

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

V. Romanov, I. Galelyuka,  
O. Voronenko, V. Hrusha

## NEW INFORMATION TECHNOLOGY FOR EXPRESS- DIAGNOSTICS OF PLANT STATE UNDER STRESSES

*The new information technology for express-diagnostics of plants based on wireless fluorescence sensors with intelligent data analysis is given.*

*Key words: wireless sensor network, chlorophyll fluorescence induction, neural networks.*

*Предложена новая информационная технология экспресс-оценки состояния растений на базе беспроводных датчиков флуоресценции хлорофилла с интеллектуальным анализом данных.*

*Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, индукция флуоресценции хлорофилла, нейронные сети.*

*Запропонована нова інформаційна технологія експрес-оцінювання стану рослин на базі бездротових датчиків флуоресценції з інтелектуальним аналізом даних.*

*Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, індукція флуоресценції хлорофілу, нейронні мережі.*

© В.О. Романов, І.Б. Галелюка,  
О.В. Вороненко, В.М. Груша,  
2016

УДК 004.75

В.О. РОМАНОВ, І.Б. ГАЛЕЛЮКА,  
О.В. ВОРОНЕНКО, В.М. ГРУША

## НОВА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЕКСПРЕС-ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ РОСЛИН В УМОВАХ ДІЇ СТРЕСОВИХ ФАКТОРІВ

Однією з основних задач у сучасному промислового землеробстві та екологічному моніторингу є експресне оцінювання стану рослин в умовах дії стресових факторів, їх стійкості до несприятливих умов навколишнього природного середовища. Це дає змогу своєчасно вжити необхідні агротехнічні заходи для збереження врожаю або зелених насаджень. Найбільш вірогідне оцінювання стійкості рослин до стресових факторів як природного, так і техногенного походження дає **прямий метод**, який застосовується у польових умовах. Але у польових умовах, як правило, неможливо відтворити стресові умови навантаження на рослину, які рік у рік носять змінний характер. Це не дає змогу формувати оптимальні стресові умови випробувань рослини на стійкість і, як наслідок, отримувати кількісні показники цієї стійкості.

У зв'язку з тим на сьогодні для групової діагностики рослин на стійкість до дії різноманітних стресових факторів застосовують чисельні **непрямі лабораторні методи**, які мають різну чутливість, достовірність, продуктивність, трудомісткість і тривалість, а також потребують забезпеченості інструментальними засобами, реактивами, кваліфікованим персоналом.

До стресових факторів, що впливають на стан рослинного покриву на великих територіях, відносяться мороз, посуха, спека, засолення і підвищена кислотність ґрунту, внесення добрив, біодобавок, пестицидів і гербіцидів, викиди шкідливих елементів в атмосферу та ін.

Для оцінювання дії цих стресових факторів на стан рослин застосовується велика кількість різних засобів і методів.

Так, наприклад, для **оцінювання впливу морозу** на стан рослини використовують метод прямого заморожування, методи, основані на вимірі електропровідності тканин рослини або на вимірі проникності мембран клітини.

Для **оцінювання впливу посухи та спеки** на стан рослини використовують різні фізіологічні та біохімічні методи.

Для **оцінювання стійкості рослини до засолення ґрунту** створюють штучне засолене середовище, в якому вирощується рослина, і досліджують її біохімічні та фізіологічні зміни.

Для **оцінювання кислотостійкості рослини** порівнюють стан рослин у нормальних умовах зі станом рослин у середовищі з різним ступенем кислотності ґрунту.

Методи **оцінювання газостійкості рослин** можна поділити на біологічні, морфологічні, цитологічні, морфометричні, екологічні, фізіологічні, біохімічні та біофізичні.

Наведені вище методи і методики оцінки стану рослин, по-перше, є, як правило, довготривалими, а не експресними, мають невисоку продуктивність, потребують різних технічних засобів, методичного забезпечення та лабораторного обладнання, для їх використання необхідний кваліфікований персонал.

Тому **розробка універсальних експресних методів оцінювання стану рослин** в умовах дії стресових факторів є важливою задачею як промислового сільськогосподарського виробництва, так захисту довкілля на великих площах лісопаркових зон.

Одним з таких методів оцінювання стану живої рослини, на нашу думку, є метод **індукції флуоресценції хлорофілу**.

Суть методу полягає в наступному. Молекула хлорофілу живої рослини, поглинаючи квант світла, переводить електрон з основного у збуджений стан. Повернення цієї молекули в основний стан відбувається трьома шляхами:

- енергія збудження передається електронно-транспортним ланцюгом сусідній молекулі і так далі, доки ця енергія не дістанеться реакційного центру фотосинтезу, де вона накопичується у світловому циклі, а у темновому циклі витрачається на фотохімічні реакції;
- електрон повертається на основний рівень, а його енергія виділяється у вигляді тепла;
- електрон повертається на основний рівень, а його енергія випромінюється у вигляді кванту світла або кванту флуоресценції.

Процеси накопичення енергії у листях живої рослини і її випромінювання у вигляді флуоресценції є конкурентними. За інтенсивністю флуоресценції та її змінами можна оцінювати стан рослини в умовах дії стресових факторів незалежно від природи їх походження.

Це пояснюється наступним. Накопичення енергії світла відбувається завдяки фотосинтетичному електронно-транспортному ланцюгу клітини живої

непошкодженої стресом рослини. Під дію стресового фактора будь-якої природи перш за все підпадає мембрана, яка є природним бар'єром клітин живої рослини, що відразу викликає каскад зсувів в обміні речовин усередині клітини і перш за все призводить до руйнування електронно-транспортних ланцюгів. Наслідком цих негативних процесів є зміна інтенсивності флуоресценції аж до її зникнення.

Таким чином, за результатами реєстрації і подальшої комп'ютерної обробки флуоресценції хлорофілу у живій рослині в умовах дії стресових факторів різної природи можна оперативно визначити її стан. Це дає змогу використовувати **метод індукції флуоресценції хлорофілу як універсальний для оцінювання стану рослини** в умовах дії стресових факторів різної природи.

До цього часу метод індукції флуоресценції хлорофілу використовувався у автономних приладах, так званих флуорометрах, для оцінювання стану рослин переважно у лабораторних умовах або на невеликих ділянках у полі. Прикладом такого флуорометру є розроблений в Інституті кібернетики і доведений до серійного виробництва портативний прилад «Флоратест» (рис. 1) [1].



РИС. 1. Портативний прилад "Флоратест"

Використання автономних флуорометрів на великих площах потребує значної кількості цих досить коштовних приладів і відповідного обслуговуючого персоналу. Крім того, результати реєстрації індукції флуоресценції хлорофілу автономним приладом у вигляді кривих мають невисоку наочність, що

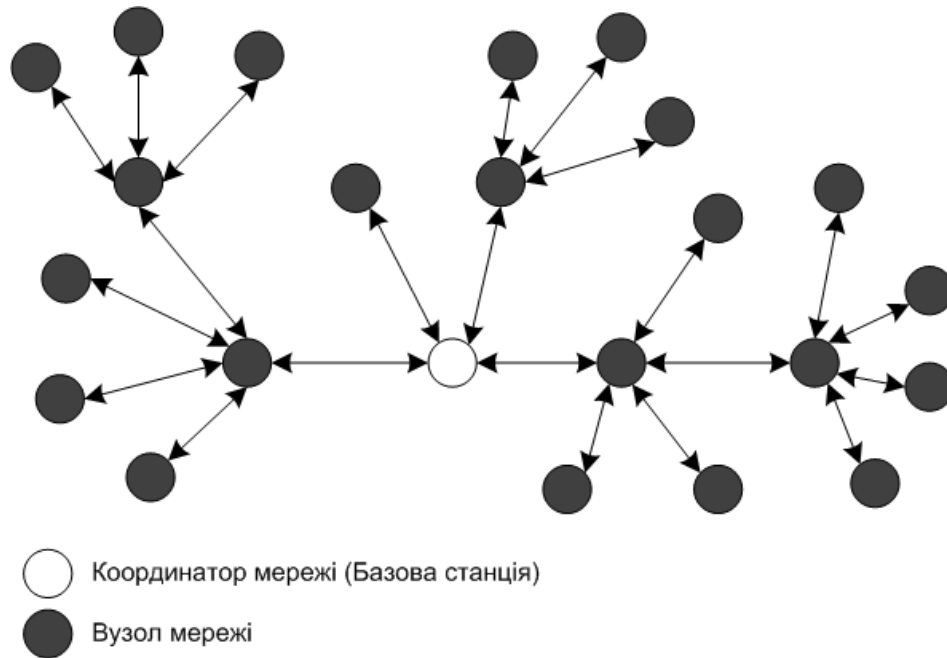
ускладнює оцінювання стану рослин цим методом. Тому автономні флуорометри, як правило, використовуються в умовах лабораторних досліджень, а в польових умовах мають обмежене застосування.

Авторами статті в рамках міжнародного проекту УНТЦ № 6064 «Розробка і підготовка до серійного виробництва розподілених інтелектуальних біосенсорів для захисту довкілля» розроблені і доведені до дослідної експлуатації бездротові інтелектуальні біосенсори для реєстрації індукції флуоресценції хлорофілу, які можуть бути об'єднані у мережі і на відміну від автономних флуорометрів здатні оцінювати стан рослин на великих територіях [2].

Слід зауважити, що біосенсор з радіоканалом може використовуватися у двох режимах роботи. Перший режим роботи передбачає, що біосенсор працює автономно і через радіоканал передає дані на віддалений блок збору інформації, наприклад, планшетний комп'ютер, ноутбук або спеціально розроблений реєстратор. Другий варіант передбачає, що велика кількість біосенсорів з радіоканалом розміщується на досліджуваній території. При цьому такі бездротові біосенсори самостійно організують мережу і працюють як єдина бездротова сенсорна мережа.

Запропонована бездротова сенсорна мережа може використовуватися у різних областях прецизійного землеробства та екологічного моніторингу. При цьому вона являє собою мережу з великої кількості бездротових біосенсорів, які об'єднані між собою радіоканалом. Площа покриття подібної мережі може складати від декількох квадратних метрів до декількох квадратних кілометрів за рахунок здатності ретранслювати дані від одного елемента мережі до іншого.

Основною перевагою запропонованої бездротової сенсорної мережі є здатність контролювати в реальному часі стан сільськогосподарських рослин чи зелених насаджень на великих територіях. При цьому деякі вузли мережі можуть вийти з ладу із-за збоїв енергопостачання, фізичних пошкоджень або стороннього втручання. Але відмова одного вузла не впливатиме на роботу усієї мережі. Така відмовостійкість забезпечується розробкою та правильним застосуванням відповідних протоколів передачі даних, алгоритмів функціонування та мережевої взаємодії. Оскільки запропонована бездротова сенсорна мережа працює в умовах реального оточуючого середовища, то елементи мережі мають суттєву стійкість до впливу кліматичних умов. Оскільки вузли мережі часто відмовляють із-за розрядження батареї або впливу фізичних факторів, тому структурі мережі притаманні часті зміни топології після розгортання самої мережі. Зміна топології зумовлює зміну характеристик самих вузлів: положення, доступність (із-за завад, шумів, рухомих перешкод і т. д.), рівень заряду батареї, неполадки, зміна поставлених задач або ролі в мережі. При виході з ладу будь-якого окремого елемента мережі алгоритми самоорганізації мережі забезпечують створення нових шляхів передачі даних в обхід ділянки мережі, яка вийшла з ладу. Приклад кластера запропонованої бездротової сенсорної мережі показано на рис. 2.



РІС. 2. Структура бездротової сенсорної мережі

Вузли, як правило, розташовані випадковим чином на всій території спостережень. Кожний з них може здійснювати збір даних і визначати маршрут передачі в центральний вузол до кінцевого користувача. В створеній мережі можна виділити два типи пристроїв. Перший тип – це повнофункціональний вузол. Він може слугувати як координатором окремих ланок мережі, так і окремим звичайним вузлом мережі. Такий вузол реалізує загальну модель зв'язку, яка дозволяє "спілкуватися" з іншими вузлами мережі. Також цей вузол може передавати дані на вищий рівень мережі, в такому випадку він є координатором мережі. Другий тип пристроїв – вузли з спрощеними функціями. Тобто це прості вузли з малим ресурсом і вимогами до мережі. Переважно такі вузли можуть зв'язуватися з повнофункціональними пристроями і не можуть слугувати координаторами мереж. Основною функцією таких вузлів є вимірювання, попереднє оброблення, стиснення та передавання даних до сусіднього вузла.

Для цілей прецизійного землеробства або екологічного моніторингу вузли запропонованої мережі можуть розташовуватися одним з двох способів. Перший спосіб передбачає, що вимірювальні вузли мережі розташовуються за наперед заданим алгоритмом і покривають досліджувану територію рівномірно, наприклад, квадратом  $n \times n$  вузлів. При цьому щільність вузлів можна контролювати при розробці алгоритму розміщення вузлів. Другий спосіб передбачає, що вузли на досліджуваній ділянці розташовуються випадковим чином на різних відстанях

один від одного із різною щільністю на різних ділянках досліджуваної території. При такому способі розташування вимірювальних вузлів головний принцип полягає у тому, що між вузлами має бути стабільний і надійний радіозв'язок.

Для обміну інформацією між вузлами обрано бездротову технологію, яка є доступною у більшості країн, а саме стандарт передачі даних IEEE 802.15.4. На фізичному рівні протокол IEEE 802.15.4 пропонує три смуги частот для роботи бездротової сенсорної мережі, зокрема, один канал у смузі частот 868 МГц, десять каналів у смузі частот 915 МГц і 16 каналів у смузі частот 2,4 ГГц для промислових та медичних потреб.

Для реалізації елементів бездротової мережі вибрано модулі бездротової передачі даних JN5168 виробництва NXP та протокол організації мережевої взаємодії ZigBeePro, який повністю сумісний з протоколом IEEE 802.15.4. Мікроконтролер вузла містить 32-бітний RISC-процесор з тактовою частотою 32 МГц, модуль безпроводного зв'язку, сумісний зі стандартом IEEE 802.15.4, вбудований 4-канальний 10-бітний АЦП, аналогові та цифрові входи/виходи тощо. Цей мікроконтролер за своїми характеристиками повністю відповідає вимогам щодо реалізації робочого вузла мережі, який забезпечує збір, зберігання і передачу даних по бездротовому каналу.

Не слід забувати про вимоги щодо уніфікації або, іншими словами, стандартизації протоколів та елементів, які застосовувалися при створенні мережі. Як правило, певну стандартизацію у цю область вносить стандарт 802.15.4, який визначає особливості побудови мереж з невисокою пропускнуою здатністю.

Дані, отримані за результатами вимірів індукції флуоресценції хлорофілу, можуть безпосередньо зчитуватися та оброблятися мобільними комп'ютерними платформами, включно безпілотними літальними апаратами (рис. 3), або за допомогою хмарних технологій. Для цього в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України розроблений математичний апарат, який можна використовувати як у хмарних технологіях, так і у мобільних платформах. Можливості цього апарату було перевірено експериментально.

В Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України виконані дослідження впливу дії гербіциду на індукцію флуоресценції хлорофілу живої рослини. Нами використовувався промисловий гербіцид «Раундап» і рослини дурману звичайного, які були поділені на групи. Одна з них – контрольна, яка гербіцидом не оброблялася, і дві дослідні групи, що оброблялися різними дозами гербіциду. Для обробки даних цих досліджень щодо визначення дії гербіциду «Раундап» на стан рослин у часі використано апарат нейронних мереж [3] і статистичний аналіз. Для розпізнавання стану рослин за формою кривої індукції флуоресценції хлорофілу використано двошарову нейронну мережу з прямим поширенням сигналів (feed-forward network). Ця нейронна мережа успішно використовується у задачах класифікації. Мережа містила 89 входів та 3 виходи, оскільки кожна оцифрована крива індукції флуоресценції хлорофілу містила 90 відліків (перший відлік нами відкидався як недостовірний). Останній



РИС. 3. Безпілотний літальний апарат для отримання даних з бездротових біосенсорів

вихідний шар складався з трьох нейронів (три варіанти оцифрованих кривих). За результатами обробки даних апаратом нейронних мереж вже на сьомий день була зафіксована різниця між контрольними і дослідними рослинами, тобто було визначено, що рослина дурману почала руйнуватися під дією гербіциду. Водночас обробка даних за критерієм Стюдента зафіксувала різницю між контрольними і дослідними рослинами тільки на тринадцятий день. Таким чином, методом індукції флуоресценції хлорофілу можна визначити дію гербіциду «Раундап» на бур'ян на ранній стадії (через декілька днів), а візуально дія цього гербіциду проявляється не раніше, ніж через 15–20 діб. Це дає змогу зберегти рослини від додаткової обробки гербіцидами, тобто зменшити навантаження шкідливими речовинами на навколишнє природне середовище.

Крім того, нами застосовано апарат нейронних мереж для оцінювання стану рослин методом індукції флуоресценції хлорофілу при визначенні водного дефіциту, оцінювання реакції рослин на посуху, мороз, внесення добрив, виявлення впливу важких металів на стан рослин.

Таким чином доведено, що апарат нейронних мереж придатний для створення промислових методик для оцінювання стану сільськогосподарських рослин, зеленого покриву мегаполісів і лісопарків на великих територіях методом індукції флуоресценції хлорофілу, з використанням бездротових сенсорних мереж.

**Висновки.**

1. Показано, що на сьогодні для оцінювання стану рослин на великих територіях під дією стресових факторів різної природи існує багато лабораторних методів і методик, які потребують досить коштовного обладнання, реактивів і кваліфікованого персоналу.

2. В результаті виконання міжнародного проекту № 6064 експериментально доведено, що замість багатьох методів і методик для оцінювання стану рослин на великих територіях можна використовувати універсальний метод індукції флуоресценції хлорофілу, який має велику чутливість до дії на рослини стресових факторів різної природи.

3. Для промислового використання цього методу в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України розроблена інформаційна технологія, яка включає бездротові сенсори і мережі на їх основі для одночасного збору даних про стан рослин на великих територіях сільськогосподарських угідь, зеленого покриву мегаполісів і лісопарків, і ефективний математичний апарат обробки цих даних, придатний для використання у хмарному середовищі або мобільних обчислювальних платформах.

Робота виконана за підтримкою Науково-технологічного центру в Україні, проект № 6064.

1. Romanov V., Artemenko D., Brayko Yu., Galelyuka I., Imamutdinova R., Kytayev O., Palagin O., Sarakhan Ye., Starodub M., Fedak V. Portable Biosensor: from Idea to Market. *International Journal "Information Theories & Applications*. Vol. 19, Number 2. Sofia, Bulgaria. 2012. P. 126–131.
2. Romanov V., Gribova V., Galelyuka I., Voronenko O. Multilevel sensor networks for precision farming and environmental monitoring. *Information Technologies & Knowledge*. Vol. 9, Number 1. Sofia, Bulgaria. 2015. P. 3–10.
3. Груша В.М. Обробка результатів експериментальних досліджень, проведених з використанням портативного флуорометра «Флоратест». *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2015. № 14. С. 109–116.

Одержано 17.10.2016