

Винахід відноситься до сільського господарства та екології, зокрема, для розпізнавання стану рослин по рівню вмісту хлорофілу у листках рослин: виявлення хлорозів, викликаними різними стресовими умовами такими як техногенні забруднення навколишнього середовища, дефіцит мінерального живлення і вологи, хвороби, а також для визначення строків дозрівання та збирання врожаю. Може бути використаний для отримання експресінформації про стан посівів сільськогосподарських культур на великих площах з метою прийняття оперативних заходів по догляду за ними.

Відомий спосіб дистанційного визначення хлорофілу, де в якості спектральної характеристики використаний так званий "коефіцієнт форми", обраний нами як прототип.

Згідно цього способу вимірювання еталону виключають а реєструють лише спектральний розподіл відбитого від посіву світла в діапазоні 700 - 730 нм, обчислюють кількісний параметр форми спектральної кривої, так званий коефіцієнт форми по формулі:

$$KF = \frac{\int_{\lambda_{700}}^{\lambda_{730}} \rho(\lambda) (\lambda_{730} - \lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{700}}^{\lambda_{730}} \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_{700}) d\lambda},$$

де - функція, що описує спектральний розподіл Інтенсивності світлового потоку в Інтервалі довжин хвиль 700 - 730 нм, і по величині коефіцієнту (KF) за допомогою рівняння регресії визначають вміст хлорофілу в листках.

Однак цей спосіб придатний тільки для вимірювання хлорофілу в рослинах посівів, що утворюють зімкнутий покрив і не можуть бути використані для вимірювання в зріджених посівах з неповним покриттям ґрунту рослинністю.

Завданням, на вирішення якого спрямований винахід, являється створення способу визначення вмісту хлорофілу у листках монокультури рослин різного рівня зрідженості посівів (як з повним так і не повним покриттям ґрунту рослинністю).

Вирішення поставленого завдання досягається тим, що у способі дистанційного визначення вмісту хлорофілу в листках монокультури рослин вимірюється спектральна характеристика відбиття світла від рослинного покриву з наступним визначенням вмісту хлорофілу по рівнянню регресії, причому, на відміну від прототипу вимірюють нечутливу до вкладу відбиття світла від ґрунту спектральну характеристику, що являє собою величину відношення значень першої похідної в довгохвильовому та короткохвильовому максимумах ($I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}}$) графіка першої похідної спектрального розподілу Інтенсивності відбитого вверх від посіву світлового потоку у діапазоні довжин хвиль 670 - 730 нм і обчислюють вміст хлорофілу по рівнянню регресії:

$$X_{\lambda} = A * I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}} - B,$$

де X_{λ} - вміст хлорофілу в мг на 1 дм листової поверхні;

$I_{\text{дов.}}$ - значення першої похідної в довгохвильовому максимумі її графіка в області 670 - 730 нм;

$I_{\text{кор.}}$ - значення першої похідної в короткохвильовому максимумі її графіка в області 670.- 730 нм;

A - коефіцієнт при $I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}}$;

B - вільний член лінійного рівняння регресії.

Як виявив математичний аналіз та модельні експерименти, запропонована спектральна характеристика є практично нечутливою до величини проективного покриття ґрунту рослинністю і типів існуючих ґрунтів (табл. 1).

Методика одержання рівняння регресії.

Відбирали листя з різним вмістом хлорофілу і вимірювали спектри відбиття на спектрофотометрі СФ-18 у цифровому вигляді з кроком 1 нм. Обчислювали першу похідну від таких цифрових масивів у діапазоні довжин хвиль 670 - 730 нм. Графік першої похідної у цій області характеризувався двома максимумами (мал. 1), відносна інтенсивність яких яких $I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}}$ як виявилось, залежить від концентрації хлорофілу в листках. В цих же листках визначали вміст хлорофілу по методу Арнона (Arnon D.I. Copper enzymes In Isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta vulgaris. Plant Physiol., 1949, 24, N 1, 1-15), який полягає у вимірюванні коефіцієнтів екстинкції ацетонових екстрактів з листків при $\lambda = 652\text{ нм}$ і обчисленні за формулою концентрації хлорофілу. Після цього зображували графічно вміст хлорофілу в залежності від величини спектрального параметру ($I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}}$). Одержана таким чином залежність була близькою до прямолінійної. Коефіцієнт кореляції вираховували згідно формули (Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. Изд-во "Наука", М. 61984, 424 а):

$$r = \frac{\sum xy - \sum x \cdot \sum y / n}{\sqrt{[\sum x^2 - \sum x^2 / n][\sum y^2 - (\sum y)^2 / n]}}$$

де r - коефіцієнт кореляції, відображаючий кількісно силу зв'язку між двома спряженими ознаками, x - спектральна характеристика, яка являє собою відношення значень амплітуд в максимумах ($I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}}$) графіка першої похідної спектрального розподілу світлового потоку, відбитого від посіву у діапазоні 670 - 730 нм, y - вміст хлорофілу у посіві, n - кількість вимірювань. Коефіцієнт лінійної кореляції вибірки становив $0,90 \pm 0,20$ при рівні значимості 0,05. Коефіцієнти лінійного рівняння регресії $y = ax + b$ обчислювали по формулах:

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - \sum x^2}; \quad b = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - \sum x^2};$$

Для озимої пшениці нами отримано рівняння регресії;

$$X_l = 5,775 * (I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}}) - 0,521,$$

де X_l - вміст хлорофілу в мг на 1 дм² листової поверхні.

Похибка рівняння регресії становила +0,5 мг/дм².

Суть винаходу пояснюється конкретними прикладами здійснення. Записували у цифровому вигляді спектральний розподіл Інтенсивності відбитого вверх від посіву озимої пшениці світлового потоку, виміряного спектрометром високої спектральної роздільної здатності з борту вертольота Ка-26. В поле зору приладу попадала площа близько 600 м². Обчислювали перші похідні від спектральних кривих. Визначали величину відношення значень першої похідної в довгохвильовому та короткохвильовому максимумах ($I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}}$) її графіка в діапазоні 670 - 730 нм. Одержані значення підставляли у рівняння регресії і обчислювали величину вмісту хлорофілу, виміряну в мг на 1 дм² листової поверхні.

В табл. 2 наведені результати обчислень хлорофілу за рівнянням регресії по спектральному параметру $I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}}$, а також, для порівняння, дані по визначенню хлорофілу способом прототипу і методом Арнона.

Як видно з даних, приведених в табл. 2, запропонований спосіб однаково добре "працює" для визначення хлорофілу як на ранніх стадіях вегетації, коли посіви незімкнуті (фаза кушіння, вихід в трубку), так і в посівах з повним проективним покриттям (фаза колосіння). Що стосується визначення хлорофілу по способу-прототипу, то воно задовільне лише для фази колосіння, коли посіви були зімкнуті, і непридатне для посівів з неповним проективним покриттям (фази кушіння і вихід в трубку), де похибки складають більше 1 мг/дм².

Таким чином, запропонований спосіб у порівнянні з прототипом має наступні переваги:

1. Принципіально підвищує точність дистанційної оцінки хлорофілу в листках на ранніх фазах розвитку рослин (сходи, кушіння, вихід в трубку - коли посіви не утворюють зімкнутий покрив), а також в зріждених посівах незалежно від фази вегетації рослин.

Таблиця 1

Результати похибки визначення спектральної характеристики $I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}}$ і обчислених на їх основі значень похибок хлорофілу при вимірюванні спектрів відбиття листків з неповним проективним покриттям для двох значень вмісту хлорофілу в листках, виміряних хімічним способом

Тип підсти- лаючої поверхні	Вміст хло- рофілу (хім. визн.) мг/дм ²	$I_{\text{кор.}}$ відн. од.	$I_{\text{дов.}}$ відн. од.	Коефіцієнт проективного покриття			
		при 100 % покритті		0,6		0,8	
				$\Delta(I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}})$ відн. од.	ΔX_l мг/дм ²	$\Delta(I_{\text{дов.}}/I_{\text{кор.}})$ відн. од.	ΔX_l мг/дм ²
пісок чорнозем	5,57	0,682	0,730	0,004	-0,026	0,002	-0,010
	0,87	1,217	0,277	-0,028	0,162	-0,011	0,062
	5,57	0,682	0,730	0,002	-0,009	0,001	-0,003
	0,87	1,217	0,277	-0,010	0,055	-0,004	0,021

Таблиця 2

Результати визначення вмісту хлорофілу в листках рослин озимої пшениці, визначених дистанційно запропонованим способом, способом прототипом, а також по методу Арнона в лабораторних умовах.

№ прикладу п/п	Сорт	Хар-ка посіву: 1) зімкнутість 2) листковий індекс $\text{см}^2/\text{м}^2$	Вміст хлорофілу (Хл) $\text{мг}/\text{дм}^2$				
			По Арнону	Запропонований спосіб	$\Delta\text{Хл}$ (хім.-запр.)	Спосіб прототип	$\Delta\text{Хл}$ (хім.-прототип)
1.	Поліська- 87.	Посів не зімкнутий кушіння, листковий індекс 4773	5,18+0,05	5,0	0,18	3,7	1,48
2.	Донський напівкарлик	Посів не зімкнутий, 14778	4,58+0,08	4,3	0,28	3,5	1,28
3.	Поліська- 87.	Посів зімкнутий, колосіння 60444	5,70+0,1	5,5	0,20	5,1	0,60

