

Шифр роботи: «Карлсон фермер»

Наукова робота

на тему:

Використання дронів для дистанційного зондування стану азотного живлення зернових на прикладі пшениці

АНОТАЦІЯ

до студентської наукової роботи за шифром «Карлсон фермер»

Актуальність. Робота присвячена питанню продовольчої безпеки країни. Висока якість зернових можлива лише при достатньому стані мінерального живлення рослин. Протягом вегетації здійснюється підживлення передусім азотними добривами, диференційоване внесення добрив сприятиме отриманню високоякісного врожаю і максимізації прибутків. Стандартні рішення на базі супутникових платформ розроблялися для вирішення питань пов'язаних з оцінкою врожаю і погано пристосовані для оперативного застосування для визначення оптимальних дозувань добрив при підживленні рослин. Завдяки низькій вартості знімків із високою розподільчою здатністю, незалежності від наявності хмар і оперативності отримання результатів дрони в складі комплексу технологій точного землеробства надають аграріям принципово нові можливості по керуванню врожаєм. В даний час серійно випускаються спеціалізовані сенсори для спектрального моніторингу для БПЛА такі як Slantrange, AgroCam PRO NIR тощо. З урахуванням того, що підживлення рослин здійснюється кілька разів і лише в певні фази вегетації, поширення таких вузькоспеціалізованих систем обмежене коротким періодом протягом року при високій вартості обладнання. Економічно для господарств було б краще мати універсальне обладнання, але штатні камери працюють в оптичному діапазоні, тому доцільно перевірити можливість використання оптичного діапазону для оцінки стану азотного живлення.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження специфіки використання дронів для моніторингу насаджень зернових культур на прикладі пшениці організації адаптованих під них стресових індексів.

Завдання. Визначитись з спектральними діапазонами для моніторингу, що можуть бути реалізовані на серійних БПЛА класу «мікро», що можуть децентралізовано використовуватись господарствами. Розробити стресові індекси, щодо азотного живлення пшениці адаптовані під БПЛА.

Методи досліджень. Дослідження проводились на базі багаторічного стаціонару щодо системи застосування добрив. Обробку отриманих фото даних здійснювали з використанням стандартних програм таких як MathCAD. Вибір неспеціалізованих програм обумовлений можливістю їх використання для створення фахівцями на виробництві нових стресових індексів, без додаткової перепідготовки. Для врахування можливих похибок, пов'язаних із індивідуальним забарвленням ґрунту, виконували попиксельну фільтрацію даних для фіксації забарвлення саме рослинних насаджень. Для врахування змін яскравості рослин, пов'язаної з змінами освітлення, запропонували системи калібрування, що базується на використанні службових даних фотокамери. Така система не вимагає використання штучних наземних шаблонів чи додаткових зенітних сенсорів тобто є адаптованою для промислового використання на неспеціалізованому обладнанні.

Загальна характеристика роботи. Встановлено, що і оптичний діапазон і використання псевдокольників може ефективно використовуватись для дистанційного моніторингу стану азотного живлення рослин. Отже стандартне сенсорне обладнання дронів може стати ефективним інструментом для агронома при керуванні врожаєм. Запропоновані перспективні стресові індекси на базі оптичних каналів та псевдокольників для моніторингу стану азотного живлення пшениці. Встановлено, що незалежно від спектрального діапазону, коефіцієнт детермінації при апроксимації у вигляді лінійної залежності вищий на 10-30 %, коли азот визначали у наземній частині рослин, ніж у трьох верхніх листах, що доцільно враховувати при побутові спектральних індексів;

Ключові слова: дрони, моніторинг, азотне живлення, стресові індекси

Зміст

Вступ	5
Розділ 1 Стан питання.....	6
Розділ 2 Методика досліджень.....	12
2.1 Стационарний дослід.....	12
2.2 Аналітичні дослідження азотного живлення рослин.....	13
2.3 Система дистанційного зондування.....	13
2.4 Обробка результатів.....	14
Розділ 3 Отримані результати та дискусія.....	16
3.1 Режими польоту.....	16
3.2 Фільтрація даних.....	17
3.3 Стресові індекси для БПЛА.....	20
Розділ 4 Напрями подальших досліджень.....	23
Висновки.....	24
Список використаної літератури.....	25

Вступ

Раціональне використання мінеральних добрив в рослинництві стало особливо актуально в Україні в останні роки. Отримання високих врожаїв зернових і високої якості продукції найчастіше неможливо без забезпечення своєчасної підживлення посівів. Але в агрофітоценозі потреба рослин в елементах живлення, як правило, не є рівномірною для всього поля і часто носить випадковий характер. Внесення необхідних доз добрив відповідно до потреб рослинних насаджень є невід'ємною складовою технологій точного землеробства. Але сьогодні технології вимагають новітніх експрес-методик агрохімічних досліджень. Класичні методи пов'язані з хімічними аналізами, не адаптовані до масових досліджень, трудомісткі і не завжди можуть застосовуватися, в той же час актуальний період для внесення добрив при підживленні становить всього кілька днів. Альтернативою використання хімічних методів дослідження є листова діагностика, коли за зовнішнім виглядом рослини визначаються проблеми в її живленні. Листова діагностика, зокрема визначення таких вегетаційних індексів як NDVI, активно використовувалась при космічних дослідженнях, що було актуально для великих аграрних виробників чи взагалі в масштабах держави. Первинною метою створення супутникових систем моніторингу рослинних насаджень була потреба в дистанційній оцінці стану посівів безпосередній доступ до яких було обмежено з різних причин. Так СРСР закуповував десятки мільйонів тон фуражного зерна для годівлі тварин і постачальникам з США та Канади було принципово важливо знати очікувану кількість зерна без оцінки її його якості.

Проте можливості саме спектральних досліджень для оцінки стану рослин були реалізовані на наземному обладнанні: Greenseeker (Trimble Agriculture - USA), CropSpec (Topcon Positioning Systems - Японія), N-сенсор (Yara International - Норвегія). Використання такого наземного обладнання має певні недоліки а саме пропорційно високу вартість обладнання та використання застарілого критерію оптимальності – максимальний врожай. В сучасних

умовах господарювання оптимальним є максимальний прибуток, досягнення якого потребує наявності попередньої інформації про реальний стан поля.

Поява на ринку відносно дешевих безпілотних літальних апаратів (дронів) з висотою польоту до декількох сотень метрів надає аграріям додатковий інструмент для досліджень з принципово новими можливостями. Для використання дронів при проведенні листової діагностики необхідно вирішити ряд технічних завдань по методології використання даного обладнання.

Метою роботи є дослідження специфіки використання дронів для моніторингу насаджень зернових культур на прикладі пшениці організації адаптованих під них стресових індексів.

Розділ 1. Стан питання.

На цей час, за даними сайту Index DataBase (<https://www.indexdatabase.de>) для спектрального моніторингу створено більш ніж 500 різноманітних індексів. Біля 90% з представлених на сайті індексів, розроблених передусім для супутникових платформ, використовують інфрачервоний діапазон випромінювання. Така увага саме до ІЧ діапазону пояснюється 2 причинами:

1. ІЧ діапазон є перспективним для дистанційної діагностики стану рослин, оскільки саме в ньому:

- ближній інфрачервоний (NIR) (700-1400 нм) – відбивні характеристики залежать від структури клітин;
- короткохвильовий інфрачервоний (1400-2000 нм) – відбивні характеристики залежать від вмісту води в тканинах;

2. ІЧ діапазон був обраний для того щоб відрізнити власне рослини від ґрунту. На рис. 1 представлено залежність відбивної здатності різних об'єктів у оптичному та ІЧ діапазонах [1]. Як видно з представлених даних відбивна здатність рослин та ґрунту має максимальну різницю саме в ІЧ діапазоні. Але треба враховувати, що для супутникових рішень сільськогосподарського призначення розподільна здатність обладнання в середньому складала кілька

метрів на піксель для того щоб відрізнити рослини від ґрунту ввели поняття лінії ґрунту (ЛГ).

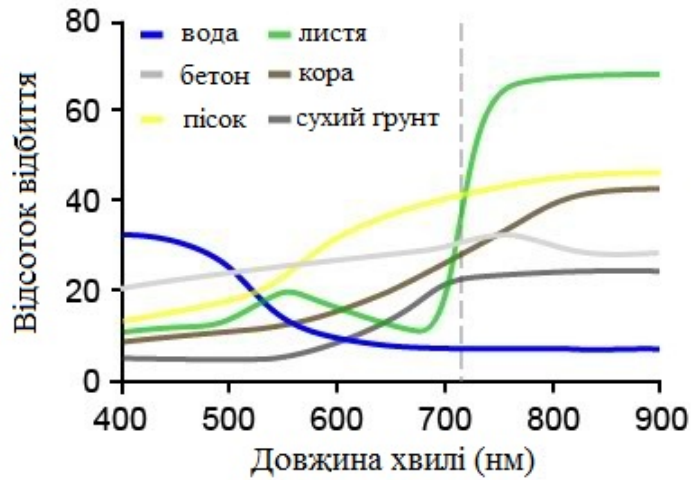


Рис. 1. Відсоток відбитого світла залежно від довжини хвилі і матеріалу.

У трикутній області в спектральному просторі RED-NIR даних для супутникових даних було встановлено, що найвища точка трикутника, яка лежить в області низького відображення в червоній області спектра і високого відбивання в ближньому ІЧ діапазоні, відповідає районам з рясною рослинністю, а плоска частина трикутника, що лежить навпроти кінця трикутника, відповідає чистому ґрунту [2] (рис. 2).



Рис. 2. Типовий розподіл значень відображення для сільськогосподарських культур в червоному і ближньому інфрачервоному каналах

При використанні ІЧ діапазону спектру для досліджень було встановлено що при всій різноманітності, ВІ, здебільшого, для територій із розрідженим рослинним покривом працюють не дуже якісно. Якщо рослинний покрив зріджений, спектр знімка залежить, в основному, від ґрунту. Ґрунти можуть відрізнятися дуже сильно по відображенню, навіть якщо для аналізу використовуються дуже широкі спектральні діапазони. Крім того, спектральні показники ґрунтів залежать від впливу навколишнього середовища, наприклад зволоження. Ґрунтовий фон сильно впливає на індекси – якщо він яскравий, то значення індексу буде меншим, якщо фон темний, індекс буде більшим. Багато фонових матеріалів, таких як ґрунт, каміння, рослинна підстилка тощо сильно варіюють в червоному-ближньому ІЧ діапазоні, що може помітно змінити значення ВІ [3]. На початкових стадіях вегетації коли рослини мають малі габарити наявність ґрунту в кадрі маже становити істотну проблему, завдяки якій використання супутникових рішень є вкрай ускладнене.

Проте саме початкові стадії вегетації є придатними для здійснення керування врожаєм та організації диференційованого підживлення. Отримання дешевих знімків високої розподільчої здатності для технологій точного землеробства можливо при використанні дронів, розподільча здатність знімків яких визначається висотою польоту і може складати кілька мм/піксель. Найбільш поширені моделі БПЛА використовують оптичний діапазон, який також є інформативним для потреб дистанційного зондування. Так Т.Шадчиною [4], було запропоновано метод аналізу стану азотного живлення рослин, який використовує масив значень спектрів відбиття і базується не на величинах інтенсивності каналів, а на формі кривої спектру відбиття саме в оптичному діапазоні спектру. Така методика вимагає використання спеціалізованого обладнання, вартість якого, на цей час вимірюється десятками тисяч доларів та потребує потужного носія, що обмежує можливість її масового застосування. Проте перспектива використання для аналізу одночасно декількох спектральних каналів вимірів є вкрай перспективною.

На цей час при використанні дронів намагаються використовували стресові індекси створені для супутникових рішень так розроблені безпосередньо під БПЛА. Супутникові індекси передусім використовують для пошуку стресових ділянок поля та оцінки перспектив врожаю. В роботі Mónica Herrero-Huerta та ін. (2014) [5] і визначення стану мінерального живлення використовували стандартні індекси такі як NDVI, проте для оцінки кількості освітлення використовували 12 різнокольорових наземних шаблонів, що навряд чи можливо у виробничих умовах (рис.3).

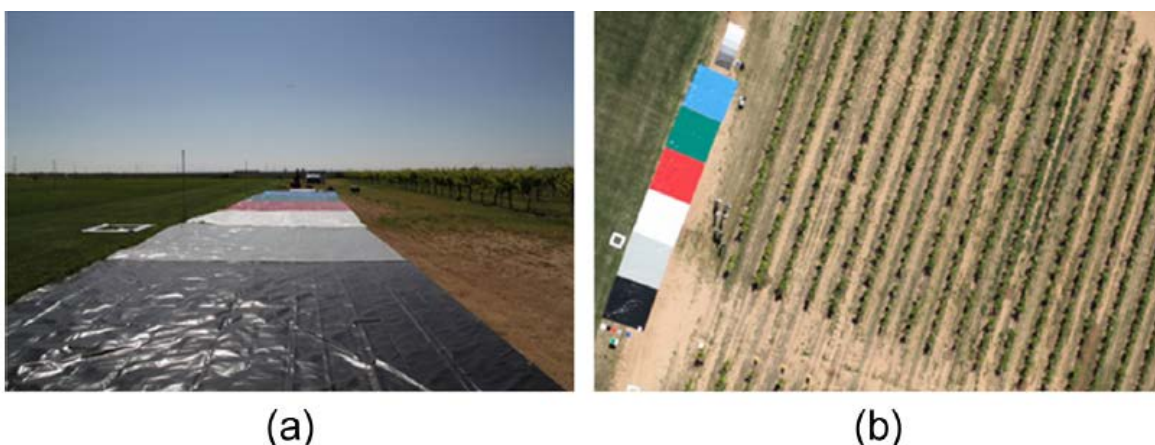


Рис. 3 Калібрувальні панелі (а) та фото дослідної ділянки із панелями (b)

Аналогічне рішення із використанням шаблонів було використано в роботі Haitao Xiang (2011) [6] де для використання індексів NDVI, GNDVI, RVI, GRI використовували три шаблони, виходячи з кількості вимірювальних каналів саме NIR, Red, Green. Оскільки шаблон для впевненої ідентифікації повинен мати габарити біля одного м² то на практиці використовують один шаблон з певною градацією сірого кольору який закріплюють на даху легкового автомобіля, який переміщується вздовж поля разом із дроном. Взагалі методика калібрування щодо освітлення пов'язана із використанням оптичних шаблонів запозичена у супутникових технологій є невдала, оскільки за рахунок великого охопту місцевості із супутнику можливо виділити природні шаблони, що не завжди можливо з малих висот притаманних дронам.

При використанні паралельно із дроном наземного транспорту, що переміщується вздовж поля можливо використання і спеціалізованого сенсору

для фіксації освітлення, як було показано в роботі Rodriguez-Moreno F. (2016) [7], проте така методика є складною з організаційно-технологічних причин. Зенітний сенсор можливо розміщувати безпосередньо на дронах, як було реалізовано на MicaSense RedEdge (рис.4) та Slantrange [8], проте вартість такого обладнання без зважування носія складає від 5000 доларів США, що обмежують доступ до такого обладнання.

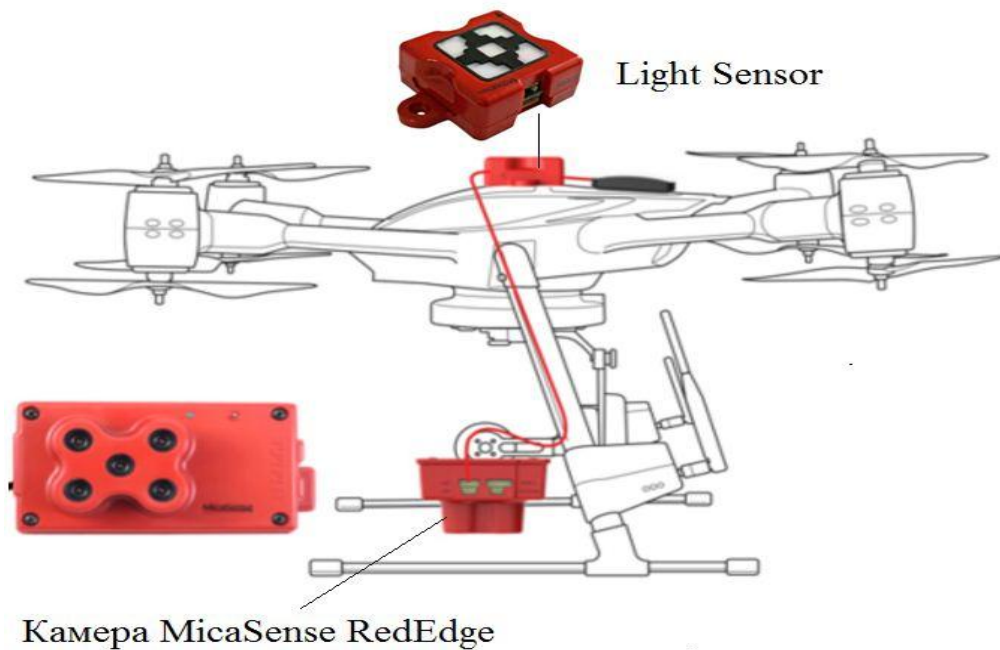


Рис. 4 Розміщення модуля Light Sensor та камери MicaSense RedEdge (знизу) на дроні

Альтернативою використання наземних шаблонів чи спеціалізованих зенітних сенсорів для практичних потреб моніторингу є використання службових даних фотоапарату, що було запропоновано в роботі М.М.Saberioona (2014) [9]. Окрім використання службових даних фотоапарата для калібрування щодо освітлення авторами було запропоновано створювати спеціалізовані під технології точного землеробства стресові індекси так як I_{PCA} (1)

$$I_{PCA} = 0.994(R-B) + 0.961(G-B) + 0.914(G-R) \quad (1)$$

За даними авторів при моніторингу стану мінерального живлення величина коефіцієнту кореляції між цим індексом та даними наземних досліджень було більшим, ніж у стандартних стресових індексах. – NGRDI,

VARI, GLI, GRVI тощо. Методика корекції щодо освітлення із використання службових даних фотоапарату була вдосконалена в роботі V Lysenko та інші (2016) [10]. Методика базується на використанні величини LV, що береться з даних exiff, що автоматично створюються фотоапаратом при збереженні даних в форматі jpeg.

Таким чином, з огляду літератури можна зробити висновки про можливість отримання відтворюваних даних при використанні дронів без залучання штучних шаблонів, та доцільності побудови спеціалізованих стресових індексів.

Розділ 2. Методика досліджень.

2.1 Стационарний дослід.

Дослідження проводились впродовж 2017-2018 років в багаторічному
стационарному досліді

України (GPS Position 50° 4' 29.00" N, 30° 13' 21.00" E) (рис.5.1 та 5.2).



Рис.5.1 Науковці на стаціонарі, дослідження озимої пшениці (18.10.2018)



Рис.5.2 Дослідна ділянка пшениці озимої (оптичний діапазон та псевдокольори отримані з допомогою інфрачервоного об'єктиву)

В межах стаціонару, крім варіантів основного дослідження, було закладено мікро польовий дослід для створення різних фонів азотного живлення рослин. Площа ділянки основного дослідження 100 м², ділянки мікропольового дослідження – 10 м², повторність трикратна (рис.5.2). Дослідження проводилися з озимою пшеницею сорту «Лимарівна» (фаза вегетації – вихід в трубку). Були створені відповідні ділянки поля із різною кількістю та складом добрив.

2.2 Аналітичні дослідження азотного живлення рослин

Рослини (надземну частину) відбирали з кожного повторення одного варіанту, промивали під струменем води для очищення від пилу й інших забруднень, просушували на паперових деках за кімнатної температури до повітряно-сухогостану. Після повітряного висушування матеріал подрібнювали ножицями і досушували в сушильній шафі за температури 60°C. Висушений матеріал розмелювали лабораторним млином. Після мокрого озолення визначали вміст азоту в рослинах фотометричним методом із реактивом Несслера.

2.3 Система дистанційного зондування.

Дистанційний моніторинг здійснювали із використанням квадрокоптеру DJI Phantom 3+, оснащеного фотокамерою PHANTOM VISION FC200 та гексакоптеру, що було скомпільовано компанією DroneUA (<http://drone.ua>) із фотокамерою GoPro HERO4. Вибір камери GoPro HERO4 було пов'язано із можливістю використання поряд із штатним об'єктивом оптичного діапазону і інфрачервоного об'єктиву. Такий об'єктив використовує так звані псевдокольори, де кожному з трьох каналів вимірів відповідає власна комбінація червоного та інфрачервоного каналів.

Радіочастотне калібрування проводили з використанням службових даних із exiff файлу фотознімки формату jpeg про параметри налагодження фотокамери за методикою [10], в основі котрої знаходиться можливість ока компенсувати в певних межах змінену освітлення шляхом зміни площі його зіниці. Оскільки технічно в наявній моделі фотокамери змінити діафрагму неможна, то змінювали не площу отвору а Exposure Time, тобто час, впродовж

якого світло потрапляло до фотоелементу. Зважаючи на зазначене, у дослідженнях використовували поняття Light Value (LV), величина котрої розраховується як:

$$LV = \log_2 \left(\frac{d^2}{t / \left(\frac{100}{ISO} \right)} \right), \quad (2)$$

де: d - значення діафрагми;

t – Exposure Time;

ISO – світлочутливість матриці цифрової фотокамери.

Для досліджень використовували фотознімки в форматі jpeg, котрий обчислюється за алгоритмами виробника фотокамери із врахуванням такого параметру як Light Source (формат освітлення), тому дослідження проводились із фіксацією цього параметру в ручному режимі для значення Fine Weather (Ясне небо). Для імітації змін освітлення проводили в ручному режимі корекцію експозиції, збільшуючи чи зменшуючи її від обраного фотоапаратом значення.

2.4 Обробка результатів

Обчислювання даних здійснювали з використанням програмного середовища Mathcad (version 14.0.0.163). Таке програмне забезпечення є достатньо розповсюдженим на території України, і передбачає пробний термін використання, тобто є доступним для фахівців. В програмі можливо задавати координати потрібних ділянок але для полегшення роботи вихідний файл зображення було попередньо поділено на потрібні дослідні ділянки з допомогою засобів Microsoft picture manager, які було збережено у вигляді окремих файлів.

```

Normal Arial 10 B I U
ORIGIN := 0
M := READRGB("D:\17_05_19\ДЛЮ0104_1.jpg")
w := cols(M) / 3 u := rows(M)
Червона складова
R1 := submatrix(M,0,u - 1,0,w)
n1 := rows(R1) - 1
m1 := cols(R1) - 1
t := 0..255
GIS(n1,m1,R) := for t ∈ 0..255
                 kt ← 0
                 for i ∈ 1..n1
                   for j ∈ 1..m1
                     kt ← kt + 1 if Ri,j = t
                 zt ← kt
                 z
R_1 := GIS(n1,m1,R1)

```

Назва файлу зображення та шлях

	0	1	2
0	85	80	99
1	75	92	107
2	55	86	98
3	53	81	...

M =

	0	1	2
0	85	80	99
1	75	92	107
2	55	86	98
3	53	81	...

R1 =

Зелена складова

```
G1 := submatrix(M,0,u - 1,w,2w - 1)
```

Синя складова

```
B1 := submatrix(M,0,u - 1,2w,3w - 1)
```

Рис. 6 Програма для обчислення розподілу складових кольору для файлу зображення формату RGB.

Текст програми для обчислення червоної складової для графічного файлу представлено на рис.6. З допомогою команди READRGB(“назва файлу“), матриця створює матрицю кількість строї якої відповідає кількості пікселів зображення по вертикалі, а кількість стовбців втричі більша ніж кількість стовбців по горизонталі. Перша третина стовбців відповідає значенням інтенсивності по червоній складовій, друга – зеленій а третя – синій. Інтенсивність складових кольору в форматі RGB вимірюється в цілих числах і змінюється в діапазоні 0...255. Представлена програма перетворює субматрицю (таблицю), яка відповідає певному кольору зображення, в таблицю перший стовпчик якої відповідає інтенсивності складової кольору а другий кількості пікселів з такою інтенсивністю забарвлення в зображенні. Виходячи з цих даних обчислювали середнє значення інтенсивності забарвлення для ділянки.

3. Отримані результати та дискусія

3.1. Режими польоту. На першому етапі було проведено дослідження щодо можливості впливу на відтворюваність даних висоти польоту БПЛА. В якості об'єктів дослідження були обрані ділянки поля з рекомендованою дозою внесення добрив (wheat) та ділянка ґрунтової дороги (road). Отримані результати представлено на рис.7

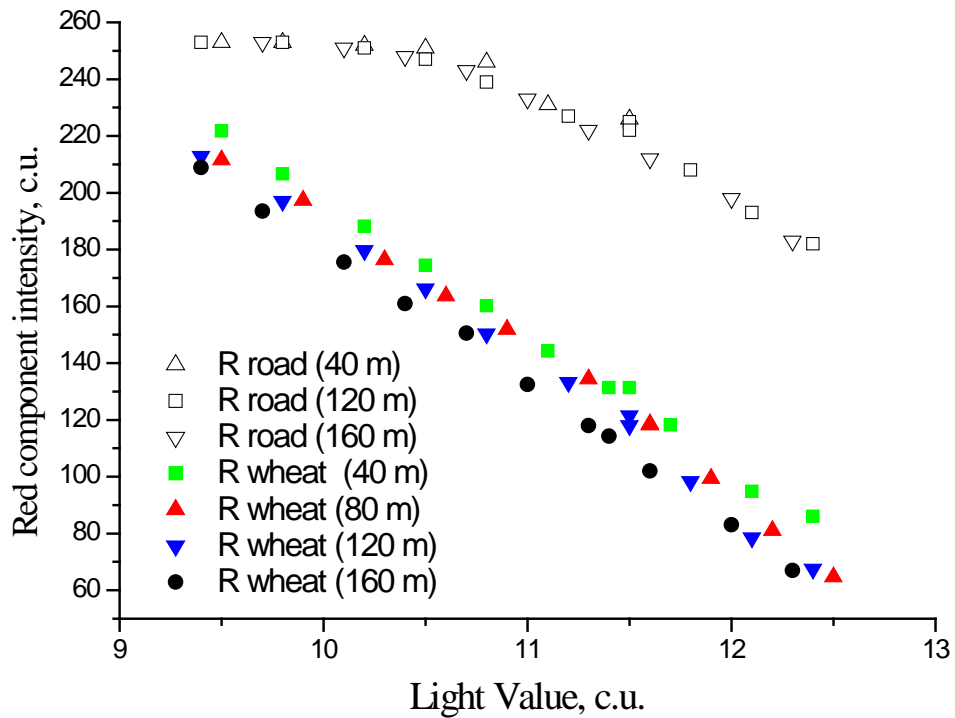


Рис. 7 Залежність інтенсивності червоної складової кольору від висоти польоту при зміні величини LV в ручному режимі.

Аналогічні залежності були отримані і для зеленої та синьої складової. В усіх випадках для пшениці залежність складової кольору при зміні величини LV має лінійний характер. Для ґрунтової дороги при завищеному терміні експозиції ($LV = 9 - 10$) фотоапарату подальший ріст інтенсивності складової кольору було обмежено 8-ми бітною моделлю кольору утворення, коли кожен компонент змінюється в діапазоні від 0 до 255.

Як слідує з приведених даних, спостерігається певна залежність величини інтенсивності складових кольору від висоти польоту для посівів пшениці, в той час як для ґрунтової дороги вона відсутня. Було зроблене припущення, що на малих висотах фотокамера за рахунок високої розподільчої здатності фіксує

ділянки із ґрунтом, що втрачається при збільшенні висоти. Оскільки досліди проводились при повітряне сухому стані ґрунту він мав біль світле забарвлення ніж рослини. При контрольному досліді, що було здійснено після дощу було отримано зворотну залежність. Для позбавлення похибок пов'язаних із присутністю в кадрі ґрунту було запропоновано здійснити попіксельну фільтрацію.

3.2 Фільтрація даних. Для налагодження фільтру враховували дві ділянки поля без рослин, а саме накатану ґрунтову дорогу (road) та ріллю (arable). Розподіл кількості пікселів виходячи з величини інтенсивності кольору представлено на рис. 8 та 9

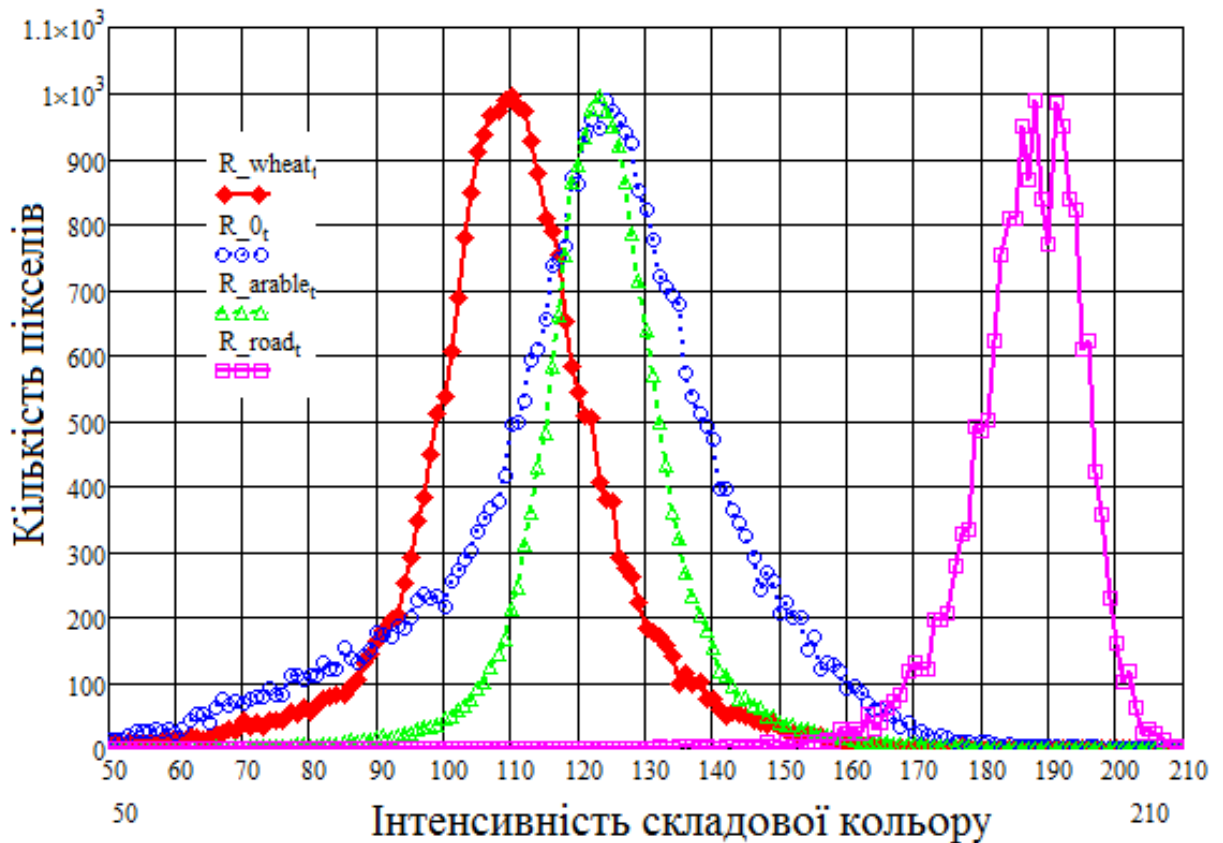


Рис. 8 Розподіл інтенсивностей червоної складової кольору об'єктів.

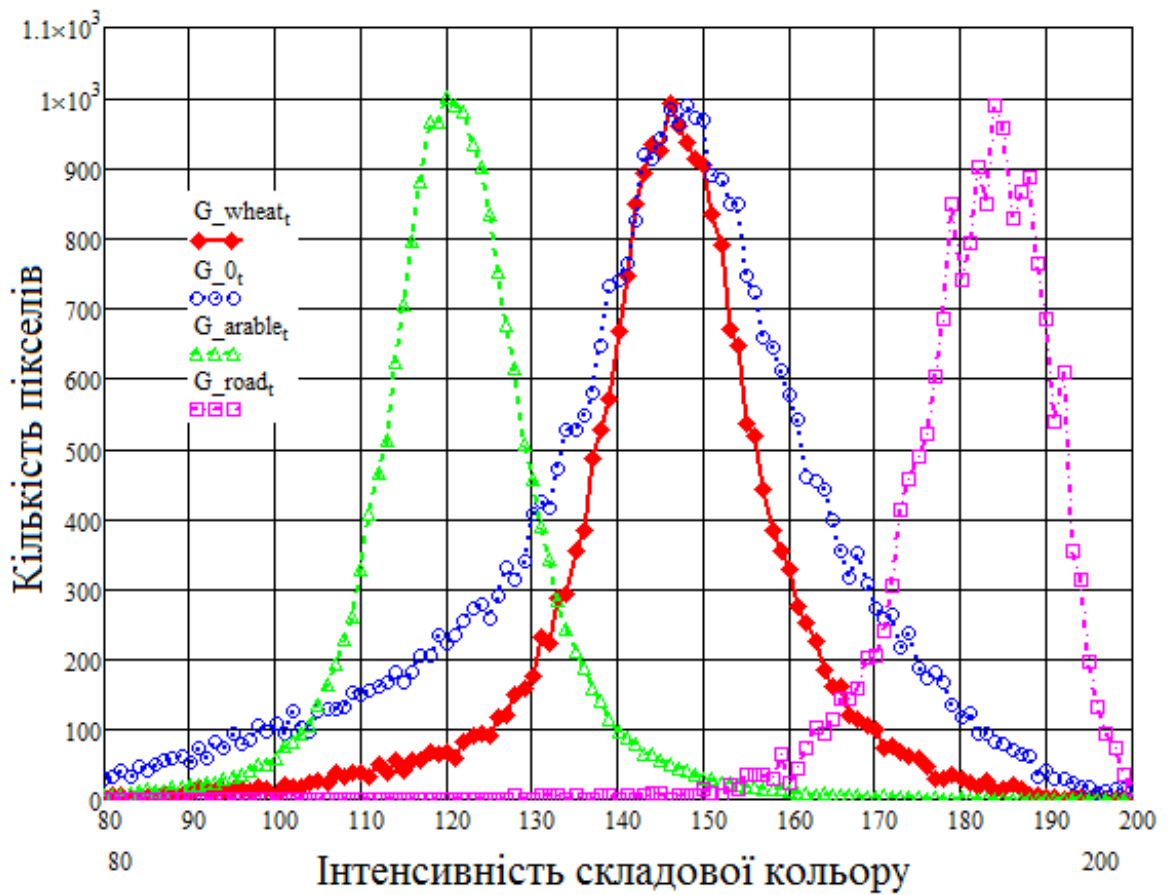


Рис. 9 Розподіл інтенсивностей зеленої складової кольору об'єктів.

Як видно з приведених даних, якщо по червоній складовій інтенсивність забарвлення ділянок без дорив та ріллі співпадають то по зеленій вони мають істотні різницю. На базі цього було в MathCAD було побудовано програму для фільтрації даних, представлену на рис.10

```

+ ORIGIN := 1      Завантаження файлу зображення для аналізу
M := READRGB("C:\Users\Yank\17_05_11\Пшеница_озим\Выбор\ДЛ01111_1_0.jpg")

w :=  $\frac{\text{cols}(M)}{3}$    u := rows(M)      Обчислення кількості строк та стовбців із пікселями зображення
z := u*w

                                     Bgt := 157      Значення R,G та B складових ґрунту на накатаній ґрунтовій дорозі
                                     Gg := 117      Нижня межа значень R, G та B складових кольору ґрунту (рілля)
                                     Gg1 := 124     Верхня межа значень R, G та B складових кольору ґрунту (рілля)

R1 := submatrix(M,1,u,1,w)      Обчислення червоної складової

R(M) :=  $\left\{ \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ n \leftarrow 0 \\ \text{for } a \in 1..u \\ \quad \text{for } b \in 1..w \\ \quad \quad \text{if } (M_{a,b+2\cdot w} \leq Bgt) \wedge [(M_{a,b+w} \leq Gg) \vee (Gg1 \leq M_{a,b+w})] \\ \quad \quad \quad \left\{ \begin{array}{l} s \leftarrow s + M_{a,b} \\ n \leftarrow n + 1 \end{array} \right. \\ q_1 \leftarrow \frac{s}{n} \\ q_2 \leftarrow \frac{n}{z} \\ q \end{array} \right.$ 

R(M) =  $\begin{pmatrix} 118.133 \\ 0.969 \end{pmatrix}$ 

```

Рис.10 Програма для обчислення значення каналу із фільтрацією даних по G каналу.

Оскільки кожен піксель зображення має три складові кольору то в запропонованій схемі фільтрації, якщо по будь якій з складових кольору ділянку було розпізнано як ту, що не відповідає рослинам в подальших обчисленнях її не обчислювали. За отриманими результатами інтенсивності RGB для ділянок поля до яких здійснили внесення рекомендованої кількості мінеральних добрив (1) та без внесення добрив (0) склало {78:109:84} та {103:120:106} відповідно. При фільтрації виключно по даним зеленого каналу були отримані такі результати {83:109:88} та {114:120:117} відповідно. Таким чином фільтрація ґрунту найбільш ефективним з зелений канал.

3.3 Стресові індекси для БПЛА.

Підживлення пшениці передбачає кілька етапів підживлення азотними добривами такі як кущення, вихід трубку та колосіння. Остання підживлення в певному сенсі є ризикованим оскільки в разі відсутності дощів може привести до пошкодження посівів. Підживлення в фазі кущення є не оптимальним з точки зору програмування врожаю оскільки невідомо як будуть розвиватися рослини надалі. Виходячи з цього для програмування врожаю найбільше використовують саме підживлення в стадії вихід в трубку. На рис.11 показано фотознімки посівів пшениці у фазі вегетації вихід в трубку.



Рис. 11 Посіви пшениці в фазі вихід в трубку.

Параметри налагодження цифрового фотоапарату при дослідженнях: Exposure Time при зйомці в оптичному діапазоні – 0,00069 с (FC200); Exposure Time при зйомці в інфрачервоному діапазоні - 0,00252 (GoPro); Aperture Value – 2.8; Light Source - Fine Weather (рис. 12).

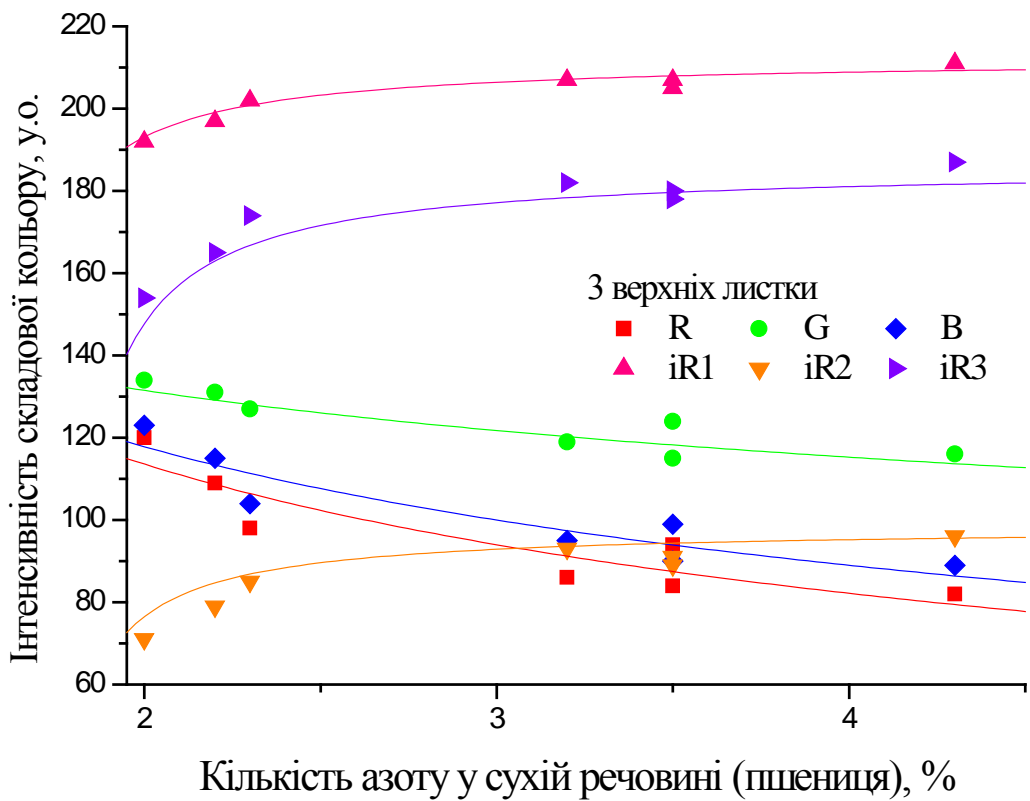
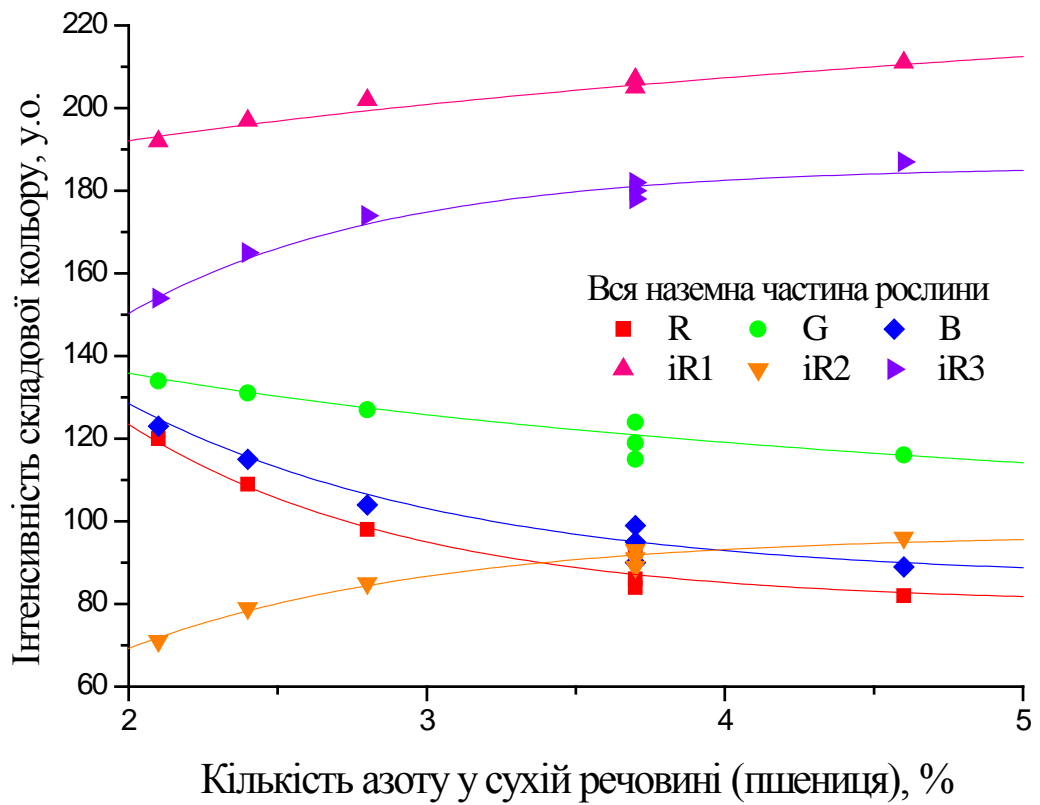


Рис. 12. Залежність інтенсивності складових кольору від кількості азоту в сухій речовині, для надземної частини рослин (графік зверху) та трьох верхніх листків (графік знизу)

Найбільш розповсюджені індекси, такі як NDVI, побудовані на принципі, що в певних діапазонах відбувається максимальне поглинання чи відбивання випромінювання. За таким самим принципом були побудовані перспективні індекси, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Перспективні спектральні індекси для озимих культур на прикладі пшениці

№ з/п	Діапазон	Назва	Рівняння	R ² *		h _{max} /h _{min}
				н.ч	3 лис.	
1	RGB	R		0.83	0.72	1.46
2		G		0.81	0.75	1.17
3		B		0.85	0.76	1.38
4		GR	GR = (G - R)/(G + R)	0.83	0.68	3.12
5		GB	GB = (G - B)/(G + B)	0.85	0.73	2.85
6		BR	BR = (B - R)/(B + R)	0.44	0.27	2.79
7	R_iR	iR1		0.92	0.81	1.1
8		iR2		0.88	0.75	1.35
9		iR3		0.86	0.72	1.21
10		iRa	iRa = (iR1 - iR3)/(iR1 + iR3)	0.75	0.59	1.82
11		iRb	iRb = (iR1 - iR2)/(iR1 + iR2)	0.88	0.76	1.18
12		iRd	iRd = iR3/iR1	0.77	0.61	1.11
13	RGB+R_iR	GiR3	GiR3 = (iR3 - G)/(iR3 + G)	0.87	0.77	3.37
14		GiR2	GiR2 = (G - iR2)/(G + iR2)	0.88	0.77	3.26
15		RiR3	RiR3 = (iR3 - R)/(iR3 + R)	0.85	0.85	3.15
16		RiR1	RiR1 = (iR1 - R)/(iR1 + R)	0.86	0.74	1.83

Примітка *: Величина R² відповідає коефіцієнту детермінації при апроксимації для лінійної залежності. Саме лінійну залежність було обрано виходячи з того, що саме такий характер є найбільш оптимальним при побудові технічних засобів для диференційованого внесення добрив.

Виходячи з приведених даних видно, що і оптичний діапазон і використання псевдокольорів може ефективно використовуватись для дистанційного моніторингу стану азотного живлення рослин. Отже стандартне

сенсорне обладнання дронів може стати ефективним інструментом для агронома при керуванні врожаєм.

Розділ 4. Напрями подальших досліджень

При моніторингу суцільних культур при достатньому розвиненні рослин кількість ділянок в кадрі, що відповідають ґрунту має бути незначною, проте для пропасних культур вплив ґрунту на спектральні портрети може стати принциповим. В подальших дослідках планується використати запропоновану методику на просапних культурах на прикладі кукурудзи.

В дослідках розглядалися лише спектральні показники, проте візуально густина посівів має залежність від стану мінерального живлення. Додатковим параметром, що підвищить точність та відтворюваність даних при моніторингу стану азотного живлення може стати і геометричний параметр а саме площа листової поверхні. В подальших дослідженнях вважаємо за доцільне перевірити це припущення.

Висновки:

1. Максимальна розподільна здатність, тобто відношення максимальної величини до мінімальної, спостерігається для оптичного та оптично-інфрачервоного діапазонів.
2. При оцінці значень спектральних показників пшениці коефіцієнт детермінації, при апроксимації у вигляді лінійної залежності, має приблизно однакові значення для оптичного й ІЧ діапазонів;
3. Незалежно від спектрального діапазону, коефіцієнт детермінації при апроксимації у вигляді лінійної залежності вищий на 10-30 %, коли азот визначали у наземній частині рослин, ніж у трьох верхніх листах, що доцільно враховувати при побутові спектральних індексів;
4. З урахуванням можливості апаратної реалізації, оптимальним є оптичний діапазон який можливо ефективно використовувати для оцінки стану азотного живлення.

Список використаної літератури

1. Infrared Photography with a Digital Camera // <http://www.wrotniak.net/photo/infrared/>
2. Richardson, A.J. (1977) Distinguishing vegetation from soil background information. Richardson, A.J.; Wiegand, C.L. // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* Vol.43. №2 P.1541-1552
3. Плотников Д.Е. Разработка методов дистанционной оценки растительного покрова на основе многолетних спутниковых измерений квазипериодических вариаций спектральной яркости : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.01 / [Место защиты: Ин-т косм. исслед. РАН].- Москва, 2012.- 158 с.
4. Shadchina T.M. Elaboration of theoretical bases and methods of the remote sensing of winter wheat crops using the high resolution spectrometry.-Manuscript. Thesis for Dr.Sci (Biol.) by speciality 03.00.12-Plant Physiology.-Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1999.
5. Mónica Herrero-Huerta (2014) Vicarious radiometric calibration of a multispectral sensor from an aerial trike applied to precision agriculture // Mónica Herrero-Huerta, David Hernández-López, Pablo Rodriguez-Gonzalvez, Diego González-Aguilera, José González-Piqueras. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 108, P. 28-38
6. Haitao Xiang (2011) An automated stand-alone in-field remote sensing system (SIRSS) for in-season crop monitoring // Haitao Xiang, Lei Tian. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 78, № 1, P.1-8
7. F. Rodriguez-Moreno (2016) Spectral monitoring of wheat canopy under uncontrolled conditions for decision making purposes // F. Rodriguez-Moreno, F. Zemek, J. Kren, M. Píkl, V. Lukas, J. Novak. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 125 P. 81-88
8. Jianfeng Zhou (2016) Evaluation of ground, proximal and aerial remote sensing technologies for crop stress monitoring // Jianfeng Zhou , Lav R. Khot,

Haitham Y. Bahlol, Rick Boydston, Phillip N. Miklas. IFAC-PapersOnLine. Vol. 49, № 16, P. 22–26

9. M.M.Saberioona (2014) Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale // M.M. Saberioona, M.S.M. Amina, A.R. Anuarb, A. Gholizadehc, A. Wayayokd, S. Khairunniza-BejodaSmart. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Vol.32 P.35–45

10. V Lysenko (2016) Drones camera calibration for the leaf research // V Lysenko, O Opryshko, D Komarchyk, N Pasichnik Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК Vol.252 P.61–65