

УДК 504.054:574.3; 504.73.054; 581.5

СПОСІБ ІНДИКАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВІТРЯНО ЗАБРУДНЕНОЇ СИСТЕМИ «РОСЛИНА – ҐРУНТ»

В. Самохвалова *, В. Ворон **

* ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського»

вул. Чайковського, 4, Харків 61024, Україна

e-mail: v.samokhvalova@mail.ru

** УкрНДІЛГА імені Г.Н. Висоцького

вул. Пушкінська, 86, Харків 61024, Україна

Розроблено новий спосіб діагностування та оцінки стану забрудненої системи «рослина – ґрунт» поллютантами неорганічного походження (SO₂, важкі метали) за повітряного шляху надходження забруднювачів до деревних рослин, використання маркерних показників функціонування, структури та спрямованості фізіолого-біохімічних процесів деревних рослин, визначення рівнів вмісту активних форм забруднювачів у системі «повітря – рослина – ґрунт», за яких проявляється погіршення екологічного її стану, токсичність аеротехногенних поллютантів. Доведено, що коректність, достовірність і ефективність діагностики й оцінки екологічного стану системи «рослина – ґрунт» пов'язана з урахуванням ієрархічності функцій, процесів та структурної організації системи, зворотних зв'язків, визначенням їхнього кількісного рівня за розробки системи індикаторних показників фізіолого-біохімічних процесів, функцій і анатомоморфологічного статусу біологічної складової системи за впливу забруднення.

Ключові слова: *Pinus sylvestris* L., аеротехногенне забруднення, важкі метали, діагностування, SO₂, оцінка, система рослина – ґрунт, спосіб.

Діагностика й оцінка екологічного стану системи «рослина – ґрунт» є важливими складовими в агроекології, екологічному нормуванні, екоотоксикології, екологічній експертизі, при розробці концептуальних основ моніторингу, екологічного аудиту техногенно забруднених територій, при оцінці небезпеки та прогнозуванні токсичної дії забруднювачів, розробленні заходів детоксикації забруднених територій або проведенні комплексу технологічних, фізико-хімічних і біологічних заходів щодо санації (інактивації токсичності) забруднених ґрунтів та земель і, як наслідок, для зниження інтенсивності процесів деградації лісових екосистем, які зазнали впливу аеротехногенного навантаження. Тому розробка нових способів і підходів до діагностування й оцінки довкілля за впливу забруднення є актуальною та важливою як у теоретичному, так і в прикладному аспекті.

Система детектування флуоресценції для визначення основних параметрів рослинності [6], що охоплює реєстрацію рівня хлорофілу в рослинах з визначенням відносних змін його вмісту за листовою площею та множенням одержаного співвідношення на заданий калібрувальний коефіцієнт, дає змогу отримати абсолютне значення концентрації хлорофілу в рослинах. Останнє є індикатором стадії росту рослин та умов довготривалого стресу, що допомагає контролювати їхній розвиток, термін і кількість внесених добрив на основі визначення концентрації хлорофілу та встановленої кореляції з вмістом хімічних елементів у рослинах. Проте спосіб є багатовитратним. Необхідно мати

специфічне обладнання та високий рівень кваліфікації операторів системи вимірювання, що значно підвищує собівартість необхідних операцій відповідно до запропонованого алгоритму, звужує спектр його запровадження та використання.

Інший відомий спосіб [8] передбачає виявлення зон екологічної небезпеки та зон надзвичайних екологічних ситуацій на основі використання критеріїв оцінки змін стану довкілля і здоров'я населення, критеріїв оцінювання стану повітря, ґрунтів селітебних територій. Вибір критеріїв оцінки стану ґрунтів визначається специфікою їх розташування, генезисом, буферністю, направленістю використання. Основними показниками ступеня екологічного неблагополуччя є критерії фізичної деградації, хімічного та біологічного забруднення певної території. Серед інших критеріїв оцінки екологічної ситуації спосіб передбачає біохімічну оцінку за використання основних (співвідношення C:N, Ca:P, Ca:Sr у поверхневих водах, ґрунтах, рослинах, вміст біологічно активних мікроелементів (ME) та додаткових показників (співвідношення макроелементів у рослинах і кормах, вміст ME в рослинах), з урахуванням площі аномального їх вмісту. Проте спосіб не враховує того, що екологічно несприятливі території характеризуються різкими змінами хімічного складу рослин, співвідношень макро- і ME системи "ґрунт – рослина" під впливом як техногенного, так і природного факторів. За характеру багатовитратності, трудомісткості рекомендованого алгоритму та важливості виявлення негативної дії токсикантів саме на рівні, коли зміни в системі є зворотними, спосіб не враховує того, що відповідно до сучасних теоретичних уявлень функціонування біологічної системи, а саме спрямованість та інтенсивність фізіолого-біохімічних процесів є інтегральними показниками їх стану. Окрім того, під впливом як техногенного, так і природного факторів екологічно несприятливі території характеризуються різкими змінами співвідношень фізіологічних процесів (асиміляція, дисиміляція) рослин, що впливають на якісний склад продуктів синтезу і розкладу, визначають кількісні та якісні показники обмінних процесів у системі «ґрунт-рослина». Індикація та оцінка процесів на рівні функціонування системи є важливими для встановлення біологічної, гігієнічної якості продукції агроценозів, технологічних властивостей сировини, для визначення спрямованості й інтенсивності процесів синтезу та розкладу з метою її подальшої переробки, якості готової продукції.

Підхід [7] включає комплексний моніторинг ґрунтового покриву за використання дистанційного зондування, відбору проб і визначення стану води, ґрунтів, рослин, повітря, актуалізацію карт. На підставі їх аналізу приймають рішення про доцільність застосування заходів щодо усунення причин, які погіршують стан біоценозу. Усі проби перед аналізом на вміст токсикантів тестуються на інтегральну токсичність за використання мікроорганізмів. Проте застосування дистанційного зондування обмежено у випадку покриття поверхні ґрунту рослинністю та рослинними рештками, що значно знижує точність методу, підвищує недостовірність висновків, вартість проведення комплексного моніторингу, з огляду на необхідність використання коштовної апаратури, придбання космічних знімків. Спосіб не містить детального аналізу результатів отриманої дистанційної інформації. Взяття проб з однієї глибини однотипного біоценозу зі всіх точок відбору проб однієї ділянки обстеження та їхнє подальше об'єднання й перемішування знижує точність просторового оцінювання під час проведення комплексного моніторингу ґрунтового покриву. Окрім того, за використання знімків високої просторової роздільної здатності та приладів глобального позиціонування у процесі відбору проб на певних ділянках території обстежень можливим є також використання інших шляхів підвищення точності оцінки порівняно з представленим способом. Існує ряд альтернативних методів моніторингу, які

дозволяють розв'язати завдання за значного зниження собівартості проведення досліджень без залучення багатовитратного методу дистанційного зондування.

Відомо, що використання мікроорганізмів з метою діагностики й оцінки токсичності у разі забруднення едафотопів має певні обмеження, виходячи зі специфіки функціонування мікробних ценозів ґрунту за умов забруднення та можливої їх неспецифічної реакції (стимулювання функціонування) на вплив поллютантів.

Отже, відомі способи діагностики й оцінки забруднення характеризуються різними рівнями ефективності їх використання за умов сталого або перманентного впливу аеротехногенного забруднення системи «ґрунт-рослина», однак не передбачають визначення маркерів прояву впливу забруднення ВМ та SO₂, їхніх діагностичних характеристик на різних рівнях структурної організації біосистеми. Останні є засобом діагностування, оцінки функціонування системи з метою запровадження заходів з інактивації токсичності, відновлення системи «рослина – ґрунт».

Дослідження охоплювали патентний пошук, підготовчий, польовий, аналітичний і камеральний етапи робіт.

Об'єктом патентного пошуку слугували наукові запатентовані розробки спеціалістів України та країн СНД щодо діагностування й оцінки стану системи «рослина – ґрунт», визначення і прогнозування екологічного стану рослин у зонах сталих та перманентних аеротехногенних забруднень. Методи досліджень – експертна оцінка, аналізування, співставлення.

Польовий етап робіт включав проведення моніторингу ґрунтів і деревних рослин у зонах сталої дії фактора аеротехногенного забруднення (натурні дослідження в зонах константного впливу основних центрів промислових емісій ВМ та SO₂ від ВАТ «Балцем», Зміївська ТЕС ВАТ «Центренерго» Харківської області). Досліджували деревні рослини родини соснових (*Pinaceae*) Савінківського, Балакліївського, Високобірського, Андріївського, Задонецького та Васищівського лісництв. Вибір об'єкта досліджень обумовлений його поширенням, господарським значенням і можливістю використання протягом року. Відбір зразків ґрунту проводили за відомими методами [3–5], відбір зразків деревних рослин згідно з методикою В. С. Ніколаєвського [10]. Пробні площадки закладали в районах з контрастними рівнями аеротехногенного забруднення.

Визначення рівнів вмісту хімічних елементів у пробах рослин (визначення вмісту ВМ як елементів – індикаторів хвої дерев певної території, після їх озолення [2]) проводили з використанням аналітичного методу атомноабсорбційної спектрофотометрії (*C-115-M*), чинних методик, нормативних документів [4, 9]. Паралельно вивчали зміни показників вмісту різних хімічних елементів у ґрунті. Рівень їхнього вмісту діагностували при їх визначенні, оцінку проводили за рівнем їхнього накопичення у ґрунті при забрудненні порівняно з контролем, регіональними показниками фоновому вмісту; для рослин – результати визначення зіставляли з існуючими ГДК.

Визначення фізіолого-біохімічних і анатомо-морфологічних показників проводили за існуючими методами: вміст хлорофілу й інших пігментів – за використання фотоелектроколориметра *КФК-2* [1], анатомо-морфологічні та фізіолого-біохімічні показники – відповідно до існуючих методик [10, 12] з подальшим кількісним визначенням параметрів тестових показників деревних рослин.

Методика проведення морфометричного аналізу містила таке: на кожній пробній площі з десяти дерев (для контрольних ділянок - вік 25–30 років, висота 10 м, діаметр стовбура 10 см, крони добре розвинені, мають правильну форму, пагони добре охвоєні,

присутня хвоя 1–5 років темно-зеленого кольору) зрізують гілки другого-третього порядків у середній частині крони, вимірюють лінійний приріст пагонів, довжину хвої, кількість хвоїнок на одиницю довжини пагона, суху вагу 100 хвоїнок, частоту некротичних ділянок за проведення порівняльного аналізу деревних рослин і врахування впливу різних рівнів аеротехногенних емісій. Порівняння хвої з різних пробних площ за анатомічними особливостями проводили шляхом виготовлення тимчасових мікропрепаратів за використання мікроскопа *Биолам Р-17*, фотографування за допомогою мікрофотонасадки *МФН-12*.

Вегетаційний дослід щодо моделювання імпактних рівнів аеротехногенного забруднення SO₂ проводили у трикратній повторюваності, з використанням 2-річних саджанців *Pinus sylvestris* L. як фітотесту аеротехногенного забруднення.

Дослідження проводили в камерах з регульованим режимом температури (діапазон робочих температур +15°C–+45°C за коливань не більше 2°) та вологості (діапазон вологості – 50–75% за коливань не більше 5%). Рівні оптичного опромінювання у ФАР (400–700 нм) на відстані 0,3 м від захисного скла – 140–280 Вт/м² за 5–15% нерівномірності. Концентрацію SO₂ визначали за допомогою регулятора витрачання газу. Діапазон доз 0,1–0,2 – 0,3–0,5 мг/м³ SO₂ (ГДК SO₂ для людини – 0,5 мг/м³).

Система фумігації рослин містила блок дозування (джерело SO₂, штуцер, ротаметр, вентиль змішування з SO₂, трійник, вентиль тонкого регулювання, насос, повітряноструминний насос, барботер) і дозатор газу (камера, вентилятор, поглинальний пристрій, захисний патрон, аспіратор ЭА-1А).

Проводили фумігацію (газацію) рослин, визначали концентрацію SO₂, що дало змогу дослідити вплив як окремих факторів, так і їх комплексу з одночасним вивченням співвідношення дози фітотоксиканта, реакції рослин з подальшим виявленням діапазонів негативного впливу. Період фумігації – 30 хв. Початок – кінець травня, термін – 12–13 годин. Таким чином дослідження та виявлення основних закономірностей змін фізіолого-біохімічних, анатомо-морфологічних показників саджанців сосни звичайної проводили за відомих рівнів забруднення SO₂, що забезпечило виявлення діапазону токсичності ангідриду в системі «повітря – рослина – ґрунт», враховуючи безпосередній вплив кислих газів (на прикладі SO₂) забрудненого повітря на рослини і опосередковано через ґрунт.

Аналіз патентної документації свідчить про те, що найближчим аналогом за технічною суттю й результатом, що досягається, є спосіб визначення ділянок забруднення довкілля [11]. Спосіб включає визначення ділянок забруднення, відбір проб гумусового горизонту ґрунту, підготовку проб, аналіз ґрунтових проб на валовий вміст ВМ, відбір проб рослин для визначення рухомих форм ВМ шляхом проведення кислотного їх екстрагування, визначення вмісту хлорофілу в рослинних пробах шляхом екстракції етанолом з наважки проби з подальшим фотометричним визначенням за параметрами оптичної щільності. За результатами проводять статистичну обробку отриманих даних щодо ґрунтів, рослин з визначенням позитивних аномальних значень ВМ у ґрунтах, рослинах і негативних – щодо вмісту хлорофілу рослин, виявляють існування зон різного ступеня деградації ділянок певних територій, будують карти їх забруднення.

Однак вищезазначений спосіб не враховує специфіки забруднення (спектр, рівні, характер), що порушує необхідну збалансованість між економічною та екологічною доцільністю проведення індикації й оцінки стану довкілля за забруднення ВМ, використання заходів з інактивації поллютантів, з врахуванням складу токсикантів, видових особливостей рослин, властивостей ґрунтів забруднених територій.

Прототип не містить інформації про визначення показників, що характеризують систему в цілому. Виходячи з того, що вміст хлорофілу (як окрема характеристика) є неспецифічною реакцією на забруднення і характеризує реакцію рослин на існування забруднювачів у повітрі, ґрунті та відображає лише загальний рівень забруднення доквілля хімічними сполуками різної природи. Тому для діагностування, оцінки аеротехногенного навантаження слід використовувати систему показників, що характеризує стан певних рівнів організації біосистеми (клітина, тканина, орган тощо), їхні індикаційні характеристики (фізіолого-біохімічні, морфологічні, анатомічні). Відсутність системного підходу може призвести до хибних висновків щодо індикації й оцінки стану доквілля у разі його забруднення, що значно звужує застосування технічного рішення. Наприклад, встановленим фактом є зниження вмісту хлорофілу не тільки за умов забруднення, а й на карбонатних ґрунтах за нестачі заліза, за посушливих погодних умов. Тому використання єдиного показника вмісту хлорофілу за умов багатofакторного впливу не є доцільним.

Коректність даних, достовірність діагностування й оцінки стану доквілля є неможливими внаслідок того, що прототип не містить необхідної складової, яка визначає стан системи «рослина – ґрунт» за умов забруднення – врахування принципу ієрархічності функцій, процесів і структурної організації в системі, зворотних зв'язків, визначення їх кількісного рівня. Окрім того, у прототипі не враховано рівні фонових забруднень територій, що значно різняться.

В основу винаходу поставлена основна мета – розроблення нового способу індикації й оцінки екологічного стану системи «рослина – ґрунт» за умов сукупного аеротехногенного забруднення SO₂ та ВМ, з використанням індикаторних показників різних рівнів функціонування та структурної організації біосистеми, їхніх діагностичних характеристик.

Поставлена мета досягається за рахунок того, що в системі «рослина – ґрунт» визначають кількісні рівні показників, які характеризують спрямованість фізіолого-біохімічних процесів, анатомо-морфологічний стан рослин (маркери функцій, процесів, структури системи в цілому за умов забруднення) та характеризують стан забрудненої системи, дозволяють коректно й ефективно діагностувати, оцінювати забруднення, стан біосистеми на функціональному, структурному рівнях її організації.

Технічним результатом пропонованого способу є також підвищення репрезентативності даних діагностики й об'єктивності оцінки, рівня інформованості про стан системи за аеротехногенного забруднення, створення можливості прогнозувати її стан.

Для розв'язання вищенаведених завдань необхідним є: вибрати серед множини показників тільки тих, що характеризують функціональну спрямованість фізіологічних процесів на ранніх стадіях перебігу негативних процесів, виявити зміни анатомічних і морфологічних характеристик у системі; встановити й визначити рівні та характер забруднення; провести оцінку стану системи; прогнозувати спрямованість фізіологічних процесів, що визначають функціональний її стан, розвиток змін морфологічних, анатомічних ознак системи як найбільш стабільних порівняно з характеристиками фізіолого-біохімічних процесів, що визначають прояв токсичних властивостей забруднювачів, впливають на характер процесів самовідновлення системи «ґрунт–рослина».

За дослідження основних закономірностей змін фізіолого-біохімічних, морфологічних, анатомічних показників деревних рослин за сукупного впливу аеротехногенних забруднень ВМ та SO₂ встановлено, що тест-реакції сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.)

на забруднення повітря, ґрунту є неспецифічними та відображають лише загальний рівень забруднення хімічними сполуками різної природи. Тому виділяли групу показників – анатомо-морфологічні (приріст основного пагона за рік, розміри генеративних органів, зміна кольору хвої, передчасне в'янення, дефоліація, час життя, хлороз і некроз хвої, форма їхніх плям, відсоток ураженої поверхні хвої та ін.), фізіолого-біохімічні (вміст хлорофілів, рН клітинного соку та ін.), які є найбільш інформативними.

Виявлено, що характер негативної дії різних кислих газів спільно з ВМ полягає в порушенні фізіолого-біохімічних процесів у результаті синергізму, сумачії, домінування дії полютантів і підкислення протоплазми клітини, що призводить до посилення окисних процесів, зниження вмісту хлорофілу.

За визначення впливу різних доз забруднювачів на рослини виділено чотири типи ушкоджень (за характером, глибиною дисбалансу метаболізму): гостре, краплинно-опікове, кумулятивне, приховане. Гострі, краплинно-опікові та кумулятивні ушкодження визначаються візуально або за допомогою морфометричного аналізу деревних рослин. Результати морфометричного аналізу представлено в таблиці. Таким чином, проведений морфометричний аналіз підтвердив погіршення стану хвойних дерев *Pinus sylvestris* L. з підвищенням рівня атмосферного забруднення за натурних досліджень.

Основними морфологічними ознаками ослаблення хвойних дерев, зумовленого впливом кислих токсичних газів і ВМ, є зменшення приросту за діаметром; скорочення лінійного приросту центрального пагона; відмирання як головного, так і бокових пагонів; зниження маси хвої, передчасне її пожовтіння й опадання. Наявні ознаки ушкодження характерні для високих концентрацій викидів.

За хронічного типу ушкодження рослин, обумовленого тривалим впливом низьких концентрацій токсичних газів, також спостерігається передчасна дефоліація, зменшення охвоєності крон, відмирання окремих пагонів і дерев загалом.

За малих рівнів аеротехногенного забруднення повітряного середовища наявні морфологічні зміни можуть і не спостерігатися. Процес ослаблення й відмирання хвої значно подовжується у часі, що знижує експресність діагностики. Отже, діагностування й оцінку стану деревних рослин доцільно проводити за комплексного анатомо-морфологічного обстеження пагонів сосни звичайної в контрастних за рівнем забруднення районах аеротехногенного впливу полютантів неорганічного походження.

Під час розгляду мікропрепаратів поперечного зрізу хвої *Pinus sylvestris* L. (*x120 разів*) за впливу сукупного аеротехногенного забруднення SO₂ та ВМ (а) на її анатомічну будову проводять порівняння з контролем (рис. 1, б). Зразки було відібрано з районів, контрастних за рівнем забруднення. Виявлено, що хвоя із забрудненого району має певні відмінності. Кутикула ушкоджена, має горбисту поверхню, устячкові камери містять сторонні часточки; клітини смоляних ходів збільшені, що пов'язано з більш активним виведенням токсичних речовин, які накопичуються в клітинах складчастої паренхіми; оболонки ендодерми (бар'єрна функція між внутрішньою й периферичною частинами хвої, відповідальна за селективний транспорт речовин) значно стовщені. Такі анатомо-морфологічні особливості за впливу аеротехногенних емісій сприяють накопиченню токсикантів у складчастій паренхімі хвої та евакууванню їх шляхом часткової дефоліації.

Анатомічна будова хвої за аеротехногенного впливу кислих газів, ВМ та слабого рівня забруднення за своєю внутрішньою будовою не відрізняється від контролю, будова хвої дерев за середнього рівня забруднення характеризується збільшенням тов-

Кількісні та якісні показники діагностування й оцінки стану хвої *Pinus sylvestris* L. за умов сукупного аеротехногенного впливу полутантів неорганічної природи в системі «повітря – ґрунт – рослина»

Типи аеротехногенних ушкоджень	Анатомічні ознаки ушкоджень	Морфологічні показники хвої						Вміст ВМ у хвої, мг/кг сухої речовини			Рівень аеротехногенного забруднення SO ₂ , мг/м ³
		Вага 100 сухих хвоїнок, г	Чисельність хвоїнок на 1 см пагона, шт.	Лінійний приріст пагона, см	Довжина на хвої, см	Довжина некротичної ділянки, % від загальної довжини	Частота появи верхівок зів кінчиків хвої, % від загальної кількості хвої	Pb	Zn	Cr	
<i>Контроль</i>	Відсутні	2,3	9	7,4	7	0	1	1,5	30	2	ГДК у повітрі - 0,02 мг/м ³
<i>Гостре</i>	За впливу високих концентрацій полутантів, протягом кількох годин (днів) і проявляється у вигляді хлорозу з подальшою некротизацією тканин хвої або всього пагона, охоплює всю хвою й виникає по всій кроні або більшій її частині, хвоя швидко висихає	1,3	5,5	4,3	4,1	36	37	>8	>90	>9	Довготривала для 0,15 мг/м ³ за перевищення середньорічної 0,05 та середньодобової 0,1 мг/м ³
<i>Краплиннопікове</i>	Проявляються у вигляді крапок некрозу і більших плям, що охоплюють хвою, поступово розширюються й найчастіше утворюються при високій вологості повітря, некроз починається в апікальній частині хвої	1,8	7,7	5,8	6	24	29	6	70	7	Довготривала для 0,09-0,15 мг/м ³ за перевищення середньорічної 0,05 та середньодобової 0,1 мг/м ³
<i>Кумулятивне</i>	Розвивається при тривалій дії низьких концентрацій токсикантів, характерне стійке порушення основних процесів метаболізму, виявляється в зменшенні розмірів і маси хвої, передчасному її опаданні, зрідженості крон дерев, депресії росту, ушкодження згодом призводять до надлишкового накопичення забруднювачів в асиміляційних органах, появи хлорозів і некрозів	1,8	7,7	5,5	6	24	29	6	70	7	Довготривала для 0,09-0,15 за перевищення середньорічної 0,05 та середньодобової 0,1 мг/м ³
<i>Приховане</i>	Ушкодження спричиняється низькими концентраціями токсикантів за їх постійної або періодичної дії, порушення фізіолого-біохімічних процесів (збільшення прониємності мембран, зміна активності ряду ферментів, депресія фотосинтезу тощо), що призводить до накопичення забруднювачів, зниження росту й продуктивності рослин, втрати резистентності до впливу негативних чинників	1,95	8	6,5	6,5	9	7	>2	50	>3	>0,08

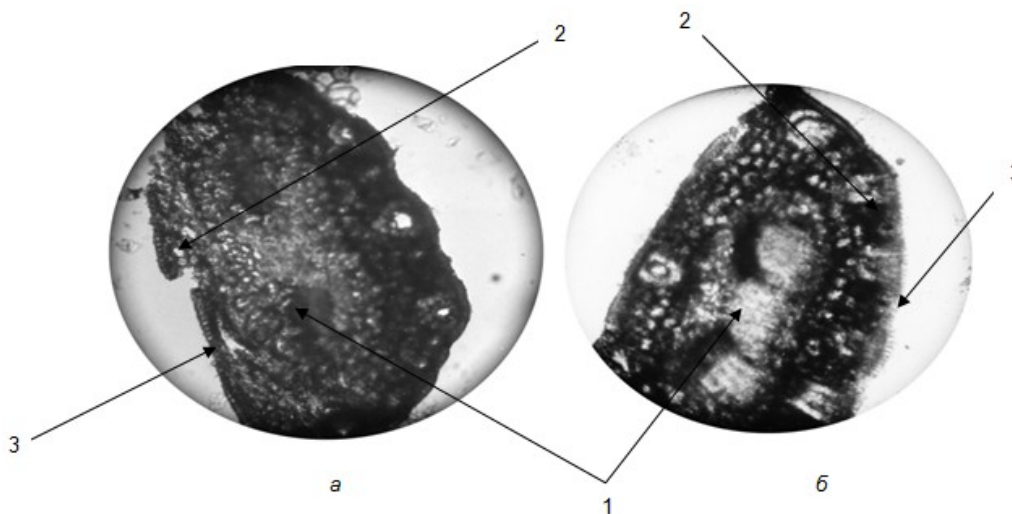


Рис. 1. Вплив аеротехногенного забруднення системи «рослина – ґрунт» на анатомо-морфологічні показники хвої *Pinus sylvestris* L.: а – за забруднення; б – контроль. 1 – смоляні ходи; 2 – устячка; 3 – кутикула.

щини кутикули. Це свідчить про те, що анатомічні ознаки є стабільнішими порівняно з морфологічними ознаками, тому можуть використовуватися для фітоіндикації й оцінки стану рослин тільки в контрастних за рівнем аеротехногенного забруднення районах.

На підставі отриманих даних визначено кількість хвої на одній сосні, яка становить для контрольної площадки 9,2 кг. За урахування питомого газопоглинання 100 г сухої маси на 1 м² (для сосни звичайної відповідно 10,5 м²) розраховували ефективність газоуловлювання для *Pinus sylvestris* L., яка становила 0,9 г на добу. Отже, кількість пилу, що потенційно осаджуватиметься, становить 677 мг на 1 м² хвої. Аналогічні експертні розрахунки проводять і для інших видів хвойних та листяних видів деревних рослин.

Статистична обробка даних натурних моніторингових досліджень і модельного дослідження за використання модулів кореляційного, дисперсійного, регресійного факторного та кластерного аналізів у рамках пакету *Statistica 6.0* послідовно обирають фактори, які сумісно пов'язані, позначають характер та їхні кількісні рівні, проводять їх аналіз.

Результатом аналізу є вид функції відгуку (модель) на надлишок SO₂, ВМ у системі «рослина – ґрунт», що дає змогу прогнозувати значення відгуків у тих станах, які не вивчали експериментально. Встановлюють суттєві специфічні та неспецифічні нелінійні залежності між рівнями аеротехногенного забруднення ВМ і SO₂ рослин, ґрунтів, анатомо-морфологічними та фізіолого-біохімічними показниками деревних рослин (рис. 2). Наприклад, за візуалізації даних на рис. 2 представлено графічний вираз встановленої нелінійної залежності рН хвої від зростаючих концентрацій SO₂, вмісту хлорофілу ($y=5,14-4,99*x+1,54*y+1,7*x^2+3,45*xy-0,99*y^2$). Зв'язки мають нелінійний характер. Встановлено, що за збільшення концентрацій SO₂ відбувається підкислення середовища клітини, зменшення вмісту хлорофілу. Закономірність описується таким рівнянням: $y=19,06-21,35*x-6,25*y+6,29*x^2+3,42*xy+0,54*y^2$.

Такий підхід забезпечує реалізацію можливості отримати якісні показники з кількісними значеннями для будь-якого набору факторів, що досліджуються у системі.

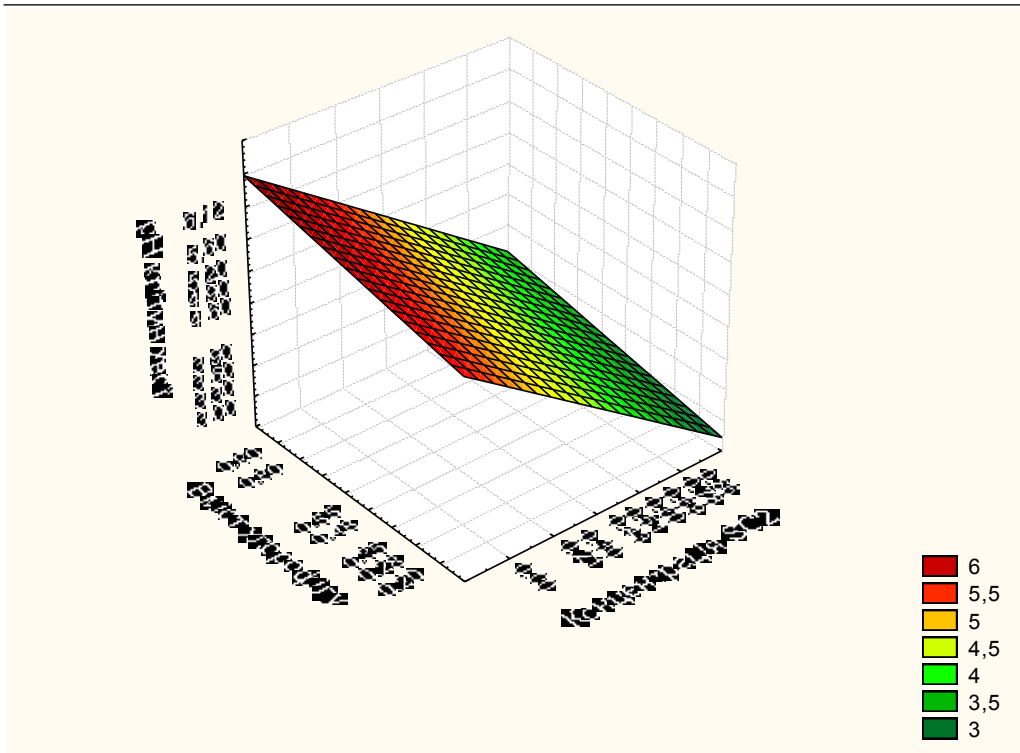


Рис. 2. Вплив аеротехногенного забруднення SO_2 на окремі фізіолого-біохімічні показники сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.).

Відмітними рисами та перевагами запропонованого технічного рішення порівняно з відомими способами та підходами є такі:

- використано принцип ієрархічності рівнів організації біосистем (клітина, тканина, орган, організм) і їхні індикаційні характеристики (фізіолого-біохімічні, морфологічні, анатомічні), функціональний взаємозв'язок з біокосною системою та повітрям за аеротехногенного забруднення неорганічного походження;
- застосовано принцип перетворення кризи системи (забруднення системи, токсичність) у необхідну функцію (моніторинг, діагностика, оцінка забруднення);
- реалізовано пошук інтегральних характеристик і врахування функціональної ролі процесів як індикаторів стану системи «повітря – рослина – ґрунт» за забруднення SO_2 та ВМ;
- визначено точки “адресного прикладання зусиль” – тест-реакція, механізм процесу, функція на певних рівнях організації біосистем із урахуванням, відповідно, їхніх індикаційних характеристик;
- визначено кореляції варіацій даних, їхній характер за умов забруднення та без впливу стресора;
- виявлено кількісні рівні індикаторних показників екологічного стану системи «рослина – ґрунт» за аеротехногенного забруднення на базі наявних прямих і зворотних зв'язків, теоретичних положень системного аналізу, анатомії, морфології та фізіології рослин, законів мінімуму та максимуму, теоретичних положень екотоксикології й екотоксикометрії забруднювачів;

- встановлено послідовність зміни функціонування системи «повітря – рослина – ґрунт» зі встановленням ланцюга змін показників біосистеми за диференціації їхніх рівнів - фізіолого-біохімічні > морфологічні > анатомічні показники як індикатори процесів деградації та відновлення співвідношення фізіологічних функцій біологічної складової системи «ґрунт – рослина» з урахуванням рівнів забруднення ґрунту, рослин і повітря;
- реалізовано можливість розв'язання і зворотного завдання, а саме: за певного рівня фізіолого-біохімічних процесів у деревних рослинах можливим є розрахувати рівень забруднення SO₂ повітря, ВМ у системі «ґрунт – рослина»; можливим є знаходження рівня фізіолого-біохімічної активності, морфологічних, анатомічних показників розрахунковим методом за рівнянням без залучення методів її визначення у рослинних пробах; за визначення рівнів забруднення ґрунтових проб ВМ можливим є виокремлення ролі ґрунтової складової аеротехногенного забруднення та визначення напруженості процесів і її стану, як і стану рослинної складової системи на функціональному та структурному рівні її організації без визначення й аналізу деревних рослин, що сприяє економії часу та матеріальних ресурсів;
- спосіб сприяє комплексному вивченню стану системи «рослина – ґрунт», розробці експресних методів раннього виявлення аеротехногенного забруднення системи полутантами неорганічного походження;
- спосіб дає змогу провести об'єктивне діагностування, ефективну оцінку стану системи «рослина – ґрунт» за сталого сукупного впливу аеротехногенного забруднення, підвищити достовірність визначення ступеня деградації довкілля;
- спосіб є придатним для всіх типів техногенно забруднених ґрунтів із різними буферними властивостями, здатністю до самоочищення, придатний для хвойних порід дерев як найбільш чутливих до аеротехногенних забруднень неорганічного походження;
- спосіб забезпечує ефективність прогнозування стану та відновлення системи «рослина – ґрунт» за умов аеротехногенного забруднення.

Таким чином, розроблений новий спосіб є корисним у розв'язанні проблемних питань фітоіндикації промислового забруднення, фітомеліорації й оцінки якості лісового фонду, пошуку шляхів оптимізації якісного складу лісів, визначення якості лісових ґрунтів за умов сталого або перманентного впливу фактора забруднення, вирішення питань сертифікації, медико-біологічної оцінки рослинної продукції міських і промислових районів та оцінки ризику забруднення за створення системи ранньої діагностики, оцінки аеротехногенного впливу забруднення і прийняття ефективних управлінських рішень.

1. *Баславская С. С., Трубецкова О. М.* Практикум по физиологии растений. М.: МГУ, 1964. С. 133–154.
2. ГОСТ 26929-94 Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов.
3. ДСТУ 4287:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб ДСТУ ISO 10381-1:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 1. Настанови щодо складання програм відбирання проб (ISO 10381-1:2002, IDT).
4. ДСТУ 4770.1:2007 - ДСТУ 4770.9:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук марганцю (цинку, кадмію, заліза, кобальту, міді, нікелю, хрому, свинцю) в

- грунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії.
5. ДСТУ ISO 10381-2:2004 Якість ґрунту. Частина 2. Настанови з методів відбирання проб (ISO 10381-2:2002, IDT).
 6. Заявка на патент G01N21/64 DE №2001113723A, 20.03.2004 «Система детектирования флуоресценции для определения значимых параметров растительности».
 7. Заявка на патент G09B29/00 RU №2003115637A, 20.06.2006, Бюл. №17 «Способ комплексного мониторинга обследуемой земной поверхности».
 8. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Методика. МинПР РФ, 1992. 58 с.
 9. МВВ 31-497058-015-2003 Визначення вмісту рухомих форм важких металів (Co, Cu, Cd, Ni, Pb, Zn, Mn, Fe) у ґрунті в 1н HCL на атомно-абсорбційному спектрофотометрі / Методи аналізів ґрунтів і рослин. Харків: ННЦ ІГА, 1991. С. 175–192.
 10. Николаевский В. С. Биологические основы газостойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 280 с.
 11. Патент G01V9/00 RU №2264636C2, 20.11.2005, Бюл. №32 «Способ определения участков загрязнения окружающей среды».
 12. Починок Х. Н. Методы биохимического анализа растений. К.: Наукова думка, 1976. 334 с.

THE MODE OF INDICATION AND ECOLOGICAL STATE ASSESSMENT OF THE AIR POLLUTED “PLANT – SOIL” SYSTEM

V. Samokhvalova*, V. Voron**

*NSC "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky"

4, Chajkovsky St., Kharkiv 61024, Ukraine

e-mail: v.samokhvalova@ua.fm

**The Ukrainian Research Institute for Forestry and Agricultural Afforestation named after G.N. Vysotsky

86, Pushkinska St., Kharkiv 61024, Ukraine

The new method of diagnostics and state assessment of the air polluted “plant-soil” system by contaminants of inorganic origins (SO₂, heavy metals) is elaborated at the air entering of pollutants arboreal plants, using of functioning, structure and orientation physiological and biochemical processes of arboreal plants marker indexes, determination of active forms pollutants maintenance levels of in the air–plant–soil system which worsening the ecological state, toxicity of air contamination shows up. It is proved that correctness, authenticity and efficiency of the plant – soil system ecological state diagnostics and assessment is linked taking into account hierarchicalness of functions, processes and structural organization of the system, account of feed-backs, by determination of their quantitative level at elaboration of the indicator indexes system of physiological and biochemical processes, functions and anatomomorphological status of the biological making system at influencing of contamination.

Key words: *Pinus sylvestris* L., air contamination, heavy metals, diagnostics, SO₂, assessment, plant – soil system, mode.

**СПОСОБ ИНДИКАЦИИ И ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
АЭРАЛЬНО ЗАГРЯЗНЕННОЙ СИСТЕМЫ «РАСТЕНИЕ – ПОЧВА»****В. Самохвалова^{*}, В. Ворон^{**}**

^{*}ННЦ «Институт почвоведения и агрохимии имени О.Н. Соколовского»
ул. Чайковского, 4, Харьков 61024, Украина
e-mail: v.samokhvalova@mail.ru

^{**}УкрНИИЛХА им. Г.Н. Высоцкого
ул. Пушкинская, 86, Харьков 61024, Украина

Разработан новый способ диагностики и оценки состояния загрязненной системы «растение – почва» поллютантами неорганического происхождения (SO₂, тяжелые металлы) при аэральном поступлении загрязнителей в древесные растения, использовании маркерных показателей функционирования, структуры и направленности физиолого-биохимических процессов древесных растений, определении уровней содержания активных форм загрязнителей в системе «воздух – растение – почва», при которых проявляется ухудшение её экологического состояния, токсичность аэротехногенных поллютантов. Доказано, что корректность, достоверность и эффективность диагностики и оценки экологического состояния системы «растение – почва» связана с учетом иерархичности функций, процессов и структурной организации системы, обратных связей, определением их количественного уровня при разработке системы индикаторных показателей физиолого-биохимических процессов, функций и анатомо-морфологического статуса биологической составляющей системы при влиянии загрязнения.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., аэротехногенное загрязнение, тяжелые металлы, диагностика, SO₂, оценка, система «растение – почва», способ.

Стаття надійшла до редколегії 22.06.09
Надійшла після доопрацювання 09.10.09
Прийнята до друку 12.10.09