стандартно отклонение.

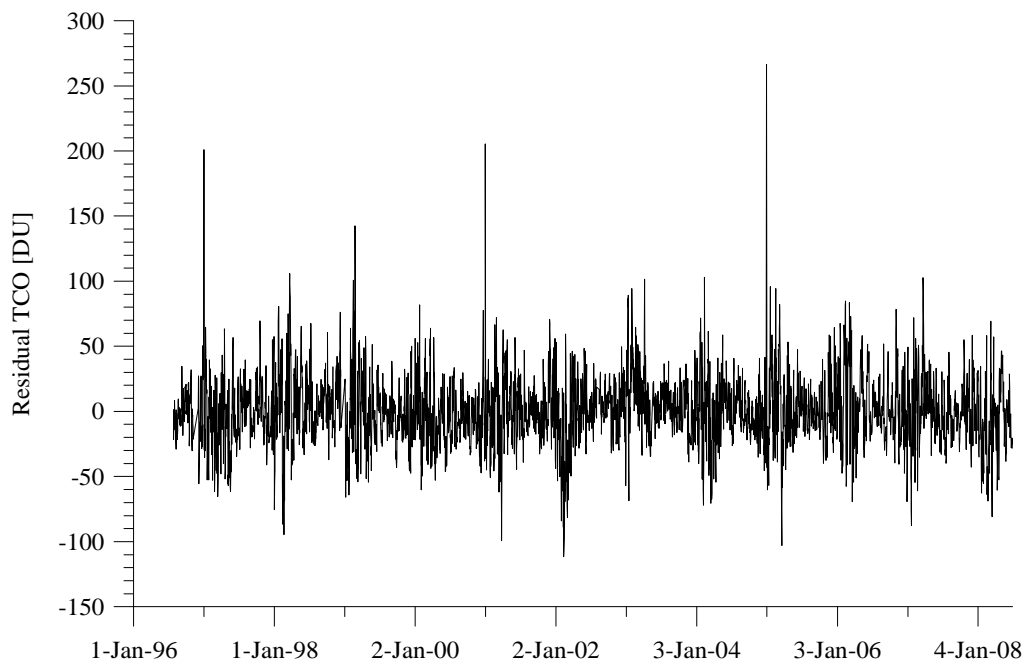
Както следва от показаната зависимост, средният сезонен ход има форма близка до синусоидална, като максимални стойности се достигат около пролетното равноденствие, а минималните- около есенното равноденствие. Стандартното отклонение е около 100 DU и има слабо изразен сезонен ход. Очертаният с отсечки диапазон на разсейване на стойностите (средната стойност плюс и минус стандартното отклонение) представлява всъщност диапазонът, в който се намират примерно половината от измерените стойности за дадена календарна дата.

Изчислени са средномесечните стойности на тоталния озон, показани на Фиг. 11.



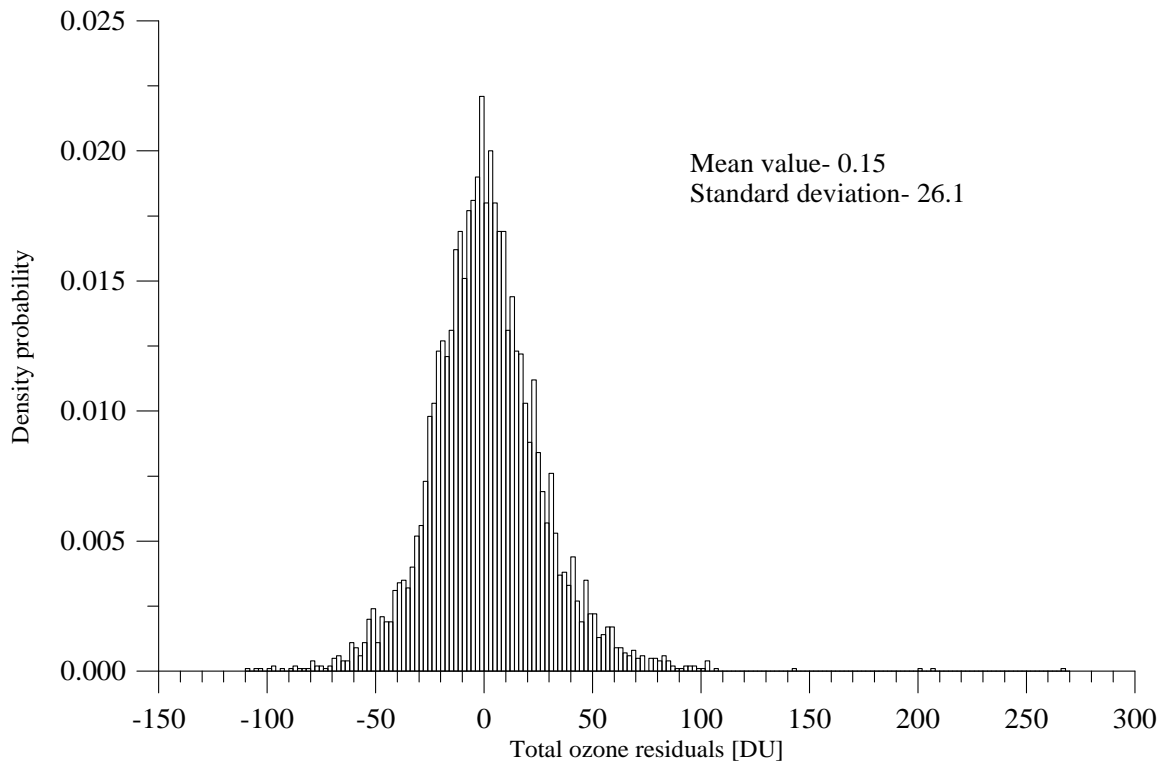
Фиг. 11. Средномесечни стойности на тоталния озон.

Месец	Ян.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Юни	Юли	Авг.	Сеп.	Окт.	Ное.	Дек.
ТСО	309.1	328.4	342.8	344.7	330.1	315.6	301.3	290.8	287.6	271.7	274.6	291.4



Фиг. 12. Разлики между измерените стойности и средносезонните.

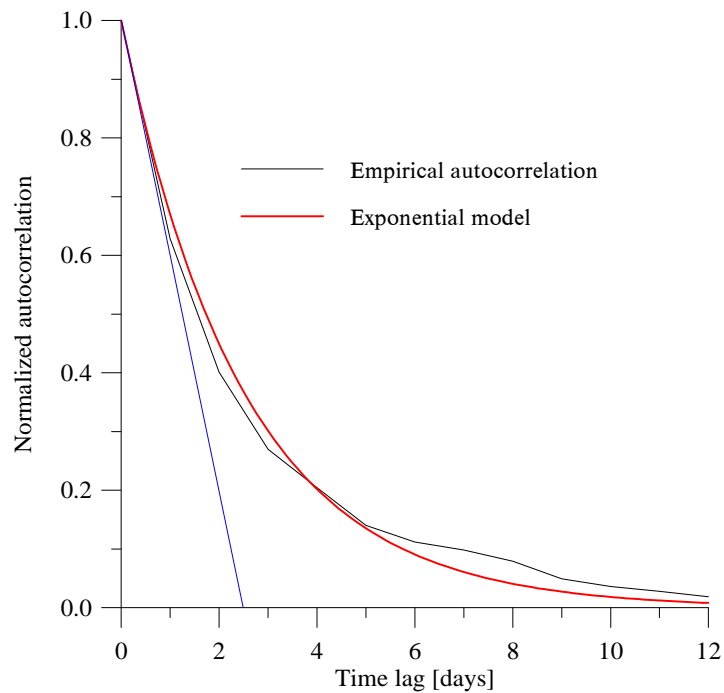
Вариациите на тоталния озон, които не са свързани със сезонния му ход е удобно да се изследват като се изследват разликите на измерените стойности и средносезонните за всеки ден. Ходът на тази величина е показан на Фиг. 12.



Фиг. 13. Статистическо разпределение на вероятността на отклонението на тоталния озон от средносезонните

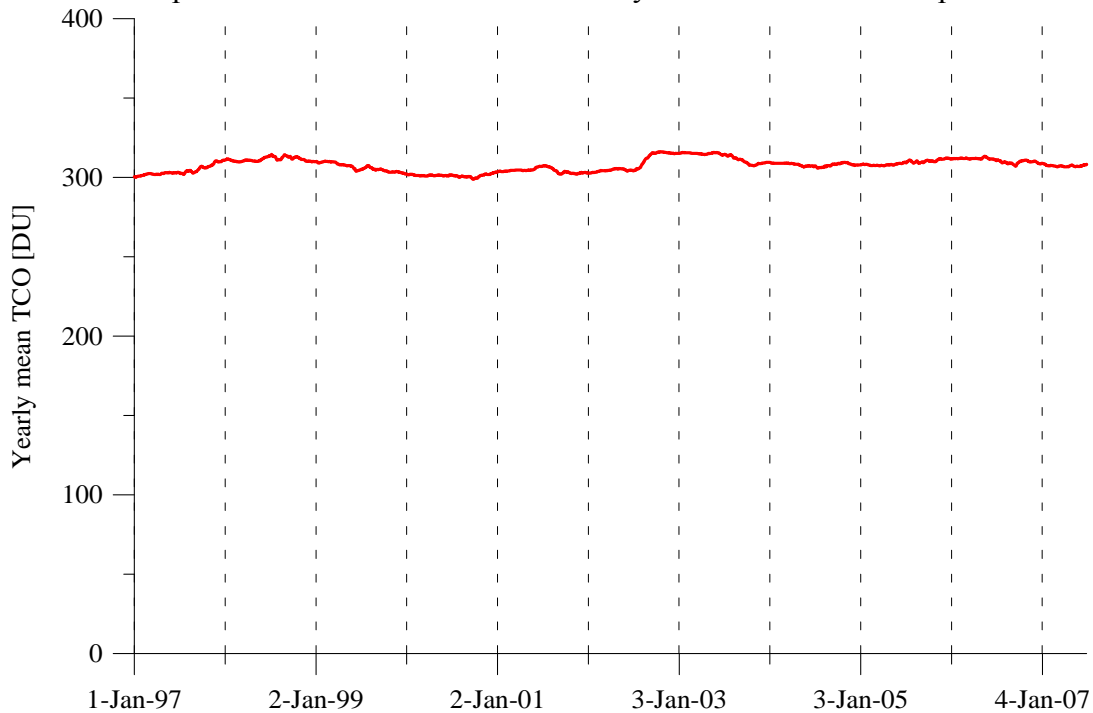
Статистическото разпределение на вероятността за получаване на дадено отклонение от средносезонния ход има форма, близка до стандартното Гаусово разпределение. Стандартното отклонение е мярка за общата изменчивост на тоталния озон от средносезонния.

От представения ред разлики е възможно да се определи една важна характеристика на изменчивостта на озоновия слой от ден за ден-автокорелационната функция, представена на Фиг. 14. Тя е много близка до експоненциална функция, с времеконстанта 2.5 денонощия, която е показана на фигурата. Подобни процеси, които се срещат много често в геофизиката и имат подобни автокорелационни функции се оценяват като случайни, като средното време на относителна устойчивост е равно на тази времеконстанта и в случая е примерно 2-3 денонощия.



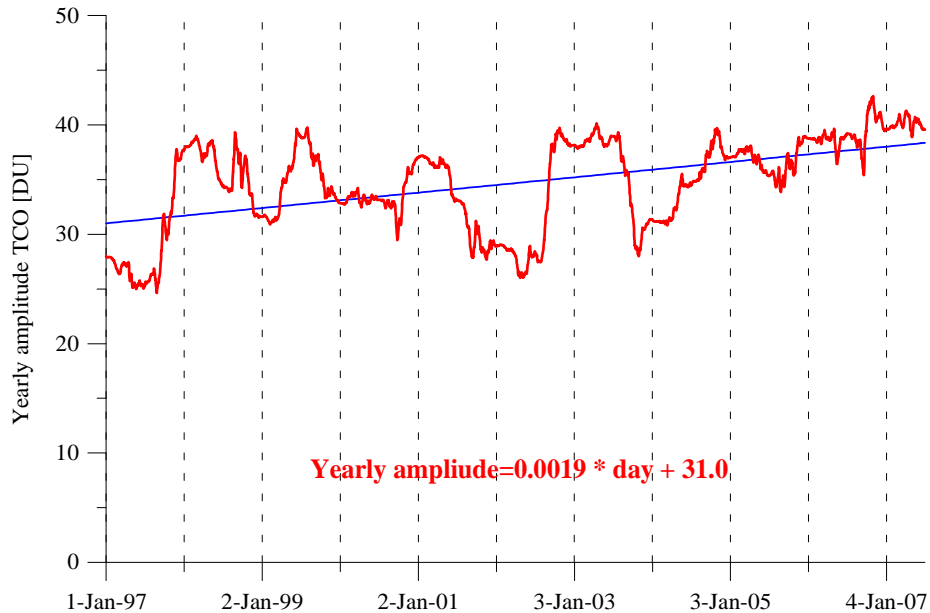
Фиг. 14. Автокорелационна функция на вариациите на тоталния озон.

Интерес представляват и вариациите на сезонния ход на тоталния озон от година на година. За целта от реда стойности на тоталния озон чрез синусоидална декомпозиция на плъзгач се сегмент с дължина една година са получени ходът на плъзгачата средногодишна стойност и амплитудата на годишната вариация.



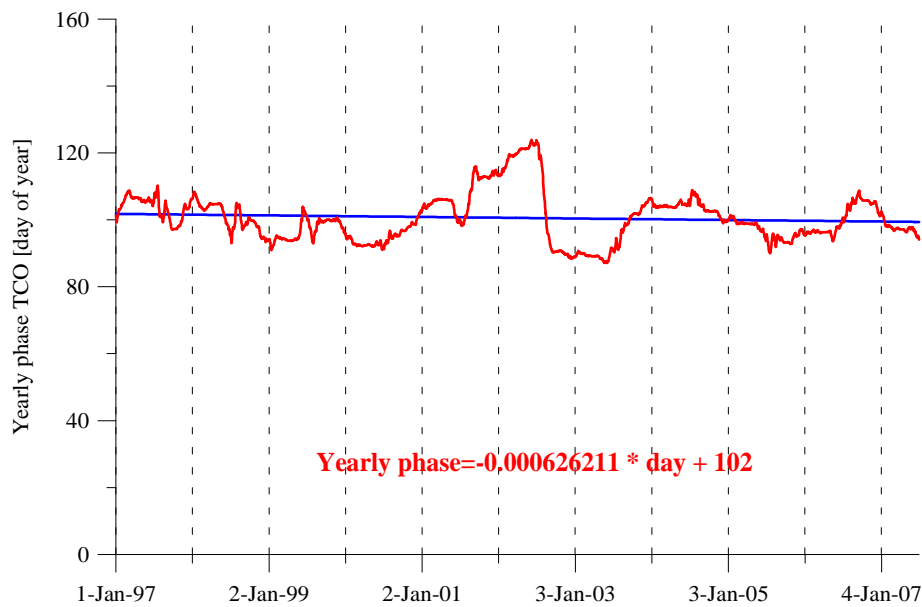
Фиг. 15. Ход на плъзгачата средногодишна стойност на тоталния озон.

Показаният на Фиг. 15 ход на пълзящата средногодишна стойност на тоталния озон варира много слабо, което потвърждава направените по-горе изводи за устойчивостта на озоновия слой над България през последното десетилетие. На Фиг. 14 е показан ходът на годишната амплитуда. Смисълът на тази величина е, че тя представя максималното отклонение на тоталния озон от средногодишната стойност (в посока увеличаване около пролетното равноденствие и в посока намаляване около есенното равноденствие). Както следва от Фиг. 16 годишната амплитуда (чиято средна стойност е 31 DU) показва забележима тенденция за увеличение през периода 1997- 2006 с дневно нарастване около 0.002 DU/day, в резултат на което за разглеждания период годишната амплитуда нараства от около 30DU до около 40 DU. От показаната зависимост, освен това, се забелязва съвсем ясно и наличие на вариации с продължителност около две години (особено в интервала 2001- 2005 г. Те, вероятно, се дължат на влияние на известната квазидвугодишна осцилация на стратосферния вятър в екваториални ширини.



Фиг. 16. Ход на годишната амплитуда на тоталния озон.

На Фиг. 17 е показан ходът на фазата на годишната компонента на сезонния ход, тя е поредният ден от годината, в който се получава максимум на тоталния озон. Средната стойност за целия изследван период е 102 ден (12-13 април). Той показва слабо изразена тенденция към намаляване, т.е изместване към по-ранна дата.



Фиг. 17. Ход на фазата на годишната компонента, поредният ден от годината, в който се наблюдава максимум на тоталния озон.

Една сравнително пълна оценка на състоянието на озоновия слой през дадена година може да се направи на основата на следните характеристики:

- Средногодишна стойност, амплитуда и фаза на годишната компонента на сезонния ход;
- Средна стойност и стандартно отклонение на разликите на измерените стойности от средните стойности за всеки календарен ден от годината, получени на базата на синтезирания ред данни;
- Средномесечни стойности за всеки календарен месец.

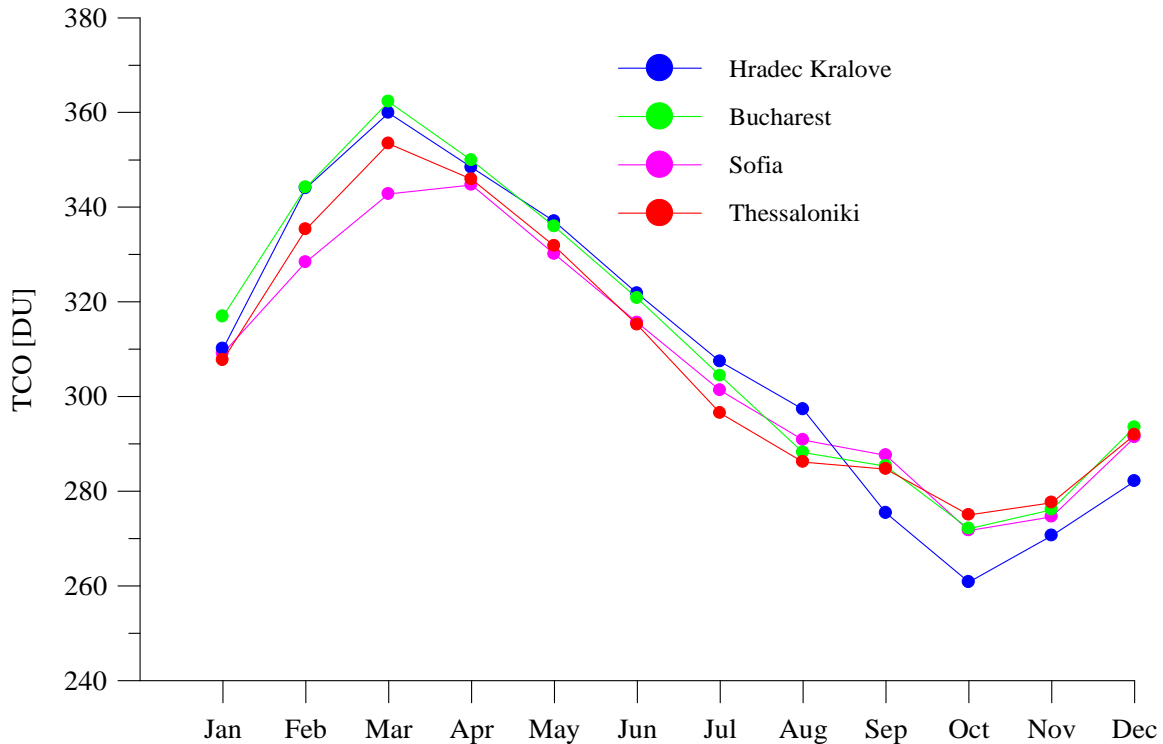
Средногодишната стойност, сравнена с общата средна стойност през последните 12 години определя има ли в настоящата година промяна на общото количество озон в атмосферата. Амплитудата и фазата на годишната вълна, сравнени с получените през последните години могат да дадат информация за промяна на общия сезонен ход на тоталния озон.

Средната стойност на отклонението на дневните стойности на тоталния озон от средните също дава информация за евентуална промяна на общото количество озон в атмосферата, сравнението на стандартното отклонение на текущата година със средното за предходния 12 годишен период може да служи за оценка на евентуални промени в късопериодичните вариации на тоталния озон.

Сравнението на средномесечните стойности за текущата година със съответните за предходния 12 годишен период също може да послужи за оценка на евентуални изменения на сезонния ход.

Състояние на озоновия слой в Югоизточна Европа

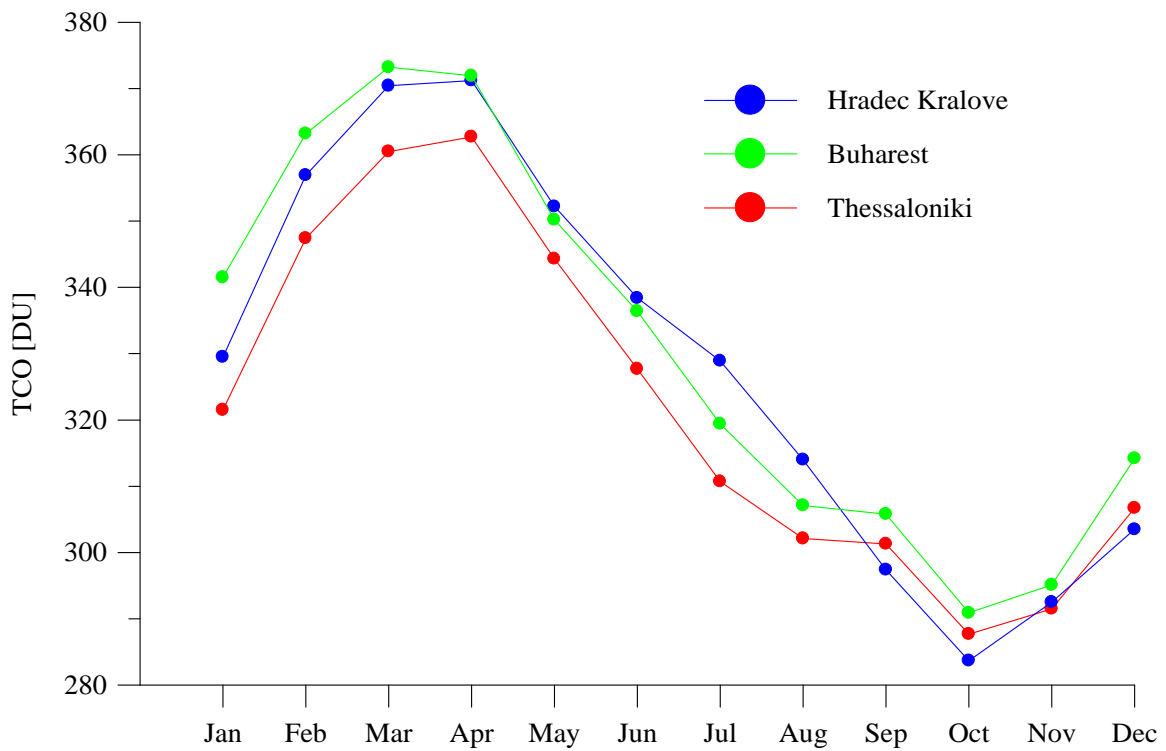
Състоянието на озоновия слой в Югоизточна Европа през последните години може да се оцени по данните на апаратурата ОМІ .Използвани са данни, привързани към координатите на три станции за наземни измервания- Храдец Кралове (50.18N, 15.83E), Букурещ (44.48 N, 26.13E) и Солун (40.63N, 22.96E) за периода 2004- 2009 г.



Фиг. 18. Среден сезонен ход на тоталния озон съгласно спътниковите данни от ОМІ за периода 2004- 2009.

Разликите между точките с различни географски ширини е незначителна. Прави впечатление, обаче, че през пролетните месеци стойностите, отговарящи на координатите на София са най-ниски от останалите. Вижда се, също, че стойностите на най-южните координати- тези на Солун също са по-ниски от стойностите съответстващи на Букурещ и Храдец Кралове. Общото ширинно разпределение на тоталния озон показва повишение с намаляване на географската ширина, следователно може да се предполага, че на Балканския полуостров има незначителна, но все пак забележима аномалия.

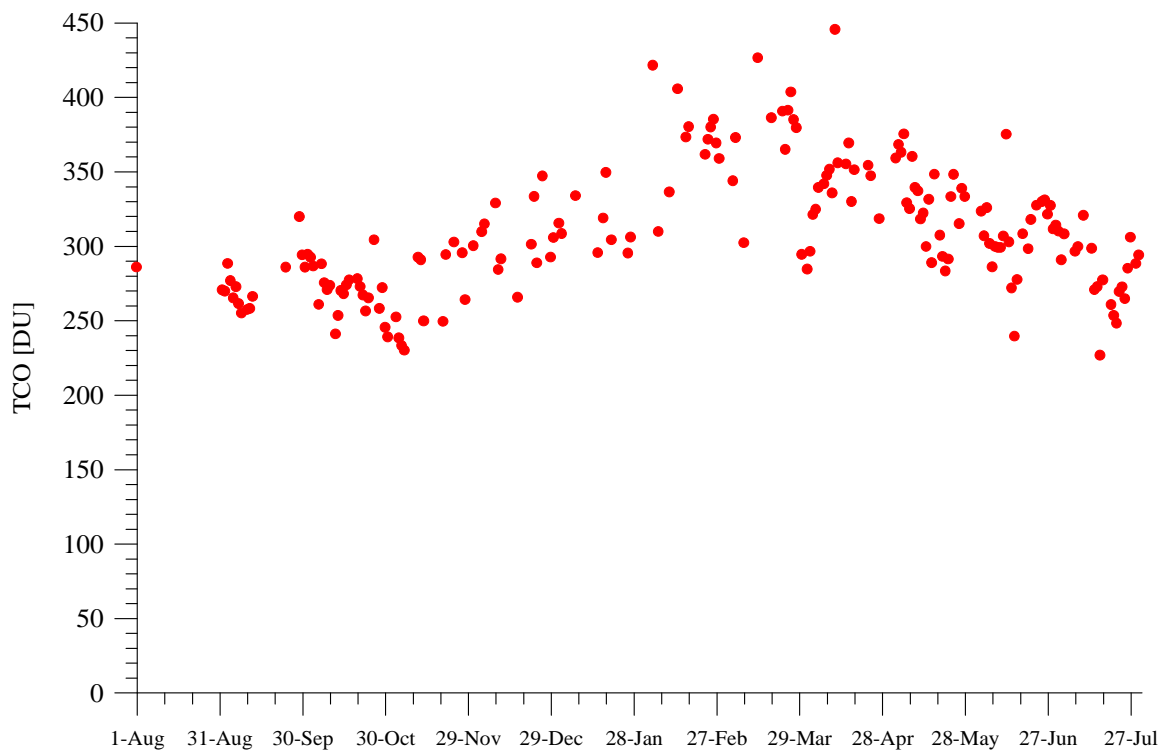
Подобни резултати се получават и по данните на спътника ENVISAT за същите географски координати, за периода 1996- 2007 г. Намалението на средномесечните стойности на тоталния озон за координатите на Солун в първата половина на годината е още по-забележимо спрямо стойностите за по-северни ширини.



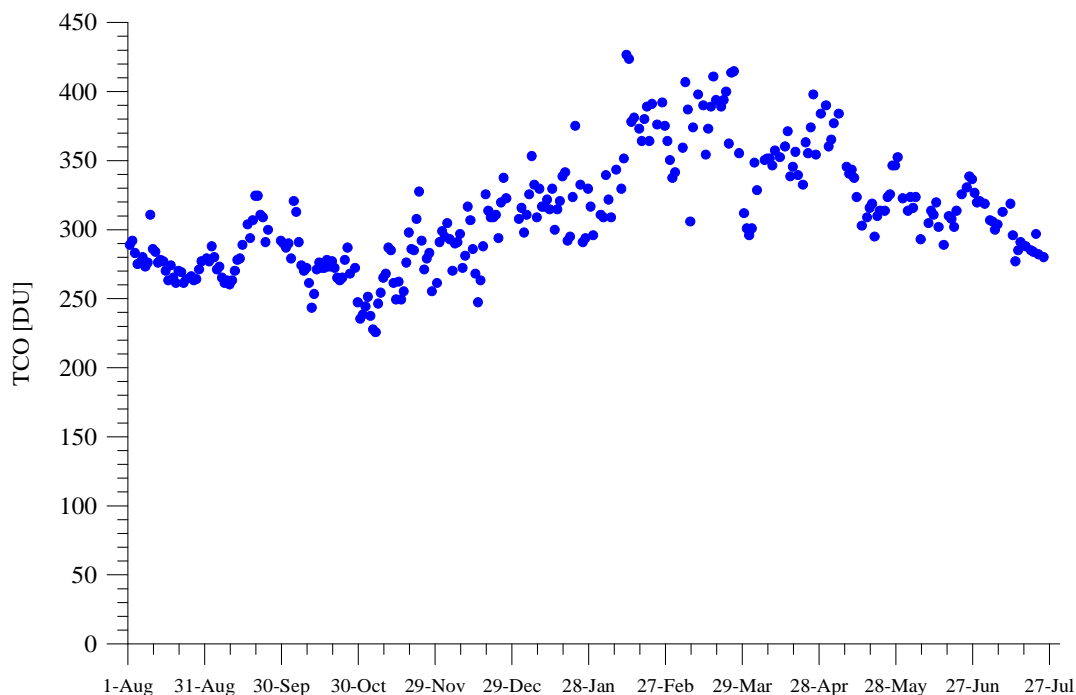
Фиг. 19. Среден сезонен ход на тоталния озон съгласно спътниковите данни от ENVISAT за периода 1996- 2007.

Анализ на резултатите от измерванията на тоталния озон над България през 2008- 2009 г.

Представените в приложение 2 среднодневни стойности на тоталния озон, измерени в София са показани графично на Фиг. 20. Измерванията започват от началото на м. август 2008 и продължават и в настоящия момент. Анализът на състоянието на тоталния озон е извършен за интервала време юли 2008- юли 2009 г. като липсващите данни от наземните измервания са попълнени с данни от спътниковата апаратура ОМІ, коригирани спрямо показанията на прибора Microtops II.

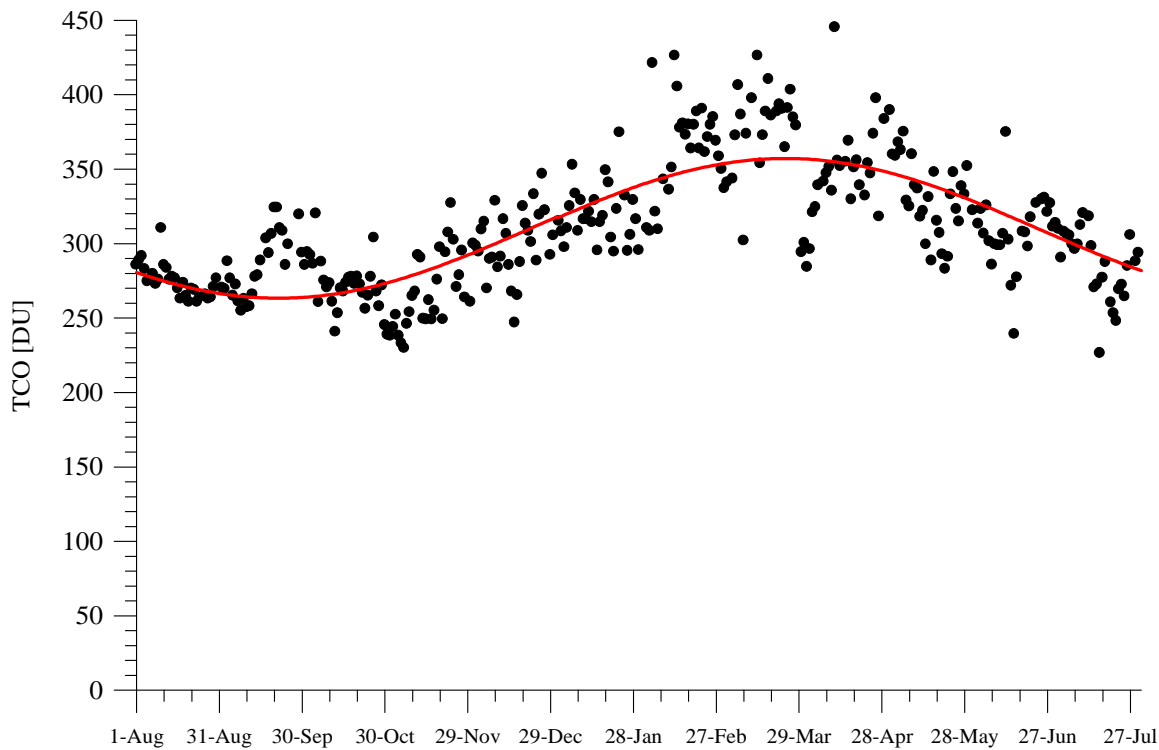


Фиг. 20. Стойности на тоталния озон, измерени с прибора Microtops II.



Фиг. 21. Стойности от спътниковата апаратура ОМІ

Редът стойности, получен от обединяването на всички стойности е показан на Фиг. 22.



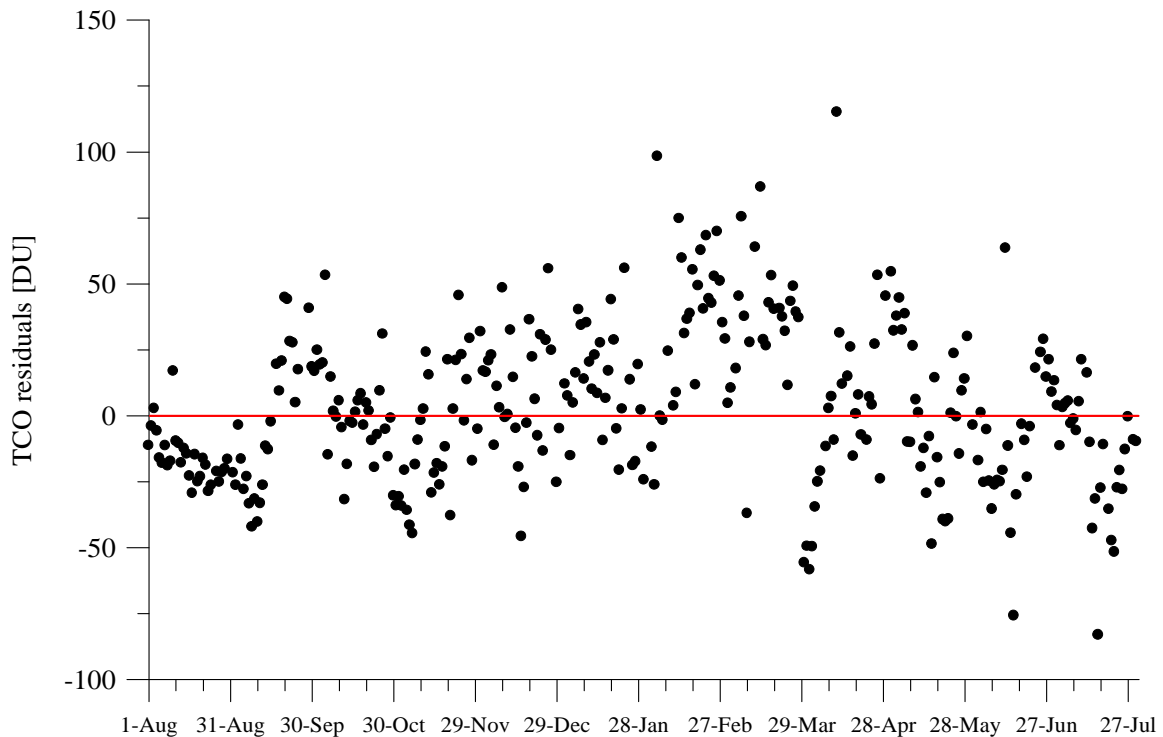
Фиг. 22. Стойности на тоталния озон, измерени с прибора Microtops II, пропуските са попълнени със стойности от ОМІ.

С червена линия е показан изгладеният сезонен ход, представен като сума от средногодишна стойност и синусоида с период 365 дни.

Средногодишната стойност за разглеждания период е 310.3 DU. Тенденцията за нарастване на средногодишната стойност през последните 12 години предполага стойност 309 DU, което съвпада с получената стойност. Разглежданата година не показва промяна на забелязаната тенденция за увеличение на следногодишния тотален озон над България.

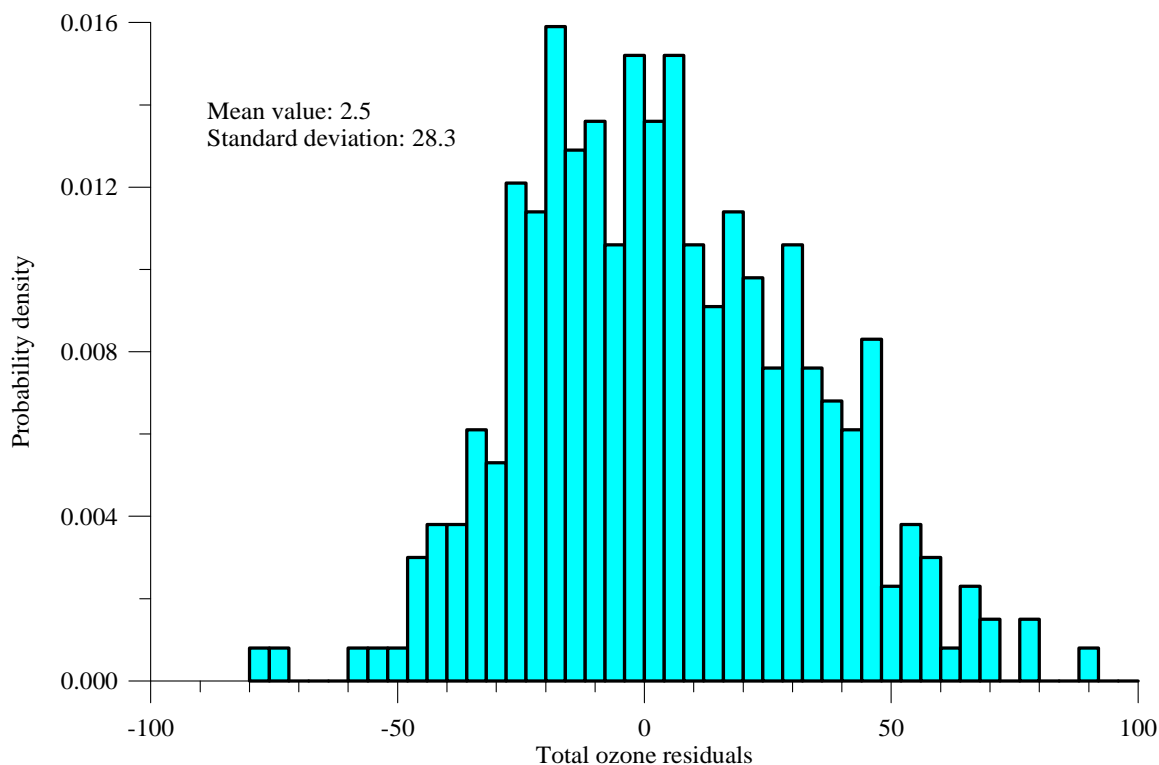
Годишната амплитуда е 47 DU. В сравнение с получената за 2007 година стойност 40 DU тенденцията за увеличение на годишната амплитуда се запазва.

Фазата (денят на максимума на сезонния ход) се получава на 82 ден от 2009 година, 23.03.2009. В сравнение с получената стойност за 2007 година (94 ден от годината) забелязаната тенденция за отместване на деня на максимума към началото на годината се запазва.



Фиг. 23. Разлики между измерените стойности и средния сезонен ход.

Вероятностното разпределение на разликите между измерените и средносезонните дневни стойности е показано на Фиг. 24.

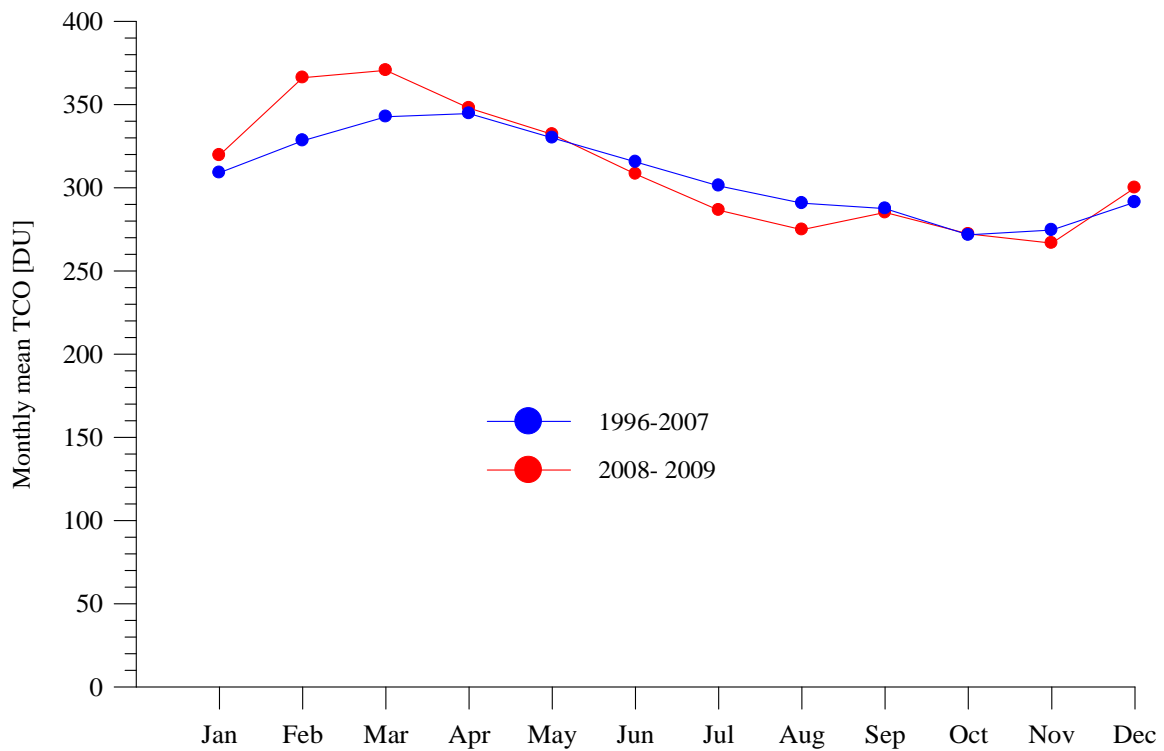


Фиг. 24. Вероятностно разпределение на отклоненията от средни сезонен ход.

Получената положителна средна стойност 2.5 DU съответствува на тенденцията за нарастване на средногодишната стойност, а стандартното отклонение 28.3 DU е приблизително същото както и полученото за предходните 12 години- 26.1 DU. Не се наблюдава съществена промяна на краткосрочната изменчивост на тоталния озон.

На Фиг. 25 са показани средномесечните стойности на тоталния озон за 2008- 2009, сравнени със сойностите, средни за периода 1996- 2007. Ясно личи увеличението на тоталния озон в пролетните месеци и намалението му в летните и есенни месеци, което означава увеличение на годишната амплитуда. Стойностите за 2008-2009 г. са представени в таблицата.

Месец	Ян.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Юни	Юли	Авг.	Сеп.	Окт.	Ное.	Дек.
ТСО	319.6	366.2	342.8	348.0	332.2	308.4	286.6	274.9	285.2	272.3	266.8	300.1



Фиг. 25. Месечни средни стойности за 2008-2009 г (с червен цвят) в сравнение с получените за интервала време 1996- 2007 г (със син цвят)

В заключение може да се констатира, че изследваната година август 2008- юли 2009 по всички характеристики на тоталния озон над България запазва всички тенденции, които се забелязват през последните 12 години, а именно:

- постепенно увеличение на средногодишните стойности;
- постепенно увеличение на годишната амплитуда;
- тенденция за преместване на годишния максимум към началото на годината.