

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

*H. Antonova, O. Kovyrova,  
V. Lavrentyev*

## **GRAPH-ANALYTICAL ME- THOD OF ANALYSIS OF FLUORESCENCE CHLOROPHYLL PARAMETERS**

*The paper describes graph-analytical method of analysis of fluorescence chlorophyll parameters.*

*Key words: chlorophyll fluorescence induction, biosensor, photosynthesis.*

*Рассмотрен графоаналитический метод анализа параметров флуоресценции хлорофилла.*

*Ключевые слова: индукция флуоресценции хлорофилла, биосенсор, фотосинтез.*

*Розглянуто графоаналітичний метод аналізу параметрів флуоресценції хлорофілу.*

*Ключові слова: індукція флуоресценції хлорофілу, біосенсор, фотосинтез.*

© Г.В. Антонова, О.В. Ковирьова,  
В.М. Лаврентьєв, 2017

УДК 578.01+681.7.08+535.3+681.335.2

Г.В. АНТОНОВА, О.В. КОВИРЬОВА, В.М. ЛАВРЕНТЬЄВ

## **ГРАФОАНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ ФЛУОРЕСЦЕНЦІЇ ХЛОРОФІЛУ**

**Вступ.** В Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України розроблені та виготовлені бездротові інтелектуальні біосенсори [1], призначені для використання у розподілених системах агроекологічного та екологічного моніторингу, для захисту довкілля не тільки мегаполісів, але і заповідників, національних парків, лісових та паркових масивів.

Чутливість бездротових біосенсорів до впливу стресових факторів різної природи на дослідні групи рослин визначено шляхом реєстрації змін індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ). Метод індукції флуоресценції хлорофілу дозволяє в експрес-режимі без пошкодження рослини визначати її функціональний стан, що дає змогу оцінити дію стресових факторів на стан досліджуваної рослини за формою кривої ІФХ. Характерними параметри кривої є [2]:  $F_0$  – початковий рівень флуоресценції (приблизний час 50 мкс або 100 мкс від початку освітлення);  $F_m$  – максимальний рівень флуоресценції хлорофілу;  $F_{st}$  – стаціонарний рівень флуоресценції;  $F_v = F_m - F_0$  – параметр, який характеризує світлову стадію фотосинтезу;  $F_v/F_m$  – розрахунковий параметр, який характеризує ефективність фотохімічних реакцій;  $Area$  – параметр використовується як індикатор змін ІФХ у формі кривої між  $F_0$  і  $F_m$ ;  $F_J$  – флуоресценція в точці  $J$  (приблизний час 2 мс);  $F_I$  – флуоресценція в точці  $I$  (приблизний час 30 мс).

Як стресові фактори під час випробувань бездротових біосенсорів обрано наступні: водний дефіцит, спека, внесення добрив. Для реєстрації параметрів навколишнього середо-

вища (сонячне освітлення, температура і вологість ґрунту та повітря) використано портативну метеостанцію та відповідні електронні прилади.

На основі аналізу проведених експериментів, розроблено методику проведення польового агротехнічного експерименту [3]. Двома важливими етапами даної методики є обробка результатів вимірів графоаналітичним методом з використанням комплексного параметра та обробка вимірів методами статистичного та кореляційного аналізу.

**Випробування бездротових біосенсорів через вимірювання ІФХ рослин під впливом водного стресу.** Випробування інтелектуального біосенсору здійснювалося за польовим однофакторним агротехнічним короткотерміновим експериментом з аналітично-графічним аналізом даних. Мета експерименту – це визначення чутливості бездротових біосенсорів до впливу стресових факторів, а саме водного дефіциту та посухи. Проведено випробування мережі біосенсорів відповідно до розробленої схеми оперативного експерименту: дослідження чотирьох груп рослин майорці. Групи рослин відрізнялися дозами поливу, а саме: V1 – 50 мл води на 1 кг ґрунту; V2 – 150 мл води на 1 кг ґрунту; V3 – без поливу; V4 – 250 мл води на 1 кг ґрунту. Експеримент проведено в ідентичних для всіх рослин умовах. Протягом 12 діб проведено 9 серій вимірювань. Після першої серії вимірювань ІФХ припинено полив у групі V3. В трьох інших групах полив відбувався кожного дня після серії вимірювань ІФХ відповідно до програми випробувань. Першу серію вимірювань у кожній групі прийнято за контроль. Таким чином, кожна група рослин мала свої контрольні значення. Рослини кожної групи протягом випробувань знаходились в одному вегетативному періоді. Для контролю стресового впливу обрано першу серію вимірювань у кожній групі рослин. Наступні вимірювання ІФХ були дослідними і порівнювалися з контрольними.

Отримані дані оброблено за допомогою програмного засобу, розробленого в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. На основі обчислених значень здійснено побудову графіків залежності ІФХ від різних доз поливу за період випробувань. Графіки побудовано в наступному форматі: на одній площині відображено зміни ІФХ рослин однієї групи за весь період випробувань, що дає змогу проаналізувати динаміку змін кривих ІФХ у часі, а саме зміну форми, амплітуди та положень характерних точок на кривій. Наведемо серію кривих ІФХ групи V3 на рис. 1, а.

Наступний етап обробки даних включав у себе розрахунок та зведення в таблицю усереднених значень основних параметрів флуоресценції хлорофілу:  $F_0$ ,  $F_m$ ,  $F_{sb}$ ,  $F_J$ ,  $F_I$ ,  $F_v$ ,  $F_v/F_{sb}$ ,  $Area$ ,  $F_v/F_m$ . За даними таблиці для подальшого наглядного аналізу будуються графіки зміни у часі будь-якого з наведених вище параметрів флуоресценції. Як приклад наведено графік параметра  $F_v/F_m$  на рис. 1, б.

Надалі результати вимірів оброблено методами статистичного та кореляційного аналізу, методом комплексного параметру (графоаналітичним методом). Оброблені дані електронних таблиць порівнювались з даними натурних спостережень. Кінцевим результатом випробувань було виявлення чутливості бездро-

тових біосенсорів до дії різних стресів, які зазнали дослідні рослини під час експерименту. Отримані результати свідчать про те, що під час випробувань бездротові біосенсори з високою чутливістю реагували на зміни поточного стану рослин. За допомогою біосенсорів визначено точку не повернення рослин у нормальний стан після дії стресового фактора.

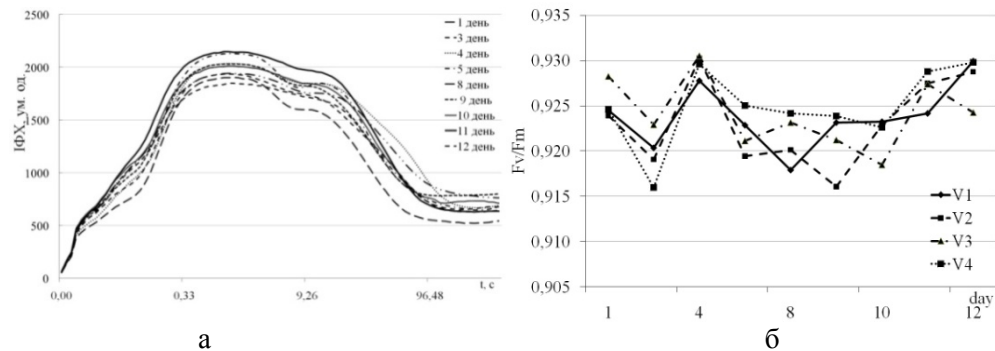


РИС. 1. Приклади графіків кривих ІФХ та змін параметра  $F_v/F_m$ : а – усереднені криві ІФХ рослин групи V3, б – графік змін параметра  $F_v/F_m$

Проведені дослідження, з використанням бездротових біосенсорів, наглядно продемонстрували можливість в експрес-режимі, з високою точністю отримати коректні дані для подальшого аналізу стану рослин та опосередковано оцінити вплив негативних факторів на довкілля.

**Графоаналітичний метод з використанням комплексного параметра для моніторингу параметрів флуоресценції хлорофілу для оцінювання стану рослин.** Останнім часом широко використовується неінвазивний аналіз багатофазного швидкого зростання флуоресценції хлорофілу для оцінювання фотосинтетичної функції рослин (крива *OJIP*). Форма кривої *OJIP* відображає фотохімічну ефективність фотосинтетичного апарату і дає інформацію про функціональні і структурні характеристики компонентів, які беруть участь у фотосинтетичному транспорті електронів. Розроблено математичну модель багатофазного перехідного процесу, так званий *JIP*-тест [4], який дозволяє обчислювати конкретні біофізичні параметри, що характеризують структуру та функції фотосистеми II, а також деякі інтеграційні параметри.

Проведення експериментів з метою визначення впливу стресових факторів, або проведення спостережень за станом рослин в звичайних умовах навколишнього середовища пов'язано з великою кількістю вимірювань і обов'язковою подальшою обробкою результатів. Для аналізу стану рослини за допомогою кривої *OJIP* використовують значення кривої в точці її початку  $F_0$ , в точці максимальної флуоресценції  $F_m$ , а також у двох проміжних точках – точці  $J (F_J)$  та точці  $I (F_I)$ . Крім вказаних, у разі потреби додатково вимірюються значення кривої в точці  $K$ , розраховується параметр *Area*, а також похідні параметри – енергетичні, феноменологічні та специфічні потоки.

Аналіз отриманих у результаті вимірювання даних ускладнюється, з одного боку, великим обсягом інформації, а з другого – одночасною зміною майже всіх параметрів кривих від вимірювання до вимірювання, що ускладнює визначення головної тенденції цих змін. У зв'язку з цим виникла ідея мінімізувати кількість параметрів, вибрати ті, які б максимально відображали зміни кривої і дозволяли просту візуалізацію цих змін.

У процесі вимірювання параметрів кривої *OJIP* визначено не тільки вплив стресових факторів на фотохімічні процеси у живій рослині, а також розглянуто можливість вирішення зворотної задачі – визначення природи стресу на основі аналізу зміни параметрів кривої *OJIP*. Наприклад, у роботі [5] викладено результати експериментів із визначення характеру впливу різних стресів на параметри кривої *OJIP*. На рис. 2 (a–f) показано графіки кривих *OJIP* для рослин, підданих стресу, та контрольних, а саме: a – дія високої температури, b – низької температури, c – посухи, d – рослина піддавалася дії сольового стресу, e – за відсутності у ґрунті нітратів, f – за наявності свинцю.

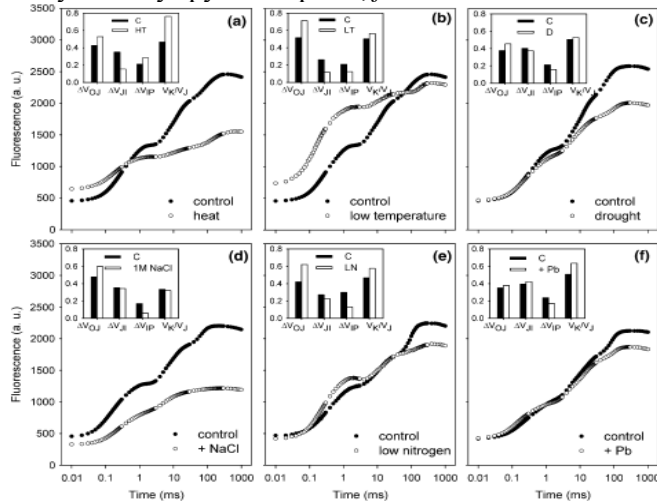


РИС. 2. Криві *OJIP* при дії різних стресових факторів [3]

З наведених графіків видно, що, по-перше, стреси значно змінюють форму кривої *OJIP*, а по-друге – майже в усіх випадках криві значно відрізняються одна від одної. Це дає підстави вважати, що існує комплексний параметр, який однозначно характеризує криву і, таким чином, дає можливість відрізнити дію того чи іншого стресу за його допомогою. У результаті проведеного аналізу розроблено алгоритм отримання комплексного па-

раметра. Спочатку вимірюються параметри кривої *OJIP* до початку дії стресового чинника або іншого експерименту, в результаті отримуємо  $N$  параметрів  $P_{0,1}, \dots, P_{0,N}$ . Параметрами  $P$  можуть бути як безпосередньо значення вимірювань кривої *OJIP*, так і наведені вище похідні від них. Тобто точки  $P_{0,i}$  – це параметри першої кривої, яка отримана на початку експерименту. Через проміжок часу, що визначається планом експерименту, проводиться вимірювання, в результаті якого отримуємо  $N$  параметрів 1-ї кривої. Далі, для кожного  $n$ -го параметра 1-ї кривої вираховуємо відносну зміну  $\Delta P_{1,n}$  за формулою:

$$\Delta P_{1,n} = \frac{P_{1,n} - P_{0,n}}{P_{0,n}}. \quad (1)$$

Пропонується вважати, що є векторні вісі кількістю  $N$ , кожна з яких відповідає одному з параметрів  $P$  і які розташовані на декартовій площині, наприклад, таким чином, як показано на рис. 3.

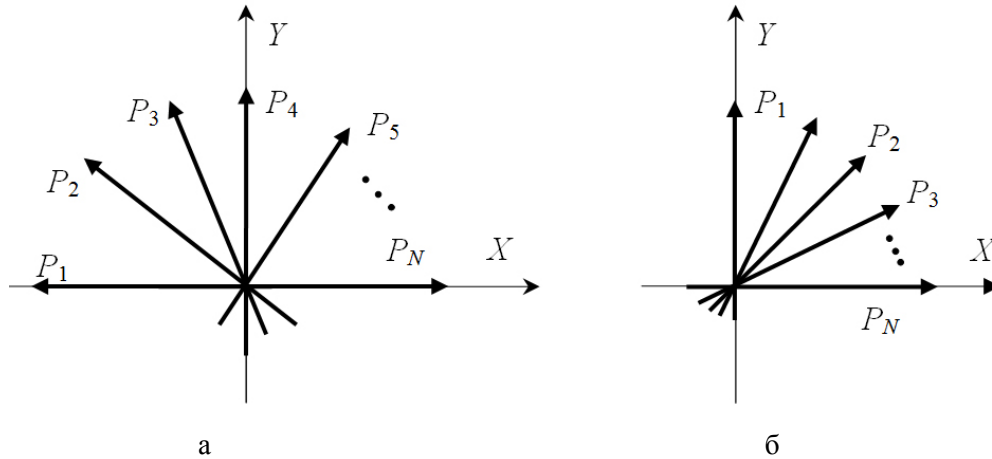


РИС. 3. Варіанти розташування векторів параметрів  $P_1, P_2, \dots, P_N$  у декартовій системі координат

Пропонується вважати, що відносні параметри  $\Delta P_{1,1}, \Delta P_{1,2}, \Delta P_{1,3}, \dots, \Delta P_{1,N}$  – це вектори, напрям кожного з яких збігається з напрямом відповідного параметра  $P_1, P_2, \dots, P_N$ , а їх числові значення є довжинами цих векторів. Таким чином, кожен вектор  $\Delta P_{1,n}$  буде мати координати  $x_{1,n}$  та  $y_{1,n}$ . Далі визначається сумарний вектор  $S_1$ , координати якого  $X_1$  та  $Y_1$  – це сума відповідних координат всіх векторів  $\Delta P_{1,1}, \Delta P_{1,2}, \Delta P_{1,3}, \dots, \Delta P_{1,N}$ , які розраховуються за формулами:

$$X_1 = \sum_n x_{1,n} \quad Y_1 = \sum_n y_{1,n} \quad (2)$$

Оскільки сумарний вектор  $S_1$  єдиним чином відображає  $N$  вибраних параметрів кривої *ОЖР*, можна вважати його комплексним параметром. Якщо обчислити сумарний вектор для кожної кривої, отриманої в результаті проведення експерименту, отримаємо послідовність  $S_1, \dots, S_K$  сумарних векторів, які відповідають послідовності кривих *ОЖР*.

Розглянемо застосування комплексного параметра на конкретних прикладах, а саме для кривих *ОЖР*, показаних на рис. 2. У першому прикладі оберемо параметри  $F_0, F_J, F_I, F_m$  та  $F_v = F_m - F_0$ . Причому вектори параметрів розташуємо на декартовій площині під кутом  $45^\circ$  між ними, як показано на рис. 4, а.

У другому прикладі використовуються параметри  $F_{mI} = F_m - F_I, F_{IJ} = F_I - F_J, F_{J0} = F_J - F_0$  та  $F_v$ , а розташування векторів параметрів на декартовій площині таке, як показано на рис. 4, б – під кутом  $60^\circ$  між ними. Відносні параметри обчислені між параметрами контрольних кривих та кривих, отриманих після дії стресу.

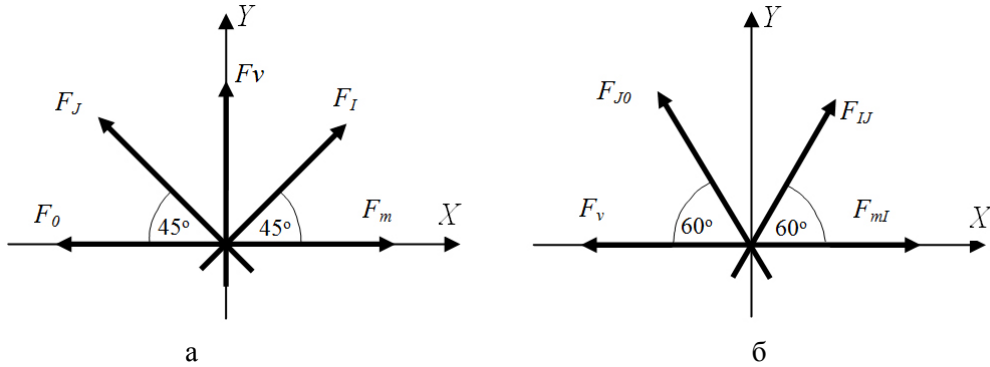


РИС. 4. Приклади розташування векторів параметрів на декартовій площині

$$X = \Delta F_m - \Delta F_0 + 0,707 \cdot (\Delta F_I - \Delta F_J), \quad Y = \Delta F_v + 0,707 \cdot (\Delta F_I + \Delta F_J), \quad (3)$$

а в другому – за формулами

$$X = \Delta F_{mI} - \Delta F_v + 0,5 \cdot (\Delta F_{IJ} - \Delta F_{JO}), \quad Y = 0,866 \cdot (\Delta F_{JO} - \Delta F_{IJ}). \quad (4)$$

На рис. 5 показано отримані значення комплексних параметрів для кривих, які показані на рис. 2 для обох прикладів, де кожний комплексний параметр позначений відповідною літерою. Аналогічно тому, як криві відрізняються одна від одної у залежності від стресу, значення комплексного параметра, також майже в усіх випадках, відрізняються своїм місцезнаходженням на площині.

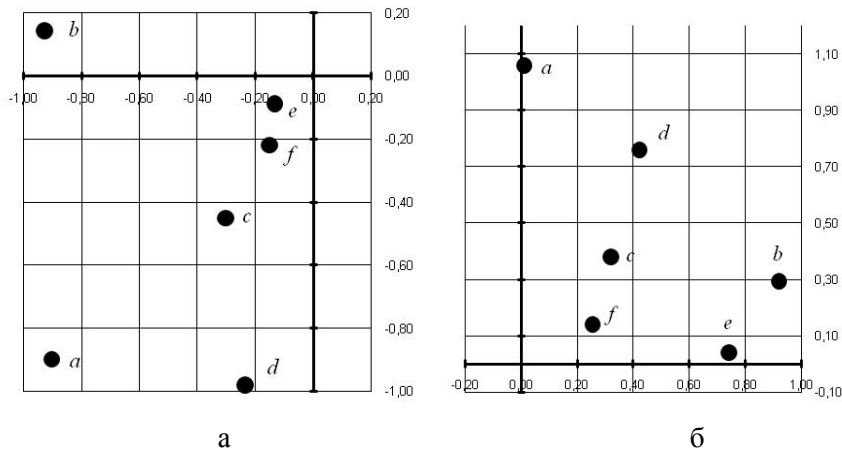


РИС. 5. Значення комплексного параметра при різних стресових факторах для кривих, які показані на рис. 2

Якщо протягом певного часу вимірювати криві *ОЛР*, і для кожної кривої отримувати значення комплексного параметра, то в результаті отримаємо послі-

довність значень, кожне з яких відповідає конкретній кривій. Ця послідовність буде відображати послідовність зміни параметрів кривих *ОЖР* відносно параметрів початкової кривої. А траєкторія руху значень на декартовій площині буде відображати послідовність зміни параметрів кривих *ОЖР* на протязі проведення вимірювань. Приклад подібних траєкторій показано на рис. 6, отриманих під час дослідів над рослиною майорці за дослідженням водного стресу (а – без поливу, б – доза поливу 250 мл води на 1 кг ґрунту).

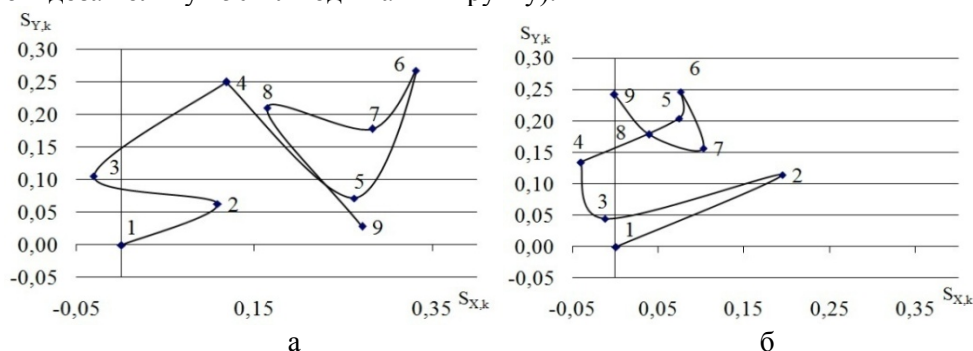


РИС. 6. Траєкторії значень комплексного параметра за даними експерименту з рослинами майорці

Комплекс експериментів щодо впливу різноманітних стресових чинників на окремих видів рослин надасть в результаті різні траєкторії руху значень комплексного параметра відповідно кожному експерименту. Маючи такі дані, можна вирішити зворотну задачу – в результаті аналізу траєкторії спрогнозувати напрямки її руху і визначити наявність стресового чинника та його природу.

Якщо дії стресу призвели до загибелі рослини, то з високою вірогідністю на кожній траєкторії можливо визначити такі точки (або області), що відповідають початку в рослині незворотних процесів.

Необхідно зробити деякі зауваження щодо вибору первинних параметрів і розташування їх векторів на декартовій площині. По-перше, бажано щоб кількість первинних параметрів не була занадто великою, оскільки буде важко відрізнити вплив кожного окремого параметра на кінцевий результат. По-друге, якщо вибрані первинні параметри не залежать один від одного (наприклад,  $F_0$ ,  $F_J$ ,  $F_I$ ,  $F_m$ ), існує можливість збігу значень сумарних векторів при різних значеннях первинних параметрів. Щоб уникнути цього, необхідно до переліку вибраних незалежних первинних параметрів додати залежні від них. Виходячи з цих міркувань, в першому прикладі до вибраних первинних параметрів внесена також варіабельна флуоресценція  $F_v$ , яка є залежною від параметрів  $F_0$  та  $F_m$ . Як видно з рис. 4, а, а також з формул для координат сумарного вектора, якщо зміни  $\Delta F_m$  і  $\Delta F_0$  будуть однакові, це не вплине на координату  $X$ , яка залишиться незмінною, але при цьому, обов'язково зміниться координата  $Y$  через зміну  $\Delta F_v$ . Іншим способом досягти бажаного можна за рахунок розташування векторів первинних параметрів. Так, в тому ж прикладі, зміна  $\Delta F_I$  не може бути компенсована змі-

ною  $\Delta F_J$ , оскільки до формул, які визначають координати комплексного параметра, вони входять з різними знаками.

По-третє, точки (або області), що відповідають початку незворотних процесів у рослині, можуть бути близькі одна до одної. Наприклад, точки (e) та (f) на рис. 5, а дуже близькі, і ймовірно, що будуть близькі і відповідні траєкторії руху значень комплексного параметра. Крім того, можливі випадки, коли траєкторія, пов'язана з одним стресовим чинником, проходить поблизу області незворотних процесів, пов'язаної з іншим, що може призвести до помилкових висновків. Наприклад, щоб дістатися до точки (a) на рис. 5, а, траєкторія може проходити поблизу точок (e), (f) та (c). Для зменшення вірогідності таких помилок пропонується використовувати більше комплексних параметрів, тобто використовувати різні первинні параметри. Наприклад, на рис. 5, б з іншим комплексним параметром, точки (a), (e), (f) та (c) розміщені на площині зовсім іншим чином і траєкторії руху значень комплексного параметра будуть інші.

Вочевидь, щоб відрізнити один комплексний параметр від іншого, необхідно прийняти позначення, наприклад, для параметрів на рис. 5, а, б прийняти відповідно  $S(F_0, F_J, F_I, F_m, F_v)$  та  $S(F_{mI}, F_{IJ}, F_{J0}, F_v)$  і при цьому вважати кути між сусідніми вісями однаковими.

**Аналіз результатів експериментів за допомогою кореляційного аналізу.** Важливими вимогами до процесу вимірювання флуоресценції хлорофілу є регулярність та підтримання однакових умов вимірювання.

У серпні 2015 року проведено дослідження зміни ІФХ під впливом важкого металу (сульфату міді) та за відсутності поливу. Об'єктом дослідження обрано рослину Соя (лат. *Glycine max*), вирощену з насіння в кімнатних умовах. Рослини поділено на чотири групи: група V1 – без впливу важкого металу, без поливу; група V2 (контрольна) – без впливу  $CuSO_4$ , з поливом; група V3 – з впливом  $CuSO_4$ , без поливу; група V4 – з впливом  $CuSO_4$ , з поливом. Доза  $CuSO_4$  становила 6 г на 1 кг ґрунту для рослин в групах V3 та V4. Дослідження щодо рослини соя проведено в лабораторних умовах. Перед вимірюваннями рослини перенесено у тінь. Лабораторію охолоджено протягом однакового часу. Однак, під час вимірювання, 2 рази виникла ситуація, коли вимірювання починалися раніше, ніж в інші дні. Відповідно значення температури повітря та ґрунту були вищими, ніж в інші дні. В результаті значення параметра  $F_v/F_m$  в контрольній групі значно знизилася в порівнянні з іншими днями [6]. Аналогічна ситуація виникла і під час аналізу даних, отриманих у 2016 році при дослідженні впливу водного дефіциту на зміни ІФХ рослин соя. Рослини поділено на три групи: група W1 – з поливом, доза поливу дорівнює 50 мл води на 1 кг ґрунту, група W2 – з поливом, доза поливу – 150 мл води на 1 кг ґрунту, група W3 – без поливу. Після першої серії вимірювань флуоресценції хлорофілу, припинено полив у групі W3.

Для того щоб перевірити припущення про наявність оберненого взаємозв'язку між параметром  $F_v/F_m$  та температурою оточуючого середовища, а також виявити інші зв'язки, розраховано коефіцієнти кореляції Пірсона між параметрами флуоресценції ( $F_0, F_{st}, F_m, F_v, F_v/F_m, F_J, F_I$ ) та параметрами оточуючого середовища (температура повітря, вологість повітря, кислотність ґрунту). Ро-



зрахунок виконано попарно між середнім значенням у кожній групі та середнім значенням параметра оточуючого середовища, яке фіксувалося під час проведення експерименту в даній групі. Оцінювання значення коефіцієнта Пірсона здійснено за допомогою порівняння значення його модуля з відповідним критичним значенням для заданого рівня значущості з таблиці критичних значень. Також виконано розрахунок помилок репрезентативності коефіцієнтів кореляції з метою визначення достовірності величин та кореляційних поправок для оцінювання статистичної достовірності факту наявності зв'язку.

Результати об'єднані в таблицю, де за наявності додатної залежності поставлений "+", при від'ємній — "-".

ТАБЛИЦЯ. Залежність параметрів флуоресценції від параметрів оточуючого середовища (рослина соя)

	Температура повітря, °С						Вологість повітря, %						Кислотність ґрунту, PH									
	V1	V2	V3	V4	W1	W2	W3	V1	V2	V3	V4	W1	W2	W3	V1	V2	V3	V4	W1	W2	W3	
$F_0$	+	+	+	+																		
$F_j$	+	+		+																		
$F_l$																				—		
$F_{st}$							—					+		+								
$F_m$					—															—		
$F_v$					—																	
$F_v/F_m$	—	—		—																		

Розрахунок коефіцієнтів кореляції підтвердив наявність оберненої та додатної залежності між параметрами флуоресценції  $F_v/F_m$  і  $F_0$  відповідно, та температурою повітря для значень, отриманих в досліді над рослиною соя, які проведено у 2015 році в один період часу, однак для досліді над рослиною соя, який проведено в 2016 році, наявності залежності не підтверджено. Ймовірно, це пов'язано з тим, що в 2015 році відбулося два перепади температури поспіль, тоді як у 2016 році перепади температури були з певним інтервалом. Під час аналізу даних, отриманих у 2016 році, встановлено обернену залежність між параметром  $F_m$  і температурою повітря в групі W1, обернену залежність між параметрами  $F_m$  і  $F_i$  та кислотністю ґрунту. Виявлено залежність між параметром  $F_{st}$  і температурою повітря (обернена) та вологістю повітря (додатна) в групі W3. Залежності між параметрами флуоресценції та оточуючого середовища для даних, отриманих в групі W2, не виявлено.

Таким чином, досліджено вплив метеопараметрів довкілля на форму кривої ІФХ, а саме: температури та вологості повітря, кислотності ґрунту. Ці параметри є важливими впливовими чинниками при застосуванні біосенсорів у систе-

мах довготривалого екологічного та агроекологічного моніторингу, які треба враховувати при аналізі даних. Доведено, що під час довготривалого моніторингу стану довкілля за допомогою бездротового інтелектуального біосенсора потрібно або не враховувати результати вимірювань ІФХ за періоди з різкими перепадами температури чи вологості, або враховувати кореляцію параметрів флуоресценції хлорофілу з одним чи декількома метеопараметрами.

**Висновки.** 1. Результати випробувань дозволили зробити висновок про чутливість бездротового біосенсору до обраних стресових факторів. Додатково випробування довели можливість застосування біосенсорів для оцінювання посухостійкості і жаростійкості рослин.

2. Розроблено новий графоаналітичний метод для аналізу стану рослин через вимірювання параметрів швидкої фази індукції флуоресценції хлорофілу та розрахунки відповідних характерних параметрів. Розроблений метод дозволяє за розрахованими параметрами визначати не тільки рівень дії того чи іншого стресового фактора на групу дослідних рослин, але й виявляти рівень такого стресу, який зумовлює незворотні зміни стану рослини.

3. Під час довготривалого моніторингу стану довкілля за допомогою бездротового інтелектуального біосенсора потрібно або не враховувати результати вимірювань ІФХ за періоди з різкими перепадами температури чи вологості, або враховувати кореляцію параметрів флуоресценції хлорофілу з одним чи декількома метеопараметрами.

1. Oleksandr Palagin, Volodymyr Romanov, Igor Galelyuka, Oleksandr Voronenko, Yuriy Brayko, Roza Imamutdinova. Wireless sensor network for precision farming and environmental protection. *International Journal "Information theories & applications"*. 2017. Vol. 24, N 2. P. 19–34.
2. Goltsev V. N., Kalaji H. M., Paunova M., Bąbac W., Horaczek T., Mojski J., Kocielec H., and Allakhverdiev S.I. Variable Chlorophyll Fluorescence and Its Use for Assessing Physiological Condition of Plant Photosynthetic Apparatus. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2016. Vol. 63, N. 6. P. 869–893.
3. Oleksandr Palagin, Volodymyr Grusha, Hanna Antonova, Oleksandra Kovyrova, Vasyl Lavrentyev. Application of biosensors for plants monitoring. *International Journal "Information theories & applications"*. 2017. Vol. 24, N 2. P. 115–126.
4. Strasser R.J. Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria. Strasser R.J., Srivastava A, Govindjee. *Photochemistry and Photobiology*. 1995. Vol. 61, N 1. P. 32–42.
5. Hazem M. Kalaji, Anjana Jajoo, Abdallah Oukarroum et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiol Plant*. 2016. P. 38–102.
6. Hazem M. Kalaji, Anjana Jajoo, Abdallah Oukarroum et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiol Plant*. 2016. P. 38–102.

Одержано 20.09.2017