

ECOLOGY
AND NOOSPHEROLOGY

ISSN 1726-1112 (Print)
ISSN 2310-4309 (Online)
Ecol. Noospher., 34(2), 112–116
doi: 10.15421/032317

Dynamics of SOD activity and accumulation of TBA-active products in the process of ontogeny of some sod-forming plants in a megalopolis

Ye. S. Boroday, T. Yu. Lykholat, Yu. V. Lykholat

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

Article info

Received 12.09.2023
Received in revised form 18.09.2023
Accepted 29.09.2023

Oles Honchar Dnipro National University, Gagarin Ave., 72, Dnipro, 49010, Ukraine.
E-mail: Lykholat2006@ukr.net

Boroday, Ye. S., Lykholat, T. Yu., Lykholat, Yu. V. (2023). Dynamics of SOD activity and accumulation of TBA-active products in the process of ontogeny of some sod-forming plants in a megalopolis. Ecology and Noospherology, 34(2), 112–116. doi:10.15421/032317

In the conditions of a modern metropolis, green spaces are an integral planning structure, which the issues of not only improving the aesthetics of the city's architecture, but also improving the environmental safety of the population are solved. Lawn grasses play a significant role in improving the microclimate of urban areas; the harmful concentration of gases in the air decreases, the regulation of the thermal regime and humidity is observed. Since almost half of the urban area is occupied by sod-forming plants, it is relevant to study the resistance of these species to anthropogenic impact in an urbanized environment. The aim of the work was to assess the state of the antioxidant system, namely the activity of superoxide dismutase (EC 1.15.1.11), and the accumulation of TBA-active products in the process of ontogeny of sod-forming plants growing in a metropolis. The objects of the study were *Setaria viridis* (L.) Beauv.) and *Elytrígia répens* (L.) Nevski.). It has been established that due to oxidative stress caused by vehicle emissions and industrial aeropollutants, there is an intensification of lipid peroxidation processes in the vegetative organs of *Setaria viridis*, *Elytrigia repens* during all phases of ontogeny. According to the results of the research, it was found that *Elytrigia repens* was more stable in terms of the content of TBA-active products (the level of the indicator in leaves was 30–50 %, roots – 20–44 % higher than the control indices) compared to *Setaria viridis*, for which the excess was 50–70 % (leaves) and 40–62 % (roots). SOD activity is an indicator of resilience to stressors and varies with the duration and intensity of stressors. The obtained results indicate that the enzyme activity of experimental plants in the generative state (increase in enzyme activity by 47.5–38 % in *Elytrigia repens*, by 74–62.5 % in *Setaria viridis*) in contaminated areas was higher than in virginile individuals (SOD activity levels: *Elytrigia repens* (37.5–26.5 %), *Setaria viridis* (60–50 %). The presence of close correlations between the activity of SOD and the content of TBA-active products characterizing the adaptive potential of plant organisms in the vegetative organs of the studied species was established.

Keywords: sod-forming plants; SOD activity; accumulation of TBA-active products; climate change; megapolis

Динаміка активності СОД та накопичення ТБК-активних продуктів у процесі онтогенезу деяких дерноутворюючих рослин в умовах мегаполісу

Є. С. Бородай, Т.Ю. Лихолат, Ю. В. Лихолат

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

В умовах сучасного мегаполісу зелені насадження є невід'ємною планувальною структурою, завдяки якій вирішуються питання не тільки покращення естетичності архітектури міста, а й підвищення екологічної безпеки населення. Значну роль у поліпшенні мікроклімату міських територій відіграють газонні трави: зменшується шкідлива концентрація газів у повітрі, спостерігається врегулювання теплового режиму та вологості. Оскільки майже половину міської території займають саме дерноутворюючі рослини, актуальним є дослідження стійкості цих видів до антропогенного впливу в умовах

урбанізованого середовища. Метою роботи була оцінка стану антиоксидантної системи, а саме активності супероксиддисмутази (ЕС 1.15.1.11), та накопичення ТБК-активних продуктів у процесі онтогенезу дерноутворюючих рослин, які зростають в умовах мегаполісу. Об'єктами дослідження були мишій зелений (*Setaria viridis* (L.) Beauv.) та пирій повзучий (*Elytrígia répens* (L.) Nevski.). Установлено, що через окиснювальний стрес, який спричиняють викиди автотранспорту та промислові аерополютанти, відбувається інтенсифікація процесів пероксидного окиснення ліпідів у вегетативних органах *Setaria viridis*, *Elytrigia repens* протягом усіх фаз онтогенезу. За результатами досліджень виявлено, що за показником вмісту ТБК-активних продуктів більш стійким є *Elytrigia repens* (рівень показника у листках на 30–50 %, коренях – 20–44 % перевищував контрольні індекси) порівняно з *Setaria viridis*, для якого перевищення становило 50–70 % (листки) та 40–62 % (корені). Активність СОД є показником стійкості до стрес-факторів і змінюється від тривалості та напруженості стресових чинників. Отримані результати свідчать, що активність ферменту дослідних рослин у генеративному стані (підвищення активності ферменту на 47,5–38 % у *Elytrigia repens*, 74–62,5 % у *Setaria viridis*) на забруднених ділянках була вищою, ніж у віргінільних особин (рівні активності СОД: *Elytrigia repens* (37,5–26,5 %), *Setaria viridis* (60–50 %). Рівень зростання активності ферменту у вегетативних органах залежав від ступеня забруднення дослідних ділянок. Установлено наявність тісних кореляційних зв'язків між активністю СОД і вмістом ТБК-активних продуктів у вегетативних органах досліджуваних видів, що характеризує адаптивний потенціал рослинних організмів.

Ключові слова: дерноутворюючі рослини; активність СОД; накопичення ТБК-активних продуктів; зміна клімату; мегаполіс

Вступ

Останні дані свідчать про те, що серед багатьох несприятливих факторів зміна клімату суттєво впливає на перебіг фізіолого-біохімічних процесів рослинних організмів, що проявляється у порушенні фенологічних ритмів і зниженні їх продуктивності. Стресовий вплив змін клімату в умовах промислового міста та проблеми адаптації й стійкості деревних, газонних та квітково-декоративних рослин потребує більш детального дослідження за відсутності великого обсягу даних (Lykholat et al., 2019; Savosko et al., 2021[a]; Savosko et al., 2021[b]).

Як відомо, газоноутворюючі трави виконують як декоративні, так і екологічні та санітарно-гігієнічні функції завдяки своїм пилозатримуючим властивостям, тому створення газонів в умовах міста є одним з найефективніших засобів оптимізації середовища, що сприяє вільному провітрюванню території, очищенню повітря від пилу і газів, поліпшенню мікроклімату (Hryhoriuk et al., 2014).

В умовах урбанізованого середовища трансформації зазнають в першу чергу біохімічні властивості, фізіологія і, як наслідок, морфоструктура організмів. Ступінь їх ураженості залежить від концентрації токсичних речовин і тривалості їх дії. Високоякісне функціонування рослинного організму можливе лише у відносно вузькому діапазоні коливань зовнішніх чинників, у так званих адекватних умовах. Життєдіяльність рослин у стресових умовах потребує включення додаткових механізмів їх регуляторних систем з метою забезпечення стаціонарного стану внутрішнього середовища та відновлення стану рівноваги організму (Kovalenko et al., 2018; Xie et al., 2019; Kovalenko et al., 2020; Lykholat et al., 2021).

Зміни клімату впливають на тепловий режим довкілля і, як наслідок, спостерігаються зміни в процесах метаболізму, росту, розвитку і продуктивності рослин. В умовах Степового Придніпров'я серед абіотичних чинників пошкодження газонів є саме високотемпературний стрес, обумовлений підвищенням температури і низькою вологістю повітря, що спричиняє як прямі, так і опосередковані пошкодження газонних рослин (Effects .., 2021).

Перегріву газонних рослин сприяє також скупчення пилу в атмосфері у вигляді завислих у повітрі дрібних (діаметром 10^{-2}–10^{-4} см) твердих частинок, які здатні за відсутності вітру, на відміну від диму, осідати на листки. Рослини акумулюють речовини коренями та листками. Процеси адсорбції їх корінням та листям різноманітні: в першому випадку вони проходять через клітинну стінку, без наявності кутикули, а в другому – або через продихи, або через кутикулу епідермісу. Що стосується листків, то в рослині функціонують обидва шляхи проникнення: через кутикулу та через продихи одночасно (Hryhoriuk et al., 2014).

За дії полютантів різного походження на живі організми проявляються неспецифічні реакції, однією з яких є посилення вільно-радикальних процесів та підвищення активності антиоксидантних ферментів, зокрема супероксиддисмутази (Lykholat & Chernaya, 1999; Ahmad et al., 2010; Boran & Ugur, 2017; Hasanuzzaman at al., 2017; Lykholat et al., 2019; Li et al., 2020; Jadczak Sanna et al., 2020; Khromykh et al., 2022; Sanna et al., 2022).

За негативної дії на рослинний організм важких металів, які містяться у промислових викидах та у вихлопах автотранспорту, спостерігається інтенсифікація процесів пероксидного окиснення ліпідів і відповідно збільшення вмісту ТБК-активних продуктів у вегетативних органах рослин. За рахунок підвищення активності СОД відбувається адаптація газонних трав до умов забруднення середовища важкими металами (Hryhoriuk et al., 2014).

Отже, дослідження даних процесів може використовуватись у моніторингових дослідженнях оцінки стійкості видів.

У зв'язку з вищевикладеним метою даної роботи є аналіз динаміки накопичення ТБК-активних продуктів як показника інтенсивності процесів пероксидного окиснення ліпідів та активності СОД вегетативних органів дерноутворюючих трав у процесі онтогенезу за хронічного впливу полютантів в умовах мегаполісу.

Матеріали та методи досліджень

Об'єктами дослідження були газонні трави: мишій зелений (*Setaria viridis* (L.) Beauv.) та пирій повзучий (*Elytrígia répens* (L.) Nevski) у віргінільному, генеративному та субсенільному вікових станах.

Дослідні зразки відбирали на проспекті Б. Хмельницького та біля Дніпровського металургійного заводу (м. Дніпро). Умовним контролем слугували зразки рослин, які зростали на території ботанічного саду ДНУ. Активність СОД (ЕС 1.15.1.11) та визначення ТБК-активних речовин визначали за загальноприйнятими методиками (Vinnychenko et al., 2014). Активність СОД визначали за ступенем інгібування відновлення нітросинього тетразолію (НСТ) в присутності нікотинамідаденіндинуклеотиду (НАДН) та феназинметасульфату (ФМС). До складу реакційної суміші входили 1,2 мл фосфатного буфера (0,15 М, рН 7,8), 0,1 мл ФМС, 0,3 мл НСТ, 0,2 мл НАДН. Супернатант додавали в інкубаційну суміш у кількості 0,3 мл. Реакцію запускали додаванням НАДН і зупиняли через 15 хв. 1 мл льодяної оцтової кислоти. Інтенсивність забарвлення вимірювали при довжині хвилі 540 нм. Для визначення вмісту ТБК-активних речовин наважку досліджуваного матеріалу (0,5 г) подрібнювали ножицями й розтирали у фарфоровій ступці з 3 мл дистильованої води. Далі до гомогенату додавали 3 мл ТХО й гомогенізували вдруге. З отриманого гомогенату відбирали у мірні пробірки з притертими пробками дві проби по 2 мл. До однієї з проб додавали рівний об'єм (2 мл) ТХО, у подальшому цю пробу використовували як контроль при спектрофотометрії. До другої проби доливали 2 мл розчину ТБК. Після цього проби інкубували 30 хв. на

киплячій водяній бані, потім охолоджували та центрифугували 10 хв. при 3000 об/хв. Супернатант акуратно відбирали шприцом у пробірки та вимірювали на спектрофотометрі (або фотоелектроколориметрі) при λ=532 нм. Кількість МДА у рослинній тканині виражали у наномолях МДА на 1 г сирої маси.

Дослідження проводили в триразовій повторності. Обробку результатів дослідження проводили за допомогою статистичного програмного забезпечення Statistica 7.1 StatSoft.

Результати та їх обговорення

Установлено, що досліджувані види газонних трав відрізнялись між собою за вмістом вторинних продуктів ліпопероксидації як за контрольних умов існування, так і за впливу аерополютантів. Концентрація ТБК–активних продуктів у надземній частині мишію зеленого у віргінільному стані (*v*) перевищувала відповідний показник у пирію повзучого на 12 % в контрольному фітоценозі та на 29–32 % в антропогенно забруднених фітоценозах (рис. 1). На наступних етапах розвитку (*g* − *ss*) ця тенденція збільшення зберігалась: 46–79 % (ботсад ДНУ) і 65–67 та 81–97 % (ДМЗ). У коренях відмічено подібну закономірність.

Від контрольного значення вміст малонового діальдегіду за всіх типів антропогенного забруднення у листках віргінільних особин *Elytrigia repens* зростав на 30 і 45 % на ділянках II та III, а в коренях – на 20 і 35 %.

У генеративному віковому стані різниця між рослинами дослідних і контрольного фітоценозів становила 40 і 55 % (листки) та 31 і 44 % (корені).

На наступному субсенільному етапі розвитку ця тенденція перебільшення концентрації ТБК-активних продуктів на 42–50 % у надземних і на 35–42 % у підземних органах зберігалась.

У листках *Setaria viridis* фітоценозів, забруднених вихлопами автотранспорту і промисловими аерополютантами, вміст ТБК-активних продуктів набагато перевищував контрольний рівень: віргінільний стан на 50 і 71 % відповідно. У коренях на цьому етапі онтогенезу вміст досліджуваних сполук був збільшеним на 40 і 60 %. Генеративна стадія розвитку мишію зеленого відзначена подальшим накопиченням вторинного продукту ПОЛ у листках на 60–75 %, коренях – на 51–62 %.

Максимальні значення притаманні рослинам у субсенільному стані. При цьому рівень ТБК – продуктів збільшений на 54–65 % у надземних та 43–55 % – у підземних органах (рис. 2).

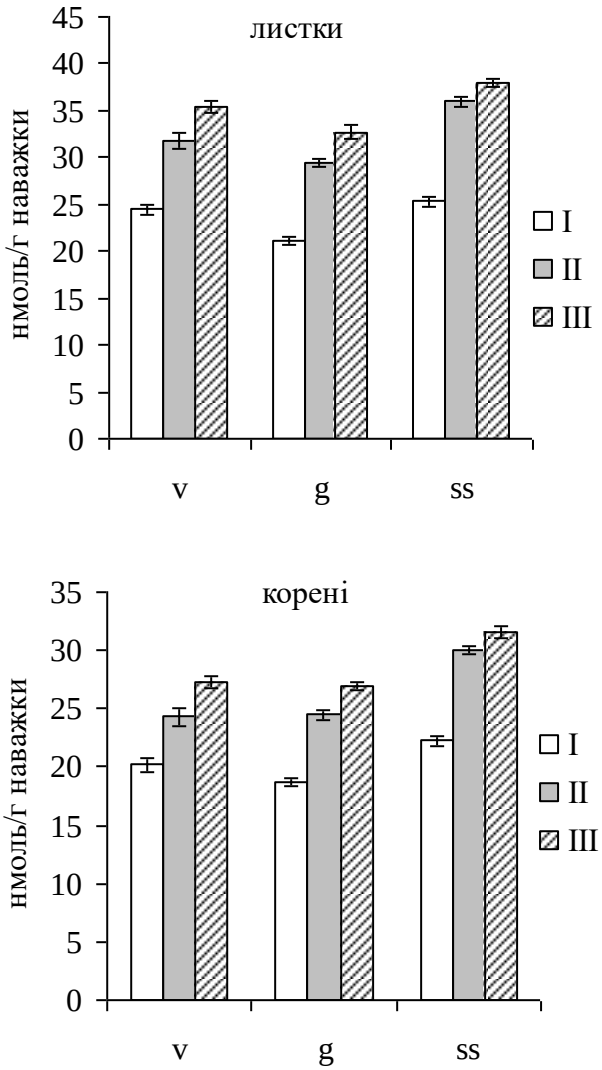


Рис. 1. Динаміка вмісту ТБК-активних продуктів у вегетативних органах *Elytrigia repens*: I – ботсад ДНУ, II – просп. Б. Хмельницького, III –ДМЗ; *v* – віргінільний, *g* – генеративний та *ss* – субсенільний вікові стани

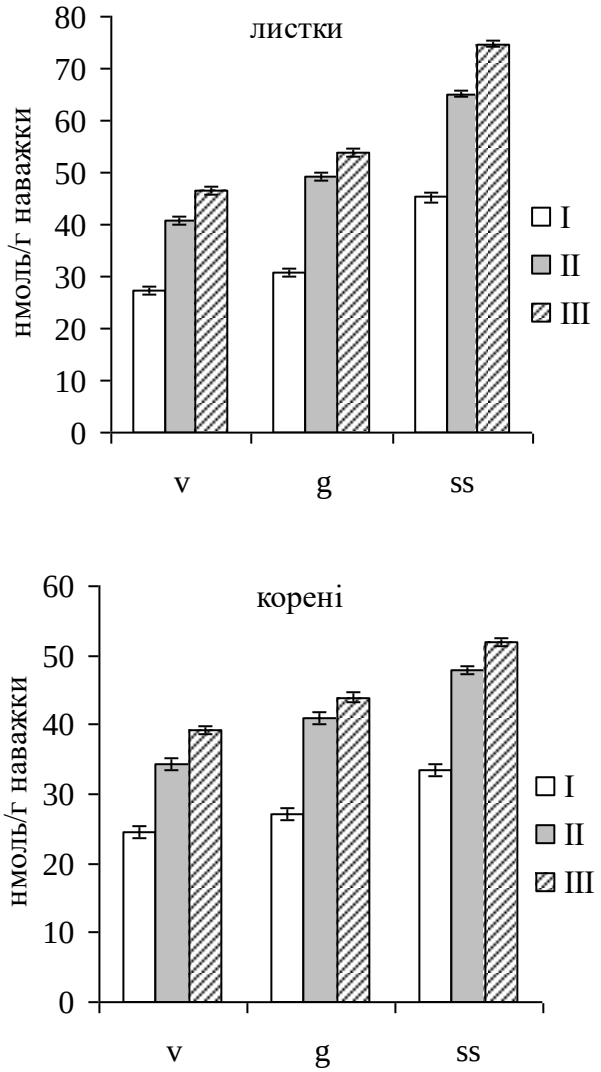


Рис. 2. Динаміка вмісту ТБК-активних продуктів у вегетативних органах *Setaria viridis*: I – ботсад ДНУ, II – просп. Б. Хмельницького), III – ДМЗ; *v* – віргінільний, *g* – генеративний та *ss* – субсенільний вікові стани

Згідно з отриманими даними хронічне антропогенне забруднення міського фітоценозу промисловими та автомобільними аерополютантами індукувало окиснювальний стрес у дослідних рослин *Setaria viridis* та *Elytrigia repens*, що впродовж онтогенезу проявлялось у збільшенні вторинних продуктів ліпопероксидації. Процеси ПОЛ інтенсивніше проходили в особин мишію зеленого, ніж у пирію повзучого, що, ймовірно, свідчить про активнішу систему захисту та стійкість останнього до умов існування.

Експериментально встановлено, що активність супероксиддисмутази в надземній масі віргінільних рослин пирію з контрольної ділянки перевищувала значення ферменту мишію на 65 %, а з території просп. Б. Хмельницького і ДМЗ – на 43 і 41 %. У генеративному віковому стані злакових різниця між активністю становила 74 і 47–48 % відповідно. Рівень активності СОД *Elytrigia repens* (субсенільна фаза) з контрольної ділянки перевищував таковий у *Setaria viridis* на 62 %, а дослідної – на 34–21 % (рис. 3).

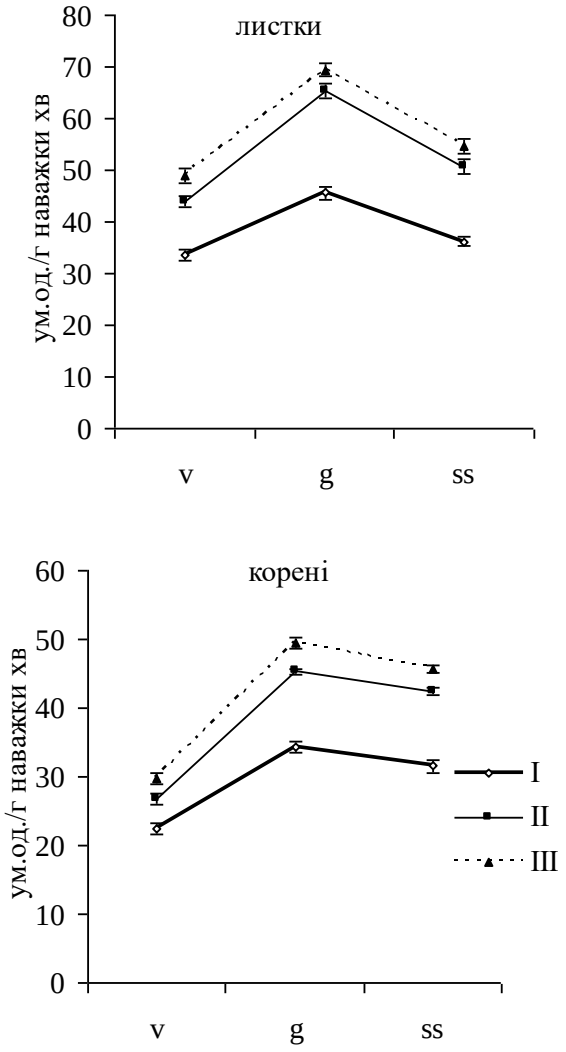


Рис. 3. Сезонна динаміка активності супероксиддисмутази у вегетативних органах *Elytrigia repens*: I – ботсад ДНУ, II – просп. Б. Хмельницького, III –ДМЗ; *v* – віргінільний, *g* – генеративний та *ss* – субсенільний вікові стани

Генеративний стан *Elytrigia repens* відзначився наростанням активності СОД порівняно з попереднім етапом онтогенезу. У рослин, що зростають на узбіччі просп. Б. Хмельницького, відмічена суттєва активація ферменту на 43 (листки) і 32 % (корені). Подібну тенденцію зафіксовано і для особин, зібраних поблизу ДМЗ: листки на 52, корені – на 44 % вище контролю.

Перехід рослин пирію повзучого до субсенільного стану пов'язаний із деяким зниженням активності СОД порівняно з періодом g. Однак слід відмітити, що відносно контрольних зразків перевищення становило 40–51 % (листки) і 35–45 % (корені).

Для рослин мишію зеленого, що зростають в антропогенного забруднених фітоценозах, реєстрували аналогічну тенденцію у зміні активності СОД (рис. 4). Так, на початку онтогенезу (v-стадія) значення активності ферменту вегетативних органів були збільшені на 50–40 % (просп. Б. Хмельницького) і на 70–60 % (ДМЗ).

Максимальні показники активності зафіксовано у генеративних рослин. Рівень активності СОД у листках перевищував контрольний у цей час на 68 % (за впливу вихлопів автотранспорту) і 80 % (промислові викиди). У коренях відповідно на 52 і 73 %.

У період досягнення рослин субсенільного стану спостерігали зниження активності СОД порівняно з попереднім етапом онтогенезу. При цьому рівень ферментативної активності перевищував контрольний на 70 та 60 % за хронічної дії полютантів з проспекта Б. Хмельницького і на 102–91 % за впливу промислового навантаження.

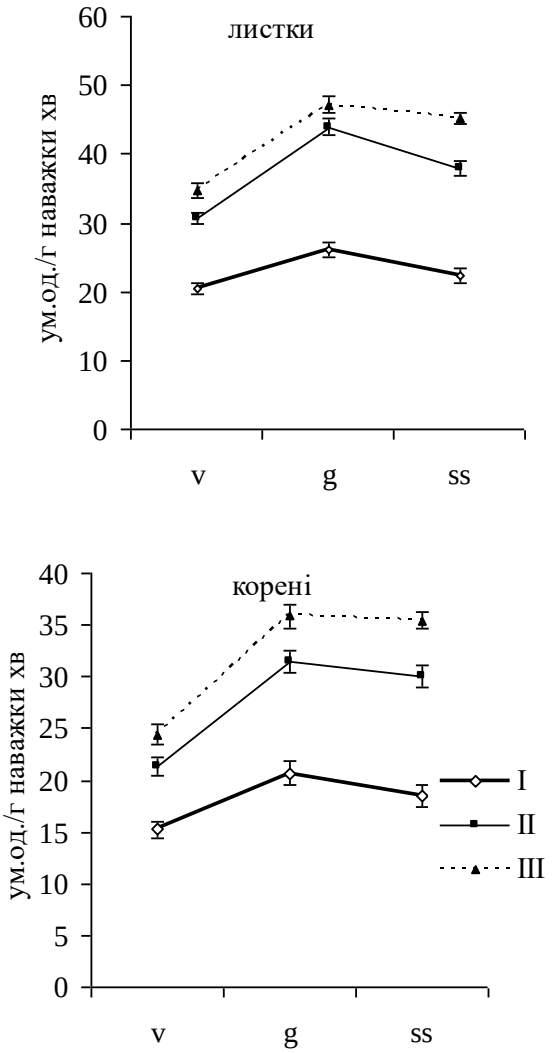


Рис. 4. Сезонна динаміка активності супероксиддисмутази у вегетативних органах *Setaria viridis*: I – ботсад ДНУ, II – просп. Б. Хмельницького, III – промислові аерополютанти («ДМЗ»), *v* – віргінільний, *g* – генеративний та *ss* – субсенільний вікові стани.

Таким чином, одним з механізмів адаптації рослин *Setaria viridis* та *Elytrigia repens* до мінливої напруженості факторів міського середовища є зміна активності ряду ферментативних компонентів антиоксидантного захисту на всіх етапах онтогенетичного розвитку. При посиленні антропогенного навантаження оточуючого середовища відбувалось посилення активності СОД. Характер змін активності досліджуваних ферментів-детоксикаторів активних форм кисню за хронічної дії аерополютантів дозволив визначати ступінь адаптаційних здібностей пирію повзучого, мишею зеленого як високий і дозволив виділити райони з найвищим рівнем забруднення (ДМЗ). Це, у свою чергу, вносить певний вклад у розшифрування механізмів екологічної стійкості рослин в урбофітоценозах і дає можливість оцінити комплексний вплив різних факторів, а також прогнозувати наслідки такого впливу.

Висновки

Установлено, що за дії викидів автотранспорту та промислових аерополютантів, які індукують окиснювальний стрес, відбувається інтенсифікація процесів пероксидного окиснення ліпідів у вегетативних органах *Setaria viridis* та *Elytrigia repens* протягом усіх фаз онтогенезу. Показано, що у дерноутворюючих рослин, що зазнають хронічного антропогенного впливу протягом онтогенезу, відбувається накопичення ТБК-активних продуктів (маркерів стресової дії чинника): пирій повзучий від 30 до 55 % вище контролю (листки) та від 20 до 44 % (корені); мишій зелений – від 50 до 75 % (листки), від 40 до 62 % (корені). Серед двох досліджених газоноутворюючих трав стійкішим за показником вмісту ТБК-активних продуктів є *Elytrigia repens*, що проявляється в меншому накопиченні даного продукту ліпопероксидації порівняно з *Setaria viridis*. Це, імовірно, обумовлено особливостями властивостей мембранних структур клітин та швидкістю формування адаптивних реакцій пирію повзучого. Виявлено, що адаптація дерноутворюючих рослин до умов існування відбувається за рахунок стимуляції функціонування антиоксидантного ферменту супероксиддисмутази. У віргінільних особин із антропогенно забруднених ділянок відзначено високі рівні активності СОД: пирій повзучий (37,5–26,5 %), мишій зелений (60–50 %). Генеративний стан відзначався зростанням активності ферменту на 47,5–38 % у *Elytrigia repens*, на 74–62,5 % у *Setaria viridis*.

Динаміка зміни активності СОД при переході від генеративної до субсенільної стадії мала тенденцію до деякого зниження порівняно з попередньою фазою у всіх досліджуваних видів. Відносно контрольних рослин цей показник збільшено на 45,5–40 % у *Elytrigia repens*, на 95–75,5 % у *Setaria viridis*.

Рівень зростання активності ферменту у вегетативних органах визначався ступенем забруднення дослідних ділянок.

Показники активності СОД і вмісту ТБК-активних продуктів можна з великою достовірністю використовувати для оцінки стану дерноутворюючих рослин у стресових умовах та їх стійкості до аеротехногенного забруднення.

References

Ahmad, P., Jaleel, C. A., Salem, M. A., Nabi, G., Sharma, S. (2010). Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. Crit Rev Biotechnol., 30(3), 161–175.

Boran, R., Ugur, A. (2017). The mutagenic, antimutagenic and antioxidant properties of Hypericum lydium. Pharm Biol., 55(1), 402–405.

Effects of pollution and climate change on the ecosystem components (2021). Edited by Y. V. Lykholat. Praha, Oktan Print. 160 p.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Hossain, M. S., Mahmud, J. A., Rahman, A., Inafuku, M., Oku, H., Fujita, M. (2017). Coordinated Actions of Glyoxalase and Antioxidant Defense Systems in Conferring Abiotic Stress Tolerance in Plants. Int J Mol Sci., 18(1), 200.

Hryhoriuk, I. P., Yavorovskyi, P. P., Lykholat, Yu. V. (2014). Tekhnolohii vyroshchuvannia i biorehuliatsiia stiikosti hazonnykh roslyn u miskomu urbanizovanomu seredovyshchi: monohrafiia. [Cultivation technologies and bioregulation of lawn plant resistance in the city urban environment: monograph]. Kyiv, NUBIP of Ukraine (in Ukrainian).

Jadczak, P., Kulpa, D., Drozd, R., Przewodowski, W., Przewodowska, A. (2020). Effect of AuNPs and AgNPs on the Antioxidant System and Antioxidant Activity of Lavender (Lavandula angustifolia Mill.) from In Vitro Cultures. Molecules, 25(23), 5511.

Khromykh, N., Lykholat, Y., Didur, O., Sklyar, T., Davydov, V., Lavrentieva, K., Lykholat, T. (2022). Phytochemical profiles, antioxidant and antimicrobial activity of Actinidia polygama and A. arguta fruits and leaves. Biosyst. Divers. 2022, 30, 39–45.

Kovalenko, I. M., Klymenko, G. O., Yaroschuk, R. A. et al. (2018). Optimization of Ginkgo biloba cultivation technology in open soil conditions. Regulatory Mechanisms in Biosystems, 9(4), 535–539.

Kovalenko, I. M., Klymenko, G. O., Melnik, T. I., Yaroshchuk, R. A., Zherdetska, S. V., Su, Y., & Lykholat, O. A. (2020). Morphogenesis and vitality of seedlings of Ginkgo biloba in outdoor conditions. Regulatory Mechanisms in Biosystems, 11(1), 22–28.

Li, H., Wang, H., Wen, W., Yang, G. (2020). The antioxidant system in Suaeda salsa under salt stress. Plant Signal Behav., 15(7), 1771939.

Lykholat, E. A., Chernaya, V. I. (1999). Parameters of peroxidation and proteolysis in the organism of the liquidators of Chernobyl accident consequences. Ukr. biokhim. zhurn., 71(3), 82–85.

Lykholat, Y. V., Khromykh, N. O., Didur, O. O. et al. (2021). Features of the fruit epicuticular waxes of Prunus persica cultivars and hybrids concerning pathogens susceptibility. Ukrainian Journal of Ecology, 11(1), 261–266.

Lykholat, T. Yu., Lykholat, O. A., Marenkov, O. M., Kulbachko, Yu. L., Kovalenko, I. M. & Didur, O. O. (2019). Xeneostrogenes influence on cholinergic regulation in female rats of different age. Ukrainian Journal of Ecology, 9(1), 240–243.

Sanna, D., Fadda, A. (2022). Role of the Hydroxyl Radical-Generating System in the Estimation of the Antioxidant Activity of Plant Extracts by Electron Paramagnetic Resonance (EPR). Molecules, 27(14), 4560.

Savosko, V., Komarova, I., Lykholat, Y., Yevtushenko, E. & Lykholat, T. (2021a). Predictive model of heavy metals inputs to soil at Kryvyi Rih District and its use in the training for specialists in the field of Biology. Journal of Physics Conference Series 1840, 012011.

Savosko, V., Bielyk, Yu., Lykholat, Yu., Heilmeier, H., Grygoryuk, I., Khromykh, N., Lykholat, T. (2021b). The total content of macronutrients and heavy metals in the soil on devastated lands at Kryvyi . Iron Mining & Metallurgical District (Ukraine). Journal of Geology, Geography and Geoecology, 30 (1), 153–164.

Vinnychenko, O. M., Bilchuk, V. S., Lykholat, Yu. V., Rossykhina-Halycha, H. S., Shupranova, L. V. (2014). Spetspraktykum z fiziolohii ta biokhimii roslyn. [Special practicum on plant physiology and biochemistry]. FOP Serednyak T. K., 224 p. (in Ukrainian).

Xie, X., He, Z., Chen, N., Tang, Z., Wang, Q., Cai, Y. (2019). The Roles of Environmental Factors in Regulation of Oxidative Stress in Plant. Biomed Res Int., 8, 9732325.