



DOI: 10.36023/ujrs.2020.26.178

УДК 528.855:58.04

Визначення вмісту азоту і хлорофілу в рослинах озимої пшениці двох сортів за даними наземного і аеродистанційного спектрометрування

Г. М. Жолобак *, С. С. Дугін, О. М. Сибірцева, Т. А. Казанцев, І. Ф. Романчук

ДП “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. О. Гончара 55 Б, Київ 01054, Україна

Азот в рослинному організмі входить до складу зеленого пігменту хлорофілу, а також білків, нуклеїнових кислот, фітогормонів та алкалоїдів, що вказує на пріоритетну роль цього елемента в житті рослин. Хлорофіл є найважливішим пігментом фотосинтетичного процесу, визначального для життєдіяльності всіх гетеротрофних організмів планети. Вищесказане зумовлює наявність тісного зв'язку між вмістом в рослинному організмі азоту і хлорофілу. Вміст азоту в рослинах слугує підґрунтям щодо коригування їх азотного живлення та розрахунку доз внесення азотних добрив для формування високих врожаїв. Це зумовлює сталу актуальність вивчення вмісту азоту та хлорофілу в рослинах, особливо за допомогою новітніх засобів та методів із залученням даних дистанційного зондування. Предметом дослідження є зв'язок між відбивними параметрами рослинності у вигляді 19 вегетаційних індексів (BI) та її біохімічними характеристиками, зокрема, вмістом азоту та хлорофілу. Тест-ділянки на виробничих посівах двох сортів озимої пшениці, відмінних за фітопатологічною ситуацією у фазу молочної стиглості, вирощених на угіддях Барішівської зернової компанії під урожай 2016 р., слугували об'єктом досліджень. Інфікування збудниками грибних захворювань посіву сорту Богдана спричинило достовірні міжсортівні відмінності біохімічних показників, одержаних для загального азоту макрометодом К'ельдаля, а для кількості хлорофілу — за даними сканування з БПЛА. З дев'ятнадцяти BI, розрахованих за даними аеродистанційного спектрометрування приладом ASD FieldSpec® 3FR більшість (16 BI) змінювались узгоджено зі змінами вмісту азоту та хлорофілу в сортах. З них CI rededge, CI green, MTCI, RVI, D_{731}/D_{700} та D_{735}/D_{700} більш, ніж удвічі, а NDRE1 та D_{718}/D_{700} практично в півтора рази були вищі у сорту Скаген, ніж у сорту Богдана. Лише три індекси: NDVI, Green NDVI та NI мали межі флуктуацій своїх значень у тих же рамках, що й сортові відмінності біохімічних показників.

Ключові слова: вегетаційні індекси, вміст загального азоту, вміст хлорофілу, БПЛА, наземна спектрометрична зйомка, посіви озимої пшениці

© Г. М. Жолобак, С. С. Дугін, О. М. Сибірцева, Т. А. Казанцев, І. Ф. Романчук. 2020

1. Вступ

Сьомий елемент періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва — азот (N, нітроген) є основним компонентом білкових речовин, які визначають існування на Землі живих організмів. Він входить до складу молекул нуклеїнових кислот — носіїв генетичної інформації. Водночас цей елемент є складовою частиною пірольних кілець, котрі формують порфіринові ядра молекул хлорофілу — найважливішого пігменту фотосинтетичного процесу, визначального для життєдіяльності всіх гетеротрофних організмів планети. Вищесказане зумовлює наявність тісного зв'язку між вмістом в рослинному організмі азоту і хлорофілу.

Довгий час їх кількісне визначення велось виключно хімічними методами, які передбачають руйнацію рослинного матеріалу. З розвитком дистанційного зондування перед дослідниками відкрились можливості неструктивних способів з'ясування концентрації азоту та хлорофілу в рослинах. Прикладом цього може слугувати розроблений Центром дослідження і розвитку Yara International (вул. Ханінгоф (Hanninghof), м. Дюльмен (Dülmen), Німеч-

чина) прилад N-Sensor, який вперше в 1999 р. був представлений для використання на зернових культурах (<https://www.yara.ru/crop-nutrition/tools-and-services/n-sensor>). Його робота заснована на вимірюванні даних відбиття світла від листової поверхні в червоному (650 нм — максимум абсорбції хлорофілом) та ближньому інфрачервоному (960 нм) діапазонах. При цьому для отримання результатів слід просканувати по 30 шт. листових пластинок для кожного варіанту відбору проб (Прилад експрес-діагностики..., 2012), що дозволяє одержати середні значення вмісту хлорофілу в умовних одиницях SPAD (від 0 до 99.9) та вмісту азоту для порівняння польових і довідкових даних. Проте в цих дослідженнях наявний контакт між приладом і листком. Для безконтактного і неруйнівного визначення вмісту азоту і хлорофілу придатні дані дистанційного спектрометрування, на підставі яких обчислюються вегетаційні індекси, котрі тісно корелюють з вказаними показниками (Gitelson, 2018). Наприклад, А. Гітельсон та О. Соловченко (Gitelson, Solovchenko, 2017) розробили алгоритми оцінки вмісту хлорофілу за формулами на основі хлорофільного індексу червоного краю (red edge chlorophyll index, CI_{RE}) та меріс-терrestrial хлорофільного індексу (MERIS terrestrial chlorophyll index, MTCI). Ефективність цих неруйнівних методів, заснованих на вимірюванні відбиття світлових потоків від листової поверхні, була перевірена

* E-mail: zhgm@casre.kiev.ua
Tel: +380 44 486 11 48

на 45-ти видах рослин з широкою варіабельністю структури листків, вмістом в них пігментів та їх складом.

Слід зазначити, що вміст азоту в рослинах слугує підґрунтям щодо коригування їх азотного живлення та розрахунку доз внесення азотних добрив для формування високих врожаїв. Це зумовлює актуальність вивчення вмісту азоту та хлорофілу в рослинах, особливо за допомогою новітніх засобів та методів із залученням даних дистанційного зондування.

Нами у 2016 р. проводились дослідження виробничих посівів озимої пшениці Баришівської зернової компанії, під час яких визначались як фізіологічні параметри рослинного покриву (щільність рослин на 1 м^2 , їх висота, біомаса, урожайність), так і біохімічний показник — процентний вміст загального азоту в окремих частинах рослин. Вони порівнювались з вегетаційними індексами, обчисленими за супутниковими даними місії Sentinel-2 та за результатами наземного спектрометрування приладом ASD FieldSpec® 3FR. Перші одержані результати висвітлено у статтях В. Лялька та ін. (Лялька та ін., 2017), Г. Жолобак та ін. (Жолобак та ін., 2017; Жолобак та ін., 2018). Згодом нами було отримано значення вмісту хлорофілу в рослинному покриві озимої пшениці за даними сканування з безпілотного літального апарата (БПЛА) та розраховано вміст нітрогену в рослинному матеріалі відбивного ярусу на одиницю поверхні обстежених тест-ділянок.

Метою статті є зіставлення вмісту азоту і хлорофілу у рослинах двох сортів озимої пшениці з вегетаційними індексами, обчисленими за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR, щоб відібрати з них найбільш придатні для дистанційного визначення вказаних біохімічних параметрів рослинності.

2. Матеріали і методи досліджень

Об'єкт досліджень — дві ділянки посівів озимої пшениці площею 1 га кожна, які були розташовані на виробничих полях Баришівської зернової компанії поблизу м. Березань Баришівського району Київської області (координати центрів обох ділянок: першої — $50^{\circ}21'02.40''$ пн. ш. і $31^{\circ}36'12.03''$ сх. д. та другої — $50^{\circ}19'57.83''$ пн. ш. і $31^{\circ}33'12.97''$ сх. д.). Поблизу центрів цих ділянок на площі приблизно 10 м^2 17 червня 2016 р. здійснювався в трикратній повторності відбір проб рослинного матеріалу для визначення вмісту загального азоту в органах, які формували відбивну поверхню посіву. Кожна проба формувалась за рахунок зрізання наземної частини рослини з площі 0.1843 м^2 ($43\text{ см} \times 43\text{ см}$).

Вміст загального азоту визначався макрометодом К'ельдаля (наважка однієї проби рослинного матеріалу становила 20 г сухої речовини) в лабораторії гідробіології та екотоксикології Інституту зоології НАН Молдови, як описано в методичних рекомендаціях В. Спіріної і Т. Соловйової (Спірина, Соловйова, 2014). Біохімічний аналіз проводили у триразовій біологічній повторності.

На цьому ж місці від 12 до 15 год. при яасному небі перед відбором рослин проводилось їх спектрометрування приладом ASD FieldSpec® 3FR. ASD FieldSpec® 3FR — польовий портативний переносний спектрорадіометр, який охоплює діапазон реєстрації від 350 до 2500 нм. Весь спектр 350–2500 нм відображається в реальному часі на дисплеї. З його іншими технічними параметрами можна ознайомитись на сайтах: <http://www.asdi-rus.ru/catalog/25/> та <http://www.asdi.com/products/fieldspec-3-portable-spectroradiometer>. Кут огляду використаного об'єктива — 1° , тримає пістолетного типу з оптичною насадкою закріплювався на стандартному штативі з висотою над поверхнею ґрунту — 1.2 м, віддаль від об'єктива до ділянки спек-

трометрування посіву — 5 м, величина площі посіву, яка потрапляє в поле зору — 80 см^2 , кут нахилу оптичної осі об'єктива до вимірюваної площі — 14° . Калібрування до білого проводилось перед кожним вимірюванням на ділянці. Дані 10 спектрів (повторів вимірювання одного місця поверхні посіву кожного сорту) усереднювались програмно і використовувались для обчислення коефіцієнтів відбиття та вегетаційних індексів. Досліджені нами вегетаційні індекси наведено в Таблиці 1.

Характеристику більшої частини цих індексів (№№ 1–15) можна почерпнути зі статті (Дугін та ін., 2019). Індекси під номерами 16–19 були отримані з перших похідних спектрів відбиття та використання підходу, запропонованого в статтях (Kochubey and Kazantsev, 2007) та (Kochubey and Kazantsev, 2012). Суть підходу полягає в тому, що в графіках перших похідних спектрів відбиття рослин в області червоного краю (700–750 нм) існує 5 екстремумів, положення яких в середньому становить 700 нм, 715 нм, 725 нм, 730 нм і 735 нм. Співвідношення амплітуди екстремумів 2–5 (715–735 нм) та амплітуди екстремуму 1 (700 нм) тісно корелює з вмістом хлорофілу в листках рослин. В даному дослідженні положення екстремумів становили: 700 нм, 718 нм, 725 нм, 731 нм і 735 нм.

Вміст хлорофілу в рослинному покриві озимої пшениці визначали шляхом отримання мультиспектрального зображення поля за допомогою модифікованої фотокамери, встановленої на безпілотному літальному апараті (БПЛА) та конвертації зображення в карту вмісту хлорофілу за створеною заздалегідь регресійною моделлю.

Характеристики БПЛА, модифікація фотокамери, процес повітряної зйомки та створення регресійної моделі розрахунку вмісту хлорофілу детально описано в статті (Kazantsev et al., 2018). Стислий опис цих процесів наведено нижче.

Повітряна зйомка була проведена за допомогою БПЛА літакового типу, що керувався мікроконтролером АРМ (Arduino Pilot Mega) (Рис. 1).

Політ виконувався автоматично по заздалегідь прокладеному маршруту на висоті 150 м з контрольованою швидкістю в межах 10–15 м/с. Камера, встановлена на літаку, отримувала надирні знімки кожні 5 с, що забезпечувало перекриття поля зору 70% (тобто кожне фото відрізнялось від наступного на 30%). Такі налаштування дозволили згенерувати ортофотоплан з просторовим розділенням 6 см.

Для зйомки використовували камеру Canon S100, модифіковану таким чином, що замість червоного спектра камера реєструє ближній інфрачервоний (700–800 нм) (Рис. 2). Суть модифікації полягає в тому, що з камери видаляється фільтр, що відсікає ультрафіолетове та інфрачервоне світло, таким чином всі канали (R, G, B) стають чутливими до ультрафіолетового та інфрачервоного світла. В камеру додатково встановлюють фільтр із смугами пропускання в синьо-зеленому та інфрачервоному діапазоні. Така модифікація дозволяє отримати окремо сигнал NIR і NIR + Green і розраховувати вегетаційні індекси, що використовують ці канали.

Калібрування сигналів в каналах проводили за допомогою 3-х калібрувальних панелей з різними відбивальними властивостями з розміром $130 \times 130\text{ см}$, які розташовували на краю поля.

На основі створеного ортофотоплану була розрахована карта вегетаційного індексу GNDVI (Green NDVI) за формулою $GNDVI = (NIR - Green)/(NIR + Green)$ (Gitelson et al., 1996). Для перерахунку GNDVI у вміст хлорофілу було використано регресійну модель, отриману в попередніх дослідженнях при зіставленні даних повітряної зйомки та лабораторного хімічного аналізу рослин (Kazantsev et al., 2018).

3. Результати та їх аналіз

3.1. Характеристика біохімічних показників рослин двох сортів озимої пшениці у фазу молочної стиглості на досліджених тест-ділянках

Результати проведеного біохімічного аналізу на вміст загального азоту в рослинному матеріалі озимої пшениці засвідчили, що в рослин сорту Скаген цей показник був вищий для всіх дат відбору проб і для всіх взятих для дослідження частин рослин (Рис. 3). Найбільша достові-

рна відмінність між сортами пшениць спостерігалась в органах, які формували відбивну поверхню посіву. Зокрема в листках у фазу виходу в трубку (10 травня 2016 р.) та в колосі з зерном у фазу молочної стиглості (17 червня 2016 р.) ця різниця становила 34% та 40% відповідно. Слід зазначити, що переважання кількості азоту у вегетативних органах рослин сорту Скаген над сортом Богдана призвело в кінцевому підсумку до його вищих значень (на 12%) і в зрілому зерні цього сорту (11 липня 2016 р.).

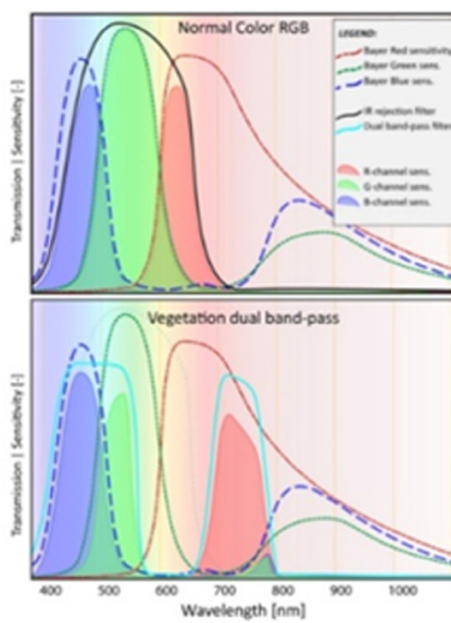
На підставі наявних даних про відсотковий вмісту азоту в

Таблиця 1.
Вегетаційні індекси, використані в даній роботі

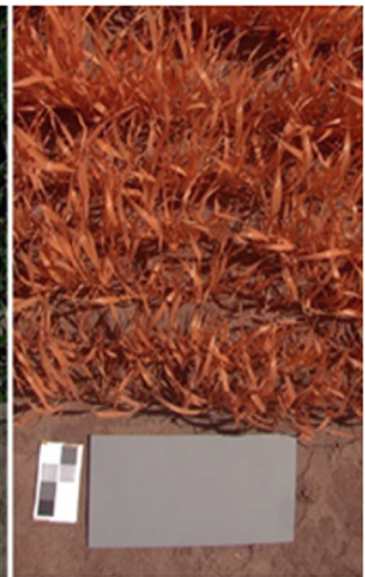
№	Індекс	Формула	Посилання
1	REP Red Edge Position	$REP = 700 + 40 \frac{(\bar{R} - R(700))}{(R(740) - R(700))};$ $\bar{R} = \frac{R(670) + R(780)}{2}$	Horler, 1983
2	MTCI MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	$MTCI = \frac{R(740) - R(705)}{R(705) - R(665)}$	Dash, Curran, 2004
3	NDVI (840, 665) Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI(840,665) = \frac{R(840) - R(665)}{R(840) + R(665)}$	Rouse et al., 1973
4	NDRE1 (740, 705) Normalized Difference Red-Edge1	$NDVI(740,705) = \frac{R(740) - R(705)}{R(740) + R(705)}$	Gitelson, Merzlyak 1994
5	NDRE2 (780, 705) Normalized Difference Red-Edge 2	$NDVI(783,705) = \frac{R(780) - R(705)}{R(780) + R(705)}$	Barnes et al., 2000
6	CI green Green chlorophyll index	$CI_{green} = \left(\frac{R(783)}{R(560)} \right) - 1$	Gitelson et al., 2006
7	CI rededge red edge chlorophyll index	$CI_{rededge} = \left(\frac{R(783)}{R(705)} \right) - 1$	Gitelson et al., 2006
8	Green NDVI (740, 560) Green Normalized Difference Vegetation Index	$GreenNDVI = \frac{R(740) - R(560)}{R(740) + R(560)}$	Gitelson et al., 1996
9	SAVI (840, 665) Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1 + L)$	Huete, 1988
10	EVI (840, 665, 440) Enhanced Vegetation Index	$EVI = \frac{2.5 * (NIR - RED)}{(NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE + 1)}$	Hunt et al., 2011
11	EVI2 (840, 665) Enhanced Vegetation Index	$EVI2 = \frac{2.5 * (NIR - RED)}{(NIR + 2.4 * RED + 1)}$	Jiang Z. et al., 2008
12	RVI (840, 665) Ratio Vegetation Index	$RVI = \frac{NIR}{RED}$	Jordan, 1969
13	NRI ₅₇₀ (570, 670) Nitrogen Reflectance Index	$NRI_{570} = \frac{R(570) - R(670)}{R(570) + R(670)}$	Filella et al., 1995
14	NI (800, 600) Nitrogen Index	$NI = \frac{R(800) - R(600)}{R(800) + R(600)}$	Ma et al., 1996
15	NI_Tian (491, 717, 740) Nitrogen Index_Tian	$NI_Tian = \frac{R(740)}{R(717) + R(491)}$	Tian et al., 2011
16	D718/D700	$dR/d\lambda(718)/dR/d\lambda(700)$	Kochubey, Kazantsev, 2007; 2012
17	D725/D700	$dR/d\lambda(725)/dR/d\lambda(700)$	Kochubey S., Kazantsev T., 2007, 2012
18	D731/D700	$dR/d\lambda(731)/dR/d\lambda(700)$	Kochubey S., Kazantsev T., 2007, 2012
19	D735/D700	$dR/d\lambda(735)/dR/d\lambda(700)$	Kochubey, Kazantsev, 2007; 2012



Рис. 1. Безпілотний літальний апарат, що використовували в дослідженнях



RGB



NIR-GB



Рис. 2. Характеристики камери, приклади фото та калібрувальні цілі

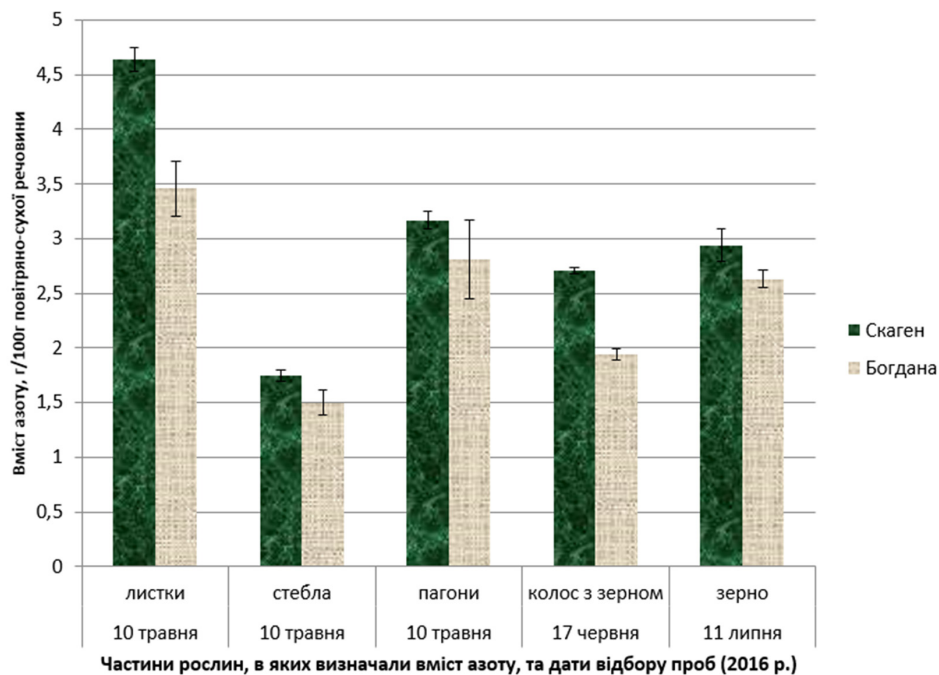


Рис. 3. Вміст азоту в рослинному матеріалі озимої пшениці (на діаграмі наведено середні значення показників та їх стандартні відхилення)

сухий речовині рослинного матеріалу та біомасу сухої речовини озимої пшениці у фазу молочної стиглості на площі 0.1843 м^2 у трикратній повторності для кожного сорту, було обчислено вміст цього елемента в рослинному покриві на одиницю поверхні обстежених тест-ділянок (Рис. 4). Як бачимо, кількість нітрогену в сухій речовині рослинного покриву, виражена в грамах на квадратний метр також на 22% вища для посіву рослин сорту Скаген, ніж для посіву рослин сорту Богдана, проте різниця між вмістом азоту в цьому перерахунку є неістотною, очевидно, через невелику повторність дослідів.

Обчислений за даними БПЛА для тієї ж дати вміст хлорофілу на одиницю поверхні дослідженої тест-ділянки сорту Скаген теж на 16% достовірно переважав цей показник, властивий сорту Богдана (Рис. 5).

Отримана за даними сканування з БПЛА карта вмісту

хлорофілу в рослинному покриві озимої пшениці у фазу молочної стиглості (Рис. 6) в цілому засвідчує, що на полі, де вирощувався сорт Богдана, вміст цього пігменту коливався між значеннями $3.5\text{--}6.2 \text{ мг/дм}^2$, а на полі, засіяному пшеницею сорту Скаген, він варіював між значеннями $1.8\text{--}7.3 \text{ мг/дм}^2$.

Цікаво зазначити, що на полі 1 чітко видно дві частини: ліву з нижчим вмістом хлорофілу ($4.8\text{--}5.4 \text{ мг/дм}^2$) та праву, де вміст хлорофілу коливався від 5.2 мг/дм^2 до 6 мг/дм^2 і вище. Саме на цій правій частині і розташовувалась ділянка спектрометрування та відбору проб рослинного матеріалу для визначення загального азоту у пшениці сорту Скаген. Як виявилось згодом при усному повідомленні співробітників Баришівської зернової компанії, частина поля з нижчим вмістом хлорофілу була засіяна озимою пшеницею, але іншого сорту.

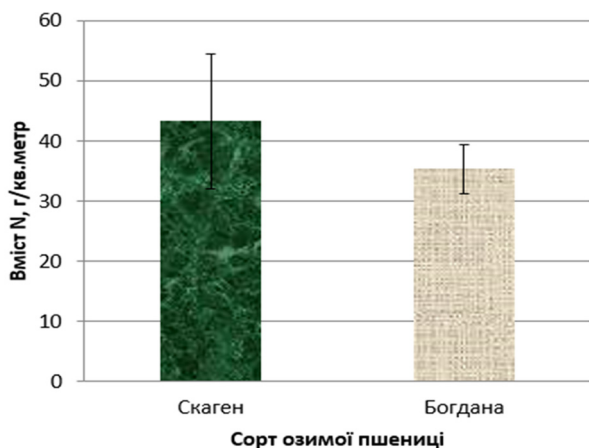


Рис. 4. Вміст азоту у сухій речовині рослинного покриву озимої пшениці (17 червня 2016 р., на діаграмі наведено середні значення показників та їх стандартні відхилення)

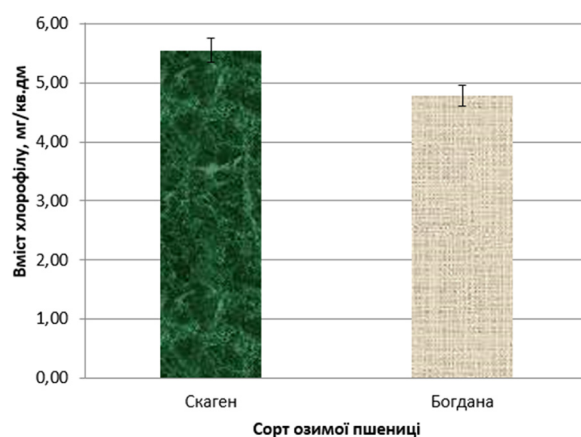


Рис. 5. Вміст хлорофілу в рослинному покриві тест-ділянок озимої пшениці за даними БПЛА (17 червня 2016 р., на діаграмі наведено середні значення показників та їх стандартні відхилення)

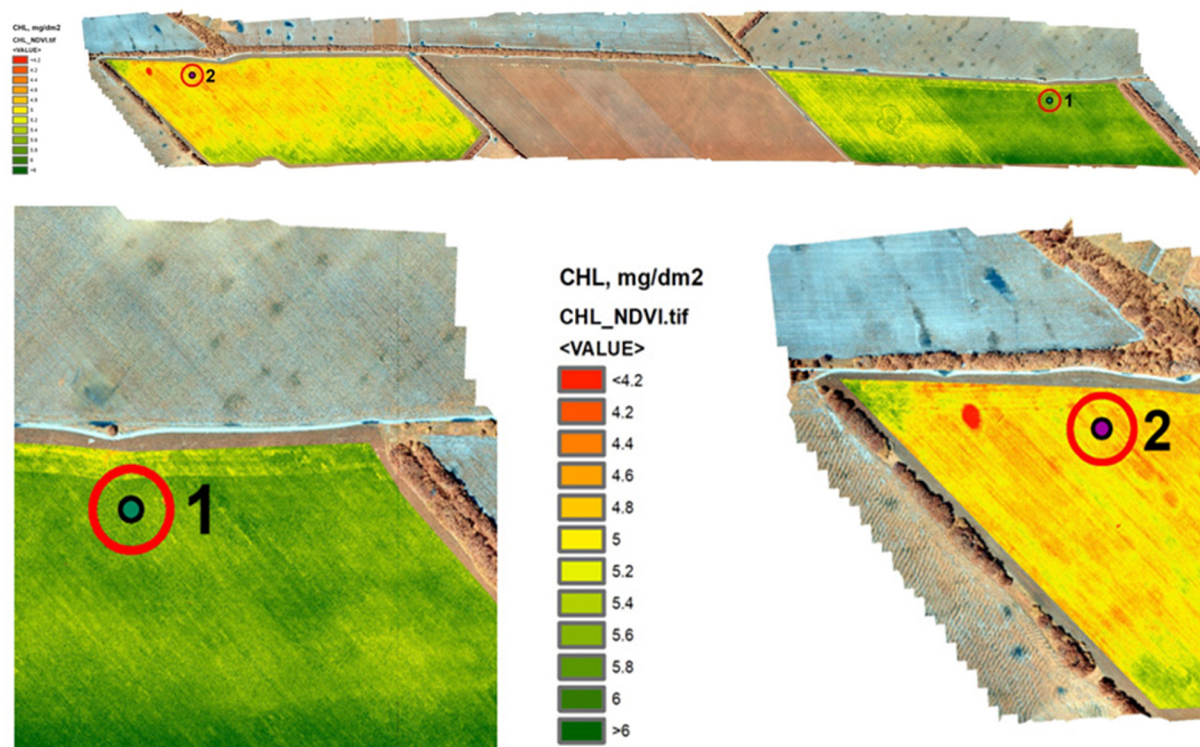


Рис. 6. Карта вмісту хлорофілу в рослинному покриві озимої пшениці за даними сканування з БПЛА на фоні візуальної карти з супутника WorldView-2 (Google Earth) від 17 червня 2016 р.

1 — поле зі сортом озимої пшениці Скаген, 2 — поле зі сортом озимої пшениці Богдана; а — загальний вигляд частини полів, обстеженої БПЛА; б — ділянки спектрометрування та відбору проб рослинного матеріалу для визначення загального азоту

Таблиця 2.

Співвідношення між біохімічними показниками озимої пшениці сортів Скаген та Богдана у фазу молочної стиглості на обстежених тест-ділянках *

Показник та одиниця вимірювання	Сорт озимої пшениці		Перевага сорту Скаген над сортом Богдана (%)
	Скаген	Богдана	
Вміст азоту в рослинному матеріалі озимої пшениці, грам/100 г повітряно-сухої речовини	2.71 ± 0.03	1.94 ± 0.05	39.7
Вміст N на 1 м ² посіву, г	43.3 ± 11.2	35.4 ± 4.1	22.3
Вміст хлорофілу в рослинному покриві тест-ділянок озимої пшениці за даними сканування з БПЛА, мг/дм ²	5.55 ± 0.20	4.78 ± 0.18	16.1

* В таблиці наведено середні значення показників та їх стандартні відхилення.

Описані вище результати зведено в Таблиці 2, де відображено співвідношення між дослідженими біохімічними показниками двох обстежених сортів на вибраних тест-ділянках, отриманих 17 червня 2016 р., коли рослини перебували у фазі молочної стиглості.

Таким чином, вищенаведені дані підтверджують переважання рослин озимої пшениці сорту Скаген над сортом Богдана за дослідженими біохімічними показниками у фазу молочної стиглості зерна. Причиною цього факту є прогресувальне ураження листя та колосу озимої пшениці сорту Богдана грибними хворобами, зокрема фузаріозом, про що вже йшлося в статтях (Лялько та ін., 2017; Жолобак та ін., 2017; 2018). Коливання переважуючих значень вмісту хлорофілу та азоту у сорту Скаген, як це видно з Таблиці 2, знаходиться в межах 16–40%.

3.2. Аналіз значень вегетаційних індексів за даними ASD FieldSpec® 3FR у стосунку до біохімічних показників рослин двох сортів озимої пшениці у фазу молочної стиглості на досліджених тест-ділянках

За даними спектрометрування приладом ASD FieldSpec® 3FR для вказаних тест-ділянок було обчислено вегетаційні індекси, значення яких приведено в Таблиці 3. Підбір індексів здійснювався на основі їх чутливості до змін вмісту хлорофілу в рослинному покриві, а для тих індексів, у назві яких є термін “нітроген” — ще й до реагування на вміст азоту в рослинах.

Приведені в Таблиці 3 дані величин вегетаційних індексів узгоджуються з визначеними нами та описаними вище біохімічними параметрами озимої пшениці і також засвідчують,

Таблиця 3.

Значення вегетаційних індексів для тест-ділянок посівів озимої пшениці двох сортів у фазу молочної стиглості.

№ п/п	Індекс (ум. од.)	Сорт озимої пшениці		Перевага сорту Скаген над сортом Богдана (%)
		Скаген	Богдана	
1	REP (<i>nm</i>)	729.14	720.54	1.2
2	MTCI	4.668	2.182	113.9
3	NDVI	0.901	0.781	15.4
4	NDRE1	0.609	0.406	50.0
5	NDRE2	0.902	0.785	14.9
6	CI green	8.025	3.318	141.9
7	CI rededge	5.117	1.894	170.2
8	Green NDVI	0.718	0.561	28.0
9	SAVI	0.715	0.707	1.1
10	EVI	0.829	0.801	3.5
11	EVI2	0.801	0.795	0.8
12	RVI	6.387	3.028	110.9
13	NRI ₅₇₀	0.318	0.288	10.4
14	NI	0.850	0.678	25.4
15	NI_Tian	2.076	1.415	46.7
16	D ₇₁₈ /D ₇₀₀	1.871	1.216	53.9
17	D ₇₂₅ /D ₇₀₀	2.236	1.228	82.1
18	D ₇₃₁ /D ₇₀₀	2.531	1.145	121.0
19	D ₇₃₅ /D ₇₀₀	2.537	1.035	145.1

що рослини сорту Скаген демонструють кращі фотосинтетичні показники у порівнянні зі сортом Богдана. Приймаючи за 100% значення BI сорту Богдана, ми розрахували, на скільки відсотків BI сорту Скаген переважають сорт Богдана. Як бачимо, відсоток переважання значень BI рослин сорту Скаген над сортом Богдана різний. Максимальні значення переважання у нашому дослідженні демонструють такі вегетаційні індекси: CI rededge, CI green, MTCI, RVI, D₇₃₁/D₇₀₀ та D₇₃₅/D₇₀₀, які більш ніж удвічі вищі у сорту Скаген, ніж у сорту Богдана. Індекси NDRE1 та D₇₁₈/D₇₀₀ у сорту Скаген практично в півтора рази вищі, ніж у сорту Богдана. Натомість індекси SAVI, EVI та EVI2 майже не відрізняються між сортами, тобто вони не вловлюють виявлену нами різницю за біохімічними параметрами і тому для їх дистанційного визначення в нашому дослідженні ці індекси проявляють непридатність. Такі ж індекси як NDVI, Green NDVI та NI засвідчують перевагу сорту Скаген над сортом Богдана у тих самих межах, як і коливання кількостей азоту і хлорофілу, визначених відповідно біохімічним методом та скануванням з БПЛА. В Таблиці 3 вони виділені жирним шрифтом. Межі флуктуацій відсотків їх переважання між сортами становлять 15.4–35%. Синім шрифтом, також, показано два індекси NDRE2 та NI Tian, яким властиві близькі за величиною показники переваги сорту Скаген над сортом Богдана, а саме — 14.9% та 46.7%.

4. Обговорення результатів

Зіставлення відмінностей між сортами озимої пшениці за біохімічними показниками та значеннями вегетаційних індексів посівів у точках відбору проб проводилось на підставі того, що між цими параметрами існує прямо пропорційна залежність. Наприклад, в статті (Стопціани та ін., 2006) при найвищій кореляції ($r^2 = 0.65$) між концентрацією азоту в рослинах рису та розрахованим NDIOpt, обчислюваним за алгоритмом нормалізованого вегетаційного індексу на довжинах хвиль $\lambda i = 503 \text{ nm}$ і $\lambda j = 483$, за зміни концентрації азоту в рослинах втричі (від 1 до 3%) значення NDIOpt також коливались від 0.04 до 0.12 у. о., в три рази відрізняю-

чись між собою. Подібні залежності можна віднайти при аналізі отриманих даних стосовно взаємозв'язків між вмістом пігментів листків 33 видів однодольних та дводольних рослин двох місць зростання на Майорці (Іспанія) та окремих їх спектральних показників вегетації (Hallik et al., 2017).

Використання фотокамер, встановлених на БПЛА, як джерела даних для обчислення BI з метою моніторингу росту і розвитку сільськогосподарських культур останнім часом набуває все більшої популярності, про що узагальнено в огляді (Yang et al., 2017). Як показано в роботі (Walsh et al., 2018) про використання BI з БПЛА для визначення вмісту азоту в рослинах ярої пшениці, у фазу напередодні колосіння модель на основі CIgreen була єдиною моделлю, яка надавала тотожне співвідношення між розрахунковою і вимірюваною концентрацією N в рослинах. Нами також було отримано факт, що CI green, а особливо CI rededge максимально реагують на різницю у вмісті азоту і хлорофілу в рослинах. Проте, на нашу думку, ті BI, які змінюються у тих же межах, що й біохімічні показники, є найбільш придатними для об'єктивного оцінювання відмінностей між ними. Варто відмітити, що Т. Нігон та ін. (Nigon et al., 2015) вивчаючи здатність аеродистанційного гіперспектрального зондування прогнозувати N-стрес у картоплі, виявили що MTCI був найкращим спектральним показником, який можна використовувати для визначення азоту в листках картоплі. При цьому зазначалось, що спектральні дані часто завищували рівень азотного стресу у порівнянні з мінливістю концентрації N в листках. Отримані нами дані також узгоджуються з цим положенням, оскільки MTCI поряд з CI rededge, CI green, RVI, D₇₃₁/D₇₀₀ та D₇₃₅/D₇₀₀ набагато більше відрізнялись між сортами, ніж показники вмісту азоту та хлорофілу.

В подальшому доцільно було б для підтвердження чи спростування виявлених нами залежностей між значеннями дистанційно розрахованих BI та визначеного біохімічним методом вмісту нітрогену в рослинному покриві провести дослідження з більшою кількістю відібраних проб рослинного матеріалу і, відповідно, чисельністю ділянок спектрометрування. Це дозволило би побудувати відповідні математичні моделі між досліджуваними параметрами і кількісно представити величину виявленого між ними зв'язку.

5. Висновки

1. За даними сканування з БПЛА у фазу молочної стиглості вміст хлорофілу на одиницю поверхні дослідженої тест-ділянки посіву озимої пшениці сорту Скаген, вирощеної під урожай 2016 р. на угіддях Баришівської зернової компанії, на 16% достовірно переважав цей показник, властивий сорту Богдана, що було спричинене ускладненням фітопатологічної ситуації на посіві сорту Богдана.
2. Процентний вміст загального азоту, визначений за макрометодом К'ельдаля, в колосі з зерном у фазу молочної стиглості був на 40% вищий у озимій пшениці сорту Скаген у порівнянні зі сортом Богдана, Так само в ту ж фазу кількість нітрогену в сухій речовині рослинного покриву сорту Скаген, виражена в грамах на квадратний метр, також на 22% переважала ці показники посіву зі сортом Богдана.
3. З 19-ти досліджених ВІ, розрахованих за даними наземного дистанційного спектрометрування, три ВІ, зокрема SAVI, EVI та EVI2 практично не відрізнялися між сортами, тобто не реагували на виявлену різницю за біохімічними параметрами. Решта індексів змінювались узгоджено зі змінами вмісту азоту та хлорофілу в сортах. Причому індекси CI rededge, CI green, MTCI, RVI, D_{731}/D_{700} та D_{735}/D_{700} більш, ніж удвічі, а NDRE1 та $D718/D_{700}$ практично в півтора рази були вищі у сорту Скаген, ніж у сорту Богдана. Лише три індекси: NDVI, Green NDVI та NI мали межі флуктуацій своїх значень у тих же рамках, що й сортові відмінності біохімічних показників.

Література

- Дугін С. С., Сибірцева О. М., Голубов С. І., Дорофей Є. М. Верифікація результатів обробки спектральних даних супутника Sentinel-2 A, наземного спектродіометра ASD FieldSpec® 3FR і системи реєстрації мінливості параметрів середовища DJI STS-VIS. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2019. № 21. С. 29–39. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/147/170> (дата звернення 25.06.2020).
- Жолобак Г. М., Сибірцева О. М., Ваколюк М. В., Захарчук Ю. В. Дистанційний моніторинг стану посівів озимої пшениці впродовж весняно-літньої вегетації 2016 р. за вегетаційними індексами супутника Sentinel-2A (на прикладі Лісостепової зони України). *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2017. № 15. С. 23–30. URL: http://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/Issue/15/pdf_19 (дата звернення 25.06.2020).
- Жолобак Г. М., Сибірцева О. М., Ваколюк М. В., Романчук І. Ф. Аналіз динаміки 15-ти вегетаційних індексів, обчислених за даними супутника Sentinel-2A для двох відмінних за станом тест-ділянок посівів озимої пшениці Лісостепової зони України. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2018. № 18. С. 32–39. URL: <http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/135> (дата звернення 25.06.2020).
- Лялько В. І., Сахаський О. І., Жолобак Г. М., Сибірцева О. М., Дугін С. С., Ваколюк М. В. Аналіз та порівняння вегетаційних індексів посівів озимої пшениці, розрахованих на основі дистанційних даних зі супутника Sentinel-2 та спектродіометра FieldSpec. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2017. № 12. С. 37–46. URL: <http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/94/110> (дата звернення 25.06.2020).
- Прилад експрес-діагностики “N-тестер” — “очі” агронома в азотному живленні. *Аграрна техніка та обладнання* 2012. № 1 (18). С. 30–32.
- Спирин В. З., Солов'єва Т. П. Агрохимические методы исследования почв, растений и удобрений: учеб. пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 336 с. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000491605/SOURCE1> (дата звернення 25.06.2020).
- Barnes E. M., Clarke T. R., Richards S. E., Colaizzi P. D., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T., Lascano R. J., Li H., Moran M.S. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, 16–19 July 2000, P. 1–15. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.8007&rep=rep1&type=pdf> (дата звернення 25.06.2020).
- Dash J., Curran P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. Journal of Remote Sensing*. 2004. No. 25. P. 5403–5413.
- Filella I., Serrano L., Serra J., Peñuelas J. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Sci.* 1995. No. 35. P. 1400–1405. URL: <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500050023x> (дата звернення 25.06.2020).
- Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 58, No. 3. P. 289–298.
- Gitelson A. A., Keydan G. P., Merzlyak M. N. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. *Geophysical Research*. 2006. Letters 33. L11402.
- Gitelson A., Merzlyak M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*. 1994. No.143. P. 286–292.
- Gitelson A., Solovchenko A. Generic algorithms for estimating foliar pigment content. *Geophysical Research*. 2017. No. 44. P. 9293–9298. URL: <https://doi.org/10.1002/2017GL074799>.
- Gitelson A. A. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation, (Thenkabail P. S., Lyon J. G., Huete A., Eds.), 2018. Chapter 1, Vol. III, pp. 3–24. CRC Press- Taylor and Francis group, Boca Raton, London, New York.
- Hallik L., Kazantsev T., Kuusk A., Galmés J., Tomás M., Niinemets Ü. Generality of relationships between leaf pigment contents and spectral vegetation indices in Mallorca (Spain). *Reg. Environ. Change*. 2017. No. 17. P. 2097–2109. URL: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1202-9>.
- Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. Journal of Remote Sensing*. 1983. No. 4. P. 273–288.
- Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988. V. 25. No. 3. P. 295–309.
- Hunt Jr. E.R., Daughtry C. S. T., Eitel J. U. H., Long D. S. Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index. *Agronomy Journal*. 2011. V. 103. P. 1090–1099. URL: <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0395>.
- Jiang Z., Huete A. R., Didan K., Miura T. Development of a two band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 3833–3845.
- Jordan C. F. Derivation of Leaf Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*. 1969. V. 50. P. 663–666. URL: <https://doi.org/10.2307/1936256>.
- Kazantsev T., Shevchenko V., Bondarenko O., Furie, M., Samberg, A., Ametov F., Iakovenko V. COTS UAV-borne multispectral system for vegetation monitoring. *Proc. of SPIE*. 2018. 107830A. P. 1–10.
- Kochubey S., Kazantsev T. Changes in the first derivatives of leaf reflectance spectra of various plants induced by variations of chlorophyll content. *Journal of Plant Physiology*. 2007. V. 164. No. 12. P. 1648–1655.

- Kochubey S., Kazantsev T. Derivative vegetation indices as a new approach in remote sensing of vegetation. *Frontiers of Earth Science*. 2012. V. 6. No. 2. P. 188–195.
- Ma B. L., Morrison M. J., Dwyer L. M. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of corn. *Agronomy*. 1996. J. 88:915–920. URL: <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962003600060011x>.
- Nigon T. J., Mulla D. J., Rosen C. J., Cohen Y., Alchanatis V., Knight J., Rud R. Hyperspectral aerial imagery for detecting nitrogen stress in two potato cultivars. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015. V. 112. P. 36–46.
- Rouse J.W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC, 1978-1. 1973.
- Stroppiana D., Boschetti M., Brivio P.A., Bocchi S. Remotely sensed estimation of rice nitrogen concentration for forcing crop growth models. *Italian Journal of Agrometeorology*. 2006. No. 3. P. 50–57.
- Tian Y.C., Yao X., Yang J., Cao W. X., Hannaway D. B., Zhu Y. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. *Field Crops Res.* 2011. V. 120. P. 299–310.
- Walsh O. S., Shafian S., Marshall J. M., Jackson C., McClintick-Chess J. R., Blanset S. M., Swoboda K., Thompson C., Belmont K. M., Walsh W. L. Assessment of UAV Based Vegetation Indices for Nitrogen Concentration Estimation in Spring Wheat. *Advances in Remote Sensing*. 2018. No. 7. P. 71–90. URL: <https://doi.org/10.4236/ars.2018.7200>.
- Yang G, Liu J, Zhao C, Li Z, Huang Y, Yu H, Xu B, Yang X, Zhu D, Zhang X, Zhang R, Feng H, Zhao X, Li Z, Li H, Yang H. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Front. Plant Sci.* 2017. 8:1111. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01111>.
- References**
- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R. J., Li, H., Moran, M. S. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, 16–19 July 2000, 1–15. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.8007&rep=rep1&type=pdf>.
- Dash, J., Curran, P. J. (2004.) The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. Journal of Remote Sensing*, 25. 5403–5413. <https://doi.org/10.1080/0143116042000274015>.
- Device of express diagnostics “N-tester” — “eyes” of an agronomist in nitrogen nutrition. (2012). *Agricultural Technique and Equipment*. 1 (18), 30–32. Retrieved from [http://www.agritech.com.ua/pdf/1\(18\)03_2012](http://www.agritech.com.ua/pdf/1(18)03_2012). (in Ukrainian).
- Dugin, S. S., Sybirtseva, O. M., Golubov, S. I., Dorofey, Ye. M. (2019). Verification of multispectral data processing for the Sentinel-2A bands, field and FieldSpec® 3FR and UAV with DJI STS -VIS. *Ukrainskyi zhurnal dystantsijnogo zonduvannja Zemli*, 21. 29–39. Retrieved from <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/147/170>. (in Ukrainian).
- Filella, I.; Serrano, L.; Serra, J.; Penuelas, J. (1995). Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Sci.* 35. 1400–1405. <https://doi.org/10.2134/cropsci1995.0011183X003500050023x>.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58 (3). 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7).
- Gitelson, A. A., Keydan, G. P., Merzlyak, M. N. (2006). Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. *Geophysical Research, Letters* 33. L11402. <https://doi.org/10.1029/2006GL026457>.
- Gitelson, A., Merzlyak, M.N. (1994). Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143. 286–292. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81633-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81633-0)
- Gitelson, A., Solovchenko, A. (2017). Generic algorithms for estimating foliar pigment content. *Geophysical Research, Letters* 44. 9293–9298. <https://doi.org/10.1002/2017GL074799>.
- Gitelson, A. A. (2018). *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*, (Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., Huete, A., Eds.). 1 (III), 3–24. CRC Press- Taylor and Francis group, Boca Raton, London, New York.
- Hallik, L., Kazantsev, T., Kuusk, A., Galmés, J., Tomás, M., Niinemets, Ü. (2017). Generality of relationships between leaf pigment contents and spectral vegetation indices in Mallorca (Spain). *Reg. Environ. Change*, 17. 2097–2109. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1202-9>.
- Horler, D. N. H., Dockray, M., Barber, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *Int. Journal of Remote Sensing*. 4. 273–288. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/01431168308948546>.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25 (3). 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
- Hunt, Jr., E. R., Daughtry, C. S. T., Eitel, J. U. H., Long, D. S. (2011). Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index. *Agronomy Journal*. 103. 1090–1099. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0395>.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.* 112. 3833–3845. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of Leaf?Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50. 663–666. <https://doi.org/10.2307/1936256>.
- Kazantsev, T., Shevchenko, V., Bondarenko, O., Furier, M., Samberg, A., Ametov, F., Iakovenko, V. (2018). COTS UAV-borne multispectral system for vegetation monitoring. *Proc. of SPIE*, 107830A, 1–10. DOI: 10.1117/12.2501859.
- Kochubey, S., Kazantsev, T. (2007). Changes in the first derivatives of leaf reflectance spectra of various plants induced by variations of chlorophyll content. *Journal of Plant Physiology*, 164 (12). 1648–1655. DOI: 10.1016/j.jplph.2006.11.007.
- Kochubey, S., Kazantsev, T. (2012). Derivative vegetation indices as a new approach in remote sensing of vegetation. *Frontiers of Earth Science*, 6 (2). 188–195. DOI: 10.1007/s11707-012-0325-z.
- Lyalko, V. I., Sakhatsky, O. I., Zholobak, G. M., Sybirtseva, O. M., Dugin, S. S., Vakolyuk, M. V. (2017). Analysis and comparison of vegetation indices of winter wheat crop areas, calculated on the basis of Sentinel-2 and FieldSpec spectroradiometer data. *Ukrainskyi zhurnal dystantsijnogo zonduvannja Zemli*, 12. 37–46. (in Ukrainian). Retrieved from <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/115>.
- Ma, B. L., Morrison, M. J., Dwyer, L. M. (1996). Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of corn. *Agronomy J.* 88:915–920. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962003600060011x>.
- Nigon, T. J., Mulla, D. J., Rosen, C. J., Cohen, Y., Alchanatis, V., Knight, J., Rud, R. (2015). Hyperspectral aerial imagery for detecting nitrogen stress in two potato cultivars. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112. 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.018>.

- Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC 1978-1*. 1973. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19750020419.pdf>.
- Spirina, V. Z., Solovieva, T. P. (2014). Agrochemical methods for the study of soils, plants and fertilizers: tutorial. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University. (in Russian). Retrieved from <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000491605/SOURCE1>.
- Stroppiana, D., Boschetti, M., Brivio, P.A., Bocchi, S. (2006). Remotely sensed estimation of rice nitrogen concentration for forcing crop growth models. *Italian Journal of Agrometeorology*, 3. 50–57. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/25f3/656a35d440c0b94c3a045c767cc4df0a0c9a.pdf>.
- Tian, Y. C., Yao, X., Yang, J., Cao, W. X., Hannaway, D. B., Zhu, Y. (2011). Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. *Field Crops Res.*, 120. 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.002>.
- Walsh, O. S., Shafian, S., Marshall, J.M., Jackson, C., McClintick-Chess, J. R., Blanscet, S. M., Swoboda, K., Thompson, C., Belmont, K. M., Walsh, W. L. (2018). Assessment of UAV Based Vegetation Indices for Nitrogen Concentration Estimation in Spring Wheat. *Advances in Remote Sensing*, 7. 71–90. <https://doi.org/10.4236/ars.2018.7200>.
- Yang, G., Liu, J., Zhao, C., Li, Z., Huang, Y., Yu, H., Xu, B., Yang, X., Zhu, D., Zhang, X., Zhang, R., Feng, H., Zhao, X., Li, Z., Li, H., Yang, H. (2017). Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Front. Plant Sci.* 8:1111. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01111>.
- Zholobak, G. M., Sybirtseva, O. M., Vakolyuk, M. V., Romanciuc, I. F. (2018). Analysis of dynamics for 15 vegetation indices based on Sentinel-2A image data for the test sites of winter wheat crop different on the state from each other within the forest-steep zone in Ukraine *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia Zemli*, 18. 32–39. (in Ukrainian). Retrieved from <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/135/151>.
- Zholobak, G. M., Sybirtseva, O. M., Vakolyuk, M. V., Zakharchuk, Yu. V. (2017). Remote monitoring of the state of winter wheat during the spring-summer vegetation of 2016 year, by using vegetation indices of Sentinel-2A satellite (case study by forest-steppe area of Ukraine). *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia Zemli*, 15. 23–30. (in Ukrainian). Retrieved from <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/115>.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА И ХЛОРОФИЛЛА В РАСТЕНИЯХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ДВУХ СОРТОВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО И АЭРОДИСТАНЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРИРОВАНИЯ

Г. М. Жолобак, С. С. Дугин, О. Н. Сибирцева, Т. А. Казанцев, И. Ф. Романчук

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины”, ул. О. Гончара 55 Б, Киев 01054, Украина

Азот в растительном организме входит в состав зеленого пигмента хлорофилла, а также белков, нуклеиновых кислот, фитогормонов и алкалоидов, что указывает на приоритетную роль этого элемента в жизни растений. Хлорофилл является важнейшим пигментом фотосинтетического процесса, определяющего жизнедеятельность всех гетеротрофных организмов планеты. Вышесказанное обуславливает наличие тесной связи между содержанием в растительном организме азота и хлорофилла. Содержание азота в растениях служит основой для корректировки их азотного питания и расчета доз внесения азотных удобрений с целью формирования высоких урожаев. Следовательно, изучение содержания азота и хлорофилла в растениях является весьма актуальным, особенно с помощью новейших средств и методов с привлечением данных дистанционного зондирования. Предметом исследования является связь между отражательными параметрами растительности в виде 19 вегетационных индексов (ВИ) и ее биохимическими характеристиками, в частности, содержанием азота и хлорофилла. Тест-участки на производственных посевах двух сортов озимой пшеницы, различных по фитопатологической ситуации в фазу молочной спелости, выращенных на угодьях Барышевской зерновой компании под урожай 2016 года, служили объектом исследований. Инфицирование посева сорта Богдана возбудителями грибных заболеваний вызвало достоверные межсортовые различия биохимических показателей, полученных для общего азота макрометодом Кельдаля, а для количества хлорофилла — по данным сканирования с БПЛА. Среди девятнадцати ВИ, рассчитанных по данным дистанционного спектрометрирования прибором ASD FieldSpec®3FR большинство (16 ВИ) изменялись согласованно с изменениями содержания азота и хлорофилла в сортах. Из них CI reledge, CI green, MTCl, RVI, D_{731}/D_{700} и D_{735}/D_{700} более чем вдвое, а NDRE1 и D_{718}/D_{700} практически в полтора раза были выше у сорта Скаген, чем у сорта Богдана. Только три индекса: NDVI, Green NDVI и NI имели пределы флуктуаций своих значений в тех же рамках, что и сортовые различия биохимических показателей.

Ключевые слова: вегетационные индексы, содержание общего азота, содержание хлорофилла, БПЛА, наземная спектрометрическая съемка, посевы озимой пшеницы

DETERMINATION OF NITROGEN AND CHLOROPHYLL CONTENT IN TWO VARIETIES OF WINTER WHEAT PLANTS MEANS OF GROUND AND AIRBORNE SPECTROMETRY

G. M. Zholobak, S. S. Dugin, O. M. Sibirtseva, T. A. Kazantsev, I. F. Romanchuk

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, National Academy of Sciences of Ukraine, 55-B, O. Gonchar st., Kyiv 01054, Ukraine

The process of solution of different practical and ecological problems, using hyperspectral satellite images usually includes a procedure of classification. Classification is one of the most difficult and important procedures. Some image classification methods were considered and analyzed in this work. Nitrogen in plants is part of the green pigment chlorophyll, as well as proteins, nucleic acids, phytohormones and alkaloids that indicates the key role of this element in plant life. Chlorophyll is the most important pigment of the photosynthetic process determining the life of all heterotrophic organisms on the planet. The facts mentioned above presuppose close relationships between nitrogen and chlorophyll in plants. The nitrogen content in plants serves as a basis for adjusting their nitrogen nutrition and calculating fertilization rates for high yields. This causes constant importance of studying the content of nitrogen and chlorophyll in plants, especially by means of novel techniques with involving remote sensing. This study was focused on relationship between 19 vegetation indices (VI) and biochemical characteristics of vegetation, in particular nitrogen and chlorophyll content. Study areas were located within production fields of two varieties of winter wheat grown for harvest in 2016 by the grain company Baryshivska. The test plots varied by phytopathological situation in the phase of milk ripeness. Fungal infection of Bogdana variety caused significant varietal differences in biochemical parameters that were calculated by Kjeldahl macro-method for total nitrogen and by aerial survey with UAV (drone) for chlorophyll content. Among 19 VIs calculated by ground spectrometry the major part (16 VIs) were consistent with changes in nitrogen and chlorophyll content in the cultivars. In particular, CI reledge, CI green, MTCl, RVI, D_{731}/D_{700} and D_{735}/D_{700} were more than doubled, and NDRE1 and D_{718}/D_{700} were almost 1.5 times higher in the Skagen variety compared to the Bogdan variety. Only 3 indices: NDVI, Green NDVI and NI had limits of fluctuations of the values within the same limits, as varietal differences of biochemical indicators.

Keywords: vegetation indices, total nitrogen content, chlorophyll content, UAV, ground spectrometric survey, winter wheat crops

Рукопис отримано 25.06.2020