# ТРОПОСФЕРНИЯТ ОЗОН И ВЪЗДЕЙСТВИЕ ВЪРХУ РАСТЕНИЯТА

**Георги Кадинов**
**Лесотехнически университет, София**

**Резюме**

В настоящия доклад е разгледан механизма на образуване на приземния озон, неговите прекурсори и техните източници. Проследени са тенденциите в концентрациите на приземния озон от първите измервания до прогнози за развитието им в бъдеще. Обърнато е внимание на въздействието на озона върху растенията, което са изразява в образуване на активни кислородни форми, които оказват въздействие на ултраструктурно ниво – дезорганизация на хлоропластите, гранулация на стромата и подуване на митохондрите. Приземния озон предизвиква реорганизация на антиоксидантната защитна система, която се изразява в повишен синтез на ензимни и неензимни антиоксиданти като супероксид дисмутаза, пероксидаза, флавоноиди, антоциани и други. А когато антиоксидантната защитна система не може да се справи с оксидативния стрес се наблюдава понижение на фотосинтезата и поява на видими повреди като малки петънца, хлорози, и некрози в междужилковото пространство. В резултат от направеното проучване се установи, че приземният озон е широко разпространен, нарастващ през последните десетилетия замърсител на атмосферата, в световен мащаб, който има локален характер и силна зависимост от далечен пренос на прекурсори. Той въздейства директно върху растенията, като предизвиква характерни, видово специфични, видими повреди по листата. Растенията проявяват различна чувствителност към замърсяването с озон, като това до голяма степен зависи от устичната проводимост.

**Ключови думи:** замърсяване на въздуха, тропосферен озон, антиоксидантна защитна система, повреди по листата.

**Key words**: air pollution, tropospheric ozone, antioxidant defense system, leaf injuries.

**JEL:**

## Въведение

Тропосферният озон е един от най-широко разпространените атмосферни замърсители. Формира се в замърсени с летливи органични съединения (ЛОС) и азотни оксиди (NOx) въздушни маси под действие на слънчевата радиация (Krupa and Manning, 1988; Krupa et al., 2001; de Vries et al., 2003; Ferretti et al., 2007). Озонът има съществена роля в химичните процеси, протичащи в тропосферата, което се дължи на силната му реакционна способност, възможността да поглъща слънчева радиация в инфрачервения и ултравиолетов спектър, като същевременно проявява и биологична токсичност.

През последните десетилетия, приземният озон се разглежда като замърсител, способен да предизвиква повреди по растенията, а високите концентрации на озон са често срещани по време на периода на вегетация в Европа и Северна Америка. Концентрациите на приземния озон нарастват значително спрямо прединдустриалния период, което се дължи на увеличените емисии на прекурсори на озон (ЛОС и NOx) (Volz & Kley, 1988, Guicherit & Roemer, 2000). Фоновите нива на приземния озон през втората половина на 19 в. са в границите 15–20 ppb, докато сега достигат 30 – 40 ppb. При запазване на сегашните тенденции на повишаване на концентрациите на тропосферния озон, до 2100 г. се очаква да превишат 60 ppb, в резултат на което ще бъдат засегнати 50% от горите или 17 млн. км$^2$ (Percy et al., 2003).

Цел: Да се направи преглед на литературата по отношение на образуването и динамиката на тропосферния озон и неговото въздействие върху дървесни и храстови видове.

## Механизъм на образуване на тропосферен озон, динамика и източници

В тропосферата, озон се образува в резултат на взаимодействие на молекула и атом кислород. Кислороден атом се освобождава, когато азотния диоксид (NO2) се разпадне до азотен оксид (NO), като процесът се активира от светлина в ултравиолетовия спектър (λ < 0,40 μm).

$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M \quad (1)$$

$$NO_2 (h\lambda) \rightarrow NO + O \quad (2)$$

Основният механизъм, по който се образува озон от азотни оксиди и летливи органични съединения под действие на слънчева светлина е добре описан (Sillman, 1999; Kley et al., 1999; Jenkin and Clemitshaw, 2000). Оксидите на азота се емитират в атмосферата основно като азотен оксид от изгарянето на изкопаеми горива. През деня озонът в тропосферата окислява азотния оксид до азотен диоксид като резултат се отделя и молекула кислород.

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (3)$$

Полученият азотен диоксид се превръща отново в азотен оксид посредством фотолиза. Самостоятелно тези реакции не водят до високи нива на озон, тъй като образуваният озон от първата реакция се включва като реагент в третата, при получаване на азотен диоксид и кислород.

За да се образува повече озон е необходим реагент, който да се конкурира с озона при окисляването на азотния оксид. Такава роля имат отделените в атмосферата ЛОС, които могат да окислят азотния оксид до азотен диоксид без участие на озон. Също така, според Jenkin and Clemitshaw (2000), азотните оксиди се преобразуват и в резултат на фотоокислението на въглеродния оксид и ЛОС. Междинните вещества, образувани по време на процеса, генерират силно реактивоспособни свободни радикали като хидроперокси радикал (HO2) и органоперокси радикал (RO2), които окисляват азотния оксид до азотен диоксид.

$$HO2 + NO \rightarrow OH + NO2 \quad (4)$$

$$RO2 + NO \rightarrow RO + NO2 \quad (5)$$

Образуването на приземен озон може да е резултат на естествени процеси, протичащи в природата (Guenther et al., 2000; Trainer et al., 2000). Концентрациите на тропосферен озон не се определят единствено от фотохимичните реакции, които протичат в атмосфрата. Принос към фоновите нива на озона има и нахлуването на стратосферен озон в ниските слоеве на атмосферата, както и образуването му по време на гръмотевични бури. Естествени източници на двата ключови прекурсора на озон – NOx и ЛОС са биологични процеси. С увеличаването на градските агломерации, много селски райони и горски територии са изложени на фотохимичните продукти на антропогенни емисии от NOx и ЛОС. Това прави приземния озон типичен регионален замърсител.

Според Sillman, 1999, образуването на озон не е линеен процес по отношение на азотните оксиди и летливите органични съединения. При ниски концентрации на азотни оксиди, образуването на озон нараства в почти линейна зависимост с увеличаване на количеството на азотните оксиди в атмосферата. Когато нивата на азотните оксиди се повишат, озонът започва да намалява и достига своя минимум. В зависимост от условията на средата могат да се активират фотохимични реакции с участието на азотни оксиди или с ЛОС.

Озонът има специфичен годишен и денонощен ход на концентрациите, което е резултат от начина му на образуване. Най-активно, тропосферният озон се образува през лятото, вследствие на значително активиране на фотохимичните реакции, включващи азотни оксиди, въглероден оксид и летливи органични съединения. Концентрациите му са най-високи от средния до късния следобед, като процесът се поддържа от повишеното присъствие на въглеводороди в атмосферата, които водят до нарастване на отношението азотен диоксид/азотен оксид (Krupa, 1997).

Характерно за по-топлите, слънчеви дни с ясно небе и безветрие е появата на озонови епизоди, представляващи кратки периоди с много високи концентрации на озон. Такива епизоди се срещат през пролетта и лятото, при слънчево време, с високо атмосферно налягане, ниска скорост на вятъра и замърсени въздушни маси с прекурсори на озона. Лимитиращ фактор за фотохимичното образуване на тропосферен озон в градовете са въглеводородите, а извън тях азотните оксиди (Sillman, 1999). Дневните максимуми на озон в селските райони достигат между 50 – 120 ppb в сравнение с градските максимуми, които са в рамките от 100–400 ppb (Krupa et al., 2001).

**Влияние на тропосферния озон върху растителността**

Връзката между концентрацията на озон в атмосферата и появата на повреди не е напълно изяснена. Ефектите от остро или хронично излагане на озон са незначително изследвани в горски условия, а емпирично базираният праг на въздействие на озона не е добре валидиран за зрели дървостои.

Озонът предизвиква поява на различни симптоми у растенията, като те зависят от вида, генотипа, разположението на листата, възрастта на листата, метеорологичните фактори, условията на растеж и изложението на листата. Образуването на повреди по листата е резултат от взаимодействието между чуствителността на растенията, нивата на приземен озон и факторите на околната среда, които оказват влияние на поглъщането на озон от растенията.

Озонът се характеризира с много висока проникваща способност и е един от най-вредните за горите газове (Sandermann et al., 1997 , Bussotti & Ferretti,1998). При условия на оптимална температура, влажност на въздуха, слънчева радиация и почвена влажност се увеличава фотосинтезата и поглъщането на озон. Ниската почвена влажност комбинирана с високи температури води до затваряне на устицата на листата и последващо редуциране на поглъщането на озон.

Озонът директно въздейства върху растежа на дърветата, сукцесията на горите, състава на фитоценозите и предизвиква видими повреди (Hakkarienen, 1987; Miller and Millecan, 1971; Skelly et al., 1987; Treshow and Stewart, 1973). Специфичното при повреди от озон е, че дадени гени или генни комплекси могат да бъдат изгубени за значително кратко време, което може да доведе до стесняване на генетичната база на популацията, ако чувствителните гени се срещат в райони, подходящи за появи на повреди от озон (Bennett et al., 1994).

Образуването на видими повреди по листата зависи от вида и генотипа на растението, позицията на листата, тяхната възраст, изложението, метеорологичните фактори, концентрацията на озона и продължителността на експозицията, както и от другите условия на местообитанието (Percy et al., 2003; Kohut, 2005). Съществуват няколко типа повреди от озон. При широколистните

растения те са категоризирани по степен на увреденост: поява на малки петънца, хлорози и некрози. Видимите повреди (точиците) могат да са едва забележими, еднакви по размер, както неравномерно разпределени, така и концентрирани върху част от листната повърхност, но могат да се сливат помежду си и да покрият по-голямата част от листа в периода на експозиция. Симптомите се проявяват само между жилките на листата. Цветът, гъстотата и разпространението им върху листната петура са видово специфични, но и продължителността и вида на излагане също са от значение (Schaub et al., 2010).

След продължително, хронично излагане на относително ниски концентрации, обичайните симптоми на повреди от озон по широколистните растения включват промени в пигментацията, придобиване на бронзов цвят, хлорози и преждевременно опадане на листата или цветовете на растенията.

Бифациалната некроза е най-тежкият стадий на листна повреда. Тя е видима от двете страни на листа и е резултат от клетъчна смърт на епидермалната тъкан, палисадния и гъбчестия мезофил. Повредите от озон при иглолистните се проявяват основно като малки прегаряния по върха на иглиците или хлорозни петна. Тези типове повреди по листата се проявяват по изключително разнообразен начин при различните видове и при различните условия на средата. Симптомите са по-ясно изразени при възрастните и листата на средна възраст, тъй като те са изложени за по-дълго време под влияние на озона. По младите листа има много малко повреди или липсват такива.

Озонът прониква през устицата и се разпространява по междуклетъчното пространство, и тъй като е силно водоразтворим, той се разтваря в течностите на околоустичните празнини. Така на практика концентрацията на озон в листата е приблизително нула. Голяма част от повърхността на мезофила представлява благоприятна среда за разтварянето на озона. Дифузията на озон е пасивен процес, базиран на градиента на концентрацията. Неговата нива в тъканите на растенията зависи от разтворимостта му, скоростта на неговия разпад и от pH в участъка на абсорбция.

В следствие на разтварянето му се образуват свободни радикали, които предизвикват защитната реакция на клетките. В резултат на това се активизира изключително бързо антиоксидантната защитна система (Noormets et al., 2000). Озонът уврежда първо клетките на палисадния паренхим, клетките разположени непосредствено под епидермиса и около устицата. Токсичното му действие се разпространява върху клетките на мезофила, нарушава се формата на хлоропластите, и се предизвикват видими повреди в ултраструктурата на мембраните. Един от първите признаци на повреда е дезоргарнизацията на хлоропластите. Озонът значително изменя стромата: усилена гранулация, увеличена електронна плътност, и образуване на кристални структури, предизвиква подуване на митохондрите и оказва влияние върху цитоплазмата, като при увредените клетки се наблюдава агрегация на клетъчното съдържание в плътна маса, която се разполага по периферията на клетката.

Устичната проводимост до голяма степен определя чувствителността на растенията към въздействие на озон. Според Reich & Amundson, 1985; Winner et al., 1988; Matyssek et al., 2007, видовете с висока устична проводимост са чуствителни на повреди поради повишения газообмен, което води до приемане на по-високи количества замърсители.

Heath, 1999 идентифицира три големи метаболитни събития, които настъпват, когато озонът проникне в растенията:

1. Реорганизация на антиоксидантната защитна система
2. Поява на симптоми подобни на рани
3. Понижаване на активността на фотосинтезата

Озонът може да предизвика промяна в устичната проводимост, темпа на фотоасимилация на CO2 и намаляване на ефективността на фотосинтезата.

Оксидативният стрес при растенията възниква в резултат на взаимодействието на озона с водата и разтворените в апопласта вещества, което води до образуване и акумулиране на активни кислородни форми (АКФ). В апопласта озонът генерира АКФ, като супероксидни свободни радикали (O2•-), хидроксилни свободни радикали (OH•-) и водороден пероксид (H2O2), които са потоксични и реактивоспособни от молекулния кислород (Mehlhorn et al., 1990; Wohlgemuth et al., 2002, Nagajyoti et al., 2010; Emamverdian et al., 2015).Той оказва влияние на много компоненти на мембраната: SH-групата, аминокиселините, белтъчините и ненаситените мастни киселини, възможно е тяхното окисление да е предизвикано от атаки на свободни радикали. Изменя се проводимостта на растителните тъкани към водата, глюкозата и йоните и проводимостта на мембраните на митохондрите и хлоропластите.

Озонът инхибира и процеса на фотосинтеза като директно намалява ефективността на карбоксилация – редуцира количеството или активността на Рубиско и впоследствие на фотосинтезата (Farage et al., 1991; Pell et al., 1994). Ефектът на озона върху фотосинтезата зависи от генотипа на растението, възрастта на листата (Noormets et al., 2001) и позицията на короната (Sharma et al., 2003). При някои растения озонът инхибира електронния транспорт и на двете фотосистеми. Намалява съдържанието на хлорофил и способства появата на некрози. Оказва влияние на разпространението на въглерода към корените на растението и растежът им (Andersen, 2003).

Озонът причинява увреждане на фотосистемите, фиксацията на CO2, хлорофил пигментната система, електронния транспорт и на мембраните на клетките.

Съществува положителна корелация между нивата на толерантност към озона и количеството на антиоксидантите (Conklin and Last, 1995). В допълнение към процеса на сигнализация и защитните биохимични механизми, растенията могат да проявяват различна толерантност, зависеща от количеството озон, проникнало в листата.

Антиоксидантната защитна система в растенията функционира като основен механизъм за неутрализирне на оксидативния стрес посредством ензимни и неензимни антиоксиданти (Mittler, 2002; Blokhina et al . 2003). Важна роля в защитната система играят ензими като супероксид дисмутаза, каталаза, пероксидаза, аскорбат пероксидаза и нискомолекулни неензимни антиоксиданти, като аскорбат, глутатион, α–токоферол, антоцини, каротеноиди, флавоноиди и танини (Gopal and Khurana 2011; Sytar et al., 2013, Emamverdian et al., 2015).

Супероксид дисмутазата (СОД) е най-ефективният ензимен антиоксидант, който се среща във всички аеробни организми и всички субклетъчни компоненти. Под действието на озон активността на СОД и пероксидазата се повишават значително Borowiak, et al., 2009.

Флавоноидите са вторични метаболити, които директно реагират със свободните радикали, поради възможността да отдават електрони или водородни атоми, защитавайки растителните клетки от абиотичен стрес (Hernandez et al., 2009; Hossain et al., 2012).

Антоцианите във вакуолата, както и токоферола в мембраната, играят важна роля в защитните механизми на растенията срещу оксидативния стрес (Araceli et al., 2009; Hernandez et al., 2009). Съдържанието на антоциани и флавоноиди нараства с повишаване на количеството на АКФ (Yamasaki et al., 1997).

Пролинът е градивна част на клетъчната стена, обезвреждa свободните радикали, действа като антиоксидант и стабилизира макромолекулите (Seregin et al., 2003; Pavliková et al., 2007, Zarei et al. 2012).

Глутатионът предпазва SH-групите на ензимите, протеини и регенерира аскорбат в аскорбат-глутатионовият цикъл (Foyer et al., 1994; Foyer and Noctor, 2000). Високото съдържание на α-токоферол защитава тилакоидите на мембраните от окисляване (Fryer, 1992; Munne-Bosch, 2005).

## Изводи

1. Тропосферният озон е широко разпространен, нарастващ през последните десетилетия замърсител на атмосферата, в световен мащаб. Той има локален характер и силна зависимост от далечен пренос на прекурсори, които могат да бъдат с природен и антропогенен произход. Концентраците му през последното столетие се обуславят от антропогенното натоварване с азотни оксиди и летливи органични съединения.

2. Озонът въздейства директно върху растенията, като предизвиква характерни, видово специфични, видими повреди по листата. Промените във физиологичното състояние на растенията в резултат от токсичното въздействие на озона се изразяват в понижаване скоростта на фиксация на CO2, промени в хлорофил–белтъчните комплекси, и електронния транспорт, структурна дезорганизация на хлоропластите и редуциране количеството на хлорофил в листата, което води до намаляване интензивността на фотосинтезата.

3. Растенията проявяват различна чувствителност към замърсяването с озон, като това до голяма степен зависи от устичната проводимост. Като резултат от негативното въздействие на озона е появата на оксидативен стрес, който се изразява в образуване на активни кислородни форми (АКФ). АКФ реагират директно с клетъчните органели и макромолекули, което води до окисление на протеините и липидите, повреди в клетъчните структури и нарушаване на интегритета на клетъчните мембрани, и в крайна сметка до програмирана клетъчна смърт. Растенията преодоляват оксидативния стрес като мобилизират антиоксидантната защитна система, която включва антиоксидантни ензимни, като супероксид дисмутаза, каталаза, пероксидаза, аскорбат пероксидаза, както и неензимни антиоксиданти като аскорбат, глутатион, α–токоферол, антоциани, каротеноиди, флавоноиди и танини.

## Заключение

Мрежовата структура предоставя предизвикателство за съвместно развитие, което се състои в споделяне на опит, иновации, контрол на интензивността на конкуренцията или за получаване на достъп до ресурси, които не са вътрешна собственост. Резултатите от развитието на тези структури, реализация на продукцията на нови, в т.ч. и външни пазари, стабилизиране на цената на основата на дългосрочни договори, нарастване на търсенето на произведените и съвместно предлагани качествени продукти, повишаване на относителната ефективност на производството на земеделските производители са само част от резултатите и ползите от прилагането на мрежова организация.

## Литература

1. Andersen, C. P. (2003). *Source-sink balance and carbon allocation below ground in plants exposed to ozone*. New Phytol. 157, 213–228.
2. Araceli, C. O., Ma de Lourdes, P. H., Ma Elena, P. H., Rodriguez, J. A., Carlos Andrés, G. V. (2009). *Chemical studies of anthocyanins*. Rev. Food Chem. 13, 859–871.

3. Bennett, J. P., Anderson, R. L., Mielke, M. L. and Ebersole, J. J. (1994). *Foliar injury air pollution surveys of eastern white pine (Pinus strobus L.)*. A review, Environ. Monit. Assess. 30, 247–274.
4. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K. V. (2003). *Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress*. A review – Ann. Bot. 91, 179–194.
5. Borowiak K., Rucińska-Sobkowiak, Rymer K., Gwóźdź E. A., Zbierska J. (2009). *Biochemical markers of tropospheric ozone: experimentation with test plants*. Pol. J. Ecol. 57, 3–14.
6. Bussotti, F., Ferretti, M. (1998). *Air pollution, forest condition and forest decline in Southern Europe: an overview*. Environmental Pollution, 101, 49–65.
7. Conklin, P. L., Last, R. L. (1995). *Differential accumulation of antioxidant mRNA in Arabidopsis thaliana exposed to ozone*. Plant Physiol. 109, 203–212.
8. de Vries S, Verheij R. A, Groenewegen P. P, Spreeuwenberg P. (2003). *Natural environments–healthy environments? An exploratory analysis of the relationship between greenspace and health*. Environ. Plan. A. 35, 1717–1731.
9. Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., Yinfeng Xie. (2015). *Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response*. The Scientific World Journal, vol 2015, Article ID 756120, 1–18.
10. Farage, P. K., Long, S. P., Lechner, E. G., Baker, N. R. (1991). *The sequence of change within the photosynthetic apparatus of wheat following short-term exposure to ozone*. Plant Physiology, 95, 529–535.
11. Ferretti, M., Fagnano, M., Amoriello, T., Badiani, M., Ballarin-Denti, A., Buffoni, A., Bussotti, F., Castanga, A., Cieslik, S., Costantini, A., De Marco, A., Gerosa, G., Lorenzini, G., Manes, F., Merola, G., Nali, C., Paoletti, E., Petriccione, B., Racalbuto, S., Rana, G., Ranieri, A., Tagliaferri, A., Vialetto, G., Vitale, M. (2007). *Measuring, modelling and testing ozone exposure, flux and effects on vegetation in southern Europe conditions – What does not work?* A review from Italy. Environmental Pollution, 146, 648–658.
12. Foyer, C. H., Descourvieres, P., and Kunert, K. J. (1994). *Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants*. Plant, Cell and Environment 15, 507–523.
13. Foyer, C. H., Noctor, G. (2000). *Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signaling*. New Phytologist, 146, 359–388.
14. Fryer, M. (1992). *The antioxidative effect of thylakoid Vitamin E (α-tocopherol).* Plant, Cell and Environment 15, 381–392.
15. Gopal, R., Khurana, N. (2011). *Effect of heavy metal pollutants on sunflower*. African Journal of Plant Science, 5(9), 531–536.
16. Guenther, A., Geron, C., Pierce, T., Lamb, B., Harley, P., Fall, R. (2000). *Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America*. Atmos. Environ. 34, 2205–2230.
17. Guicherit, R, Roemer, M. (2000). *Tropospheric ozone trends*. Chemosphere- Global Change Science 2, 167–183.
18. Hakkarienen, C. (ed). (1987). *Forest Health and Ozone*. EPRI, EA-5135-SR
19. Heath, R.L., 1999. Biochemical processes in an ecosystem: How should they be measured? Water Air Soil Pollut. 116, 279-298.
20. Hernandez, I., Alegre, L., Breusegem, F.V., Munne – Bosch, S. (2009). *How relevant are flavonoids as antioxidants in plants?* Trends Plant Sci 14, 125–132.
21. Hossain, M.A., Piyatida, P., Da Silva, J. A. T., Fujita, M. (2012). *Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation*. J Bot, vol 2012, Article ID 872875, 37.
22. Jenkin, M.E., Clemitshaw, K. C. (2000). *Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary laye*r. Atmos. Environ. 34, 2499–2527.
23. Kley, D., Kleinmann, M., Sandermann, H., Krupa, S. (1999). *Photochemical oxidants: state of the science. Environ*. Pollut. 100, 19–42.
24. Kohut, R. (2005). *Handbook for assessment of foliar ozone injury on vegetation in the national parks*. Boyce Thompson Institute, Cornell University.
25. Krupa, S., Nosal, M. (2001). *Relationships between passive sampler and continuous ozone measurement data in ecological effects research*. The Scientific World 1, 593–601.
26. Krupa, S.V. (1997). *Air Pollution, People and Plants*. APS Press, St. Paul, MN.
27. Krupa, S. V., and Manning, W. J. (1988). *Atmospheric ozone: Formation and effects on vegetation*. Environ. Pollut. 50, 101–137.
28. Matyssek, R., Bytnerowicz, A., Karlsson, P., E., Paoletti, E., Sanz, M., Schaub, M., Wieser, G. (2007). *Promoting the O3 flux concept for European forest trees*. Environmental Pollution 146, 587–607.
29. Mehlhorn, H., Tabner, B. J., & Wellburn, A. R. (1990). *Electron spin resonance: Evidence for the formation of free radicals in plants exposed to ozone*. Physiologia Plantarum, 79, 377–383.
30. Miller, P. R., and Millecan, A. A. (1971). *Extent of oxidant air pollution damage to some pines and other conifers in California*. Plant Disease Reporte
31. Mittler R. (2002). *Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance*. Trends Plant Sci.7, 405–410.
32. Munné-Bosch, S. (2005). *The role of α-tocopherol in plant stress tolerance*. J. Plant Physol. 162, 743–748.
33. Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., and Sreekanth, T. V. M. (2010). *Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review*. Environmental Chemistry Letters, vol. 8, no. 3, pp. 199–216.
34. Noormets, A., Podila, G. K., Karnosky, D. F. (2000). *Rapid response of antioxidant enzymes to O3 – induced oxidative stress in Populus tremuloides clones varying in O3 tolerance*. For. Genet. 7, 339–342.
35. Noormets, A., Sôber, A., Pell, E. J., Dickson, R. E., Podila, G.K., Sôber, J., Isebrands, J.G., Karnosky, D. F. (2001). *Stomatal and non-stomatal limitation to photosynthesis in two trembling aspen (Populus tremuloides Michx.) clones exposed to elevated CO2 and/or O3*. Plant Cell Environment 24, 327–336.
36. Pavliková, D., Pavlik, M., Staszková, L., Tlustoš, P., Száková, J., Balik, J. (2007). *The effect of potentially toxic elements and sewage sludge on the activity of regulatory enzyme glutamate kinase*. Plant, Soil and Environment, 53, 201–206.
37. Pell, E. J., Eckardt, N.A., Glick, R. E. (1994). *Biochemical and molecular basis for impairment of photosynthetic potential*. Photosynth. Res. 39, 453–62.
38. Percy, K. E., Legge, A. H., Krupa, S. V. (2003). *Tropospheric ozone: a continuing threat to global forest?* In: Karnosky, D.F., Percy, K.E., Chappelka, A.H., Simpson, C., Pikkarainen, J. (Eds.), Air Pollution, Global Change and Forests in the New Millennium. Elsevier, Amsterdam, pp. 85–118.

39. Reich, P. B., Amundson, R. G. (1985). *Ambient levels of ozone reduce net photosynthesis in tree and crop species*. Science 230, 566–570.
40. Sandermann, H., Wellburn, A. R., Heath, R. L., (Eds.). (1997). *Forest decline and ozone: A comparison of controlled chamber and field experiments*. Springer-Verlag, New York.
41. Schaub, M., Calatayud, V., Ferretti, M., Brunialti, G., Lövblad, G., Krause, G., Sanz, M. J. (2010). *Assessment of ozone injury. International Co – operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests)*.
42. Seregin, V. I., Kozhevnikova, A. D., Kazyumina, E. M., Ivanov, V. B. (2003). *Nickel toxicity and distribution in maze roots*. Russioan Journal of Plant Physiology, 50, 711–717.
43. Sharma, K., Dutta, N., Pattanaik, A. K., Hasan, Q. Z. (2003). *Replacement value of undecorticated sunflower meal as a supplement for milk production by crossbred cows and buffaloes in the Northern plains of India*. Trop. Anim. Health Prod., 35, 131–145
44. Sillman, S. (1999). *The relation between ozone, NOx and hydrocarbons in urban and polluted rural environments*. Atmos. Environ. 33, 1821–1846.
45. Skelly, J. M., Davis, D. D., Merrill, W., Cameron, E. A., Brown, H. D., Drumond, D. B., and Dochinger, L. S. (1987). *Diagnosing injury to Eastern Forest Trees*. USDA Forest Service and Penn State University.
46. Sytar, O., Kumar, A., Latowski, D., Kuczynska, P., Strzalka, K., Prasad, M. N. V. (2013). *Heavy metal – induced oxidative damage, defense reactions and detoxification mechanisms in plants*. Acta Physiol Plant, 35, 985–999.
47. Trainer, M., Parrish, D. D., Goldan, P. D., Roberts, J., Fehsenfeld, F. C. (2000). *Review of observation-based analysis of the regional factors influencing ozone concentrations*. Atmos. Environ. 34, 2045–2061.
48. Treshow, M. and Stewart, D. (1973). *Ozone sensitivity of plants in natural communities. Bio*l. Conserv. 5, 209–214.
49. Volz, A. and Kley, D. (1988). *Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century*. Nature 332, 240–242.
50. Winner, W. E., Gillespie, C., Shen, W. S., Mooney, H. A. (1988). *Stomatal responses to SO2 and O3*. In: Schulte – Hostede, S., Darral, N. M., Blank, L. W., Wellburn, A. R. (Eds.), Air Pollution and Plant Metabolism. Elsevier, London, UK, pp. 255–271.
51. Wohlgemuth, H., Mittelstrass, K., Kschieschan, S., Bender, J., Weigel, H.J., Overmyer, K., Kangasja¨rvi, J., Langebartels, C., Sandermann, H. (2002). *Activation of an oxidative burst is a general feature of sensitive plants exposed to the air pollutant ozone*. Plant Cell Environ 25, 717–726
52. Yamasaki, H., Sakihama, Y., Ikehara, N. (1997). *Flavonoid – peroxidase reaction as a detoxification mechanism of plant cells against H2O2*. Plant Physol. 115, 1405–1412.
53. Zarei, S., Ehsanpour, A. A., Abbaspour, J. (2012). *The role of over expression of P5CS gene on proline, catalase, ascorbate peroxidase activity and lipid peroxidation of transgenic tobacco (Nicotiana tabacum L.) plant under in vitro drought stress*. Journal of Cell and Molecular Research, 1, 43–49.

## IMPACT OF TROPOSPHERIC OZONE ON PLANTS

**Georgi Kadinov**
**University of Forestry, Sofia, Bulgaria**

**Abstract**

This paper presents an overview of the mechanism of ozone formation, its precursors, and their sources. Changes in the tendencies of ozone concentrations from the first ozone measurements, more than century ago, until future model prognosis of their development and their impact on vegetation, was examined. The impact of tropospheric ozone on vegetation is expressed in formation of active oxygen species. Active oxygen species cause damages on a ultrastructural level as chloroplast disorganization, stroma granulation, and swelling of mitochondria. Also, tropospheric ozone is a reason for a reorganization of antioxidant defense system. Under its influence, the synthesis of enzymatic and nonenzymatic antioxidants as superoxide dismutase, peroxidase, flavonoids, and anthocyanins, is getting more active. When the antioxidant defense system is unable to cope the oxidative stress caused by ozone, the activity of the photosynthesis decrease and on the upper side of the leaves between the veins appeared small dots, chlorosis, and necrosis. As a result of the survey, have been concluded that tropospheric ozone is a widespread atmospheric pollutant and its concentrations are rising during the last decades. It has a local character and strongly depends on the long-range transfer of precursors. Tropospheric ozone directly influence vegetation. It causes species specific visible injuries on the leaves. Plants exhibit different sensitivities to ozone pollution, as it largely depends on stomata conductance.