

Г. М. Жолобак, З. М. Шпортюк, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін

**Дослідження спектрів відбиття посівів озимої пшениці
молочно-воскової стиглості в зоні червоного краю
як потенційних індикаторів дистанційної диференціації
гетерогенності рослинного покриву**

(Представлено академіком НАН України В. І. Ляльком)

*Висвітлено результати спектрометрування приладом ASD FieldSpec[®] з FR дрібноділянкових посівів демонстраційного полігону елітного насінневого господарства “Золотий колос” у Миколаївській області, на підставі яких обчислено вегетаційні індекси червоного краю (REP, TCI, NDVI₇₀₅) для двох різновидів (лотесценс та еритроспермум) озимої пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) та різновиду гордеїформе озимої пшениці твердої (*Triticum durum* Desf.). Найнижчі значення індексів виявлено в озимій пшениці м'якої з безостим колосом різновиду лотесценс, а найвищі — в озимій пшениці твердої різновиду гордеїформе.*

Дослідження спектрів відбиття рослинності за допомогою високоточної апаратури активно проводиться вже понад 30 років. Можна виокремити принаймні три напрями використання вимірювань спектральних характеристик рослинного покриву. Насамперед це пошук неруйнівних методів вивчення рослин, суть яких полягає у відшуканні кореляційних залежностей між спектральними коефіцієнтами відбиття (або обчисленими на їх основі вегетаційними індексами) та окремими біохімічними компонентами рослинних органів (пігментами, вмістом азоту або води) [1]. Другий напрям — оцінка можливості автоматизованої класифікації різних родів рослин зі змішаного посіву за допомогою високоточних безконтактних дистанційних вимірювань [2]. Третій — використання наземних гіперспектральних даних відбиття рослинності — зіставлення їх з інформацією, отриманою зі сенсорів, встановлених на борту космічних апаратів. Застосування методик і технік високоточного спектрометрування дозволяє перевірити, наскільки взаємоузгоджуються індекси, що розраховані на основі гіперспектральних даних наземного оптичного дистанційного зондування (ДЗ), та аналогічні індекси, що обчислені на підставі даних відбиття з порівняно ширших каналів космічних сенсорів. З них варто виділити вегетаційні індекси в області “червоного краю” Red Edge (660–780 нм), за допомогою яких можна неdestructивними методами оцінити різноманітні параметри і культурної, і природної рослинності [1, 3]. З 2010 р. в Україні поширюється інформація з німецького супутникового угруповання Rapid Eye, яке оснащено 5-канальними багатоспектральними оптико-електронними системами, що дозволяють отримувати знімки земної поверхні спеціальним каналом “червоного краю” (690–730 нм). Тому актуальності набувають наземні підсупутникові дослідження особливостей відбиття рослинних угруповань у цій спектральній зоні з метою їх подальшого зіставлення з інформацією, отриманою шляхом обробки космічних знімків.

Метою нашої роботи було дослідження вегетаційних індексів червоного краю окремих різновидів озимої пшениці, обчислених за даними вимірювань спектрорадіометром ASD



Рис. 1. Розташування поля (позначене світлим прямокутником), де знаходився демонстраційний полігон елітного насінневого господарства “Золотий колос”

FieldSpec[®]3 FR для подальшого їх зіставлення з аналогічними індексами, розрахованими по космічних знімках.

Експеримент зі спектрометрування сільськогосподарських культур степової зони України було виконано 16 червня 2010 р. польовим спектрометром у виробничих умовах на дрібноділянкових посівах демонстраційного полігону елітного насінневого господарства “Золотий колос” поблизу м. Миколаєва (рис. 1).

Спектрометрування посівів озимої пшениці приладом ASD FieldSpec[®]3 FR здійснювалося від 13 до 14 год при ясному небі і температурі повітря понад 30 °С. ASD FieldSpec[®]3 FR — польовий портативний переносний спекторадіометр, який охоплює діапазон реєстрації від 350 до 2500 нм. Увесь 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>. Для отримання спектрів відбиття оптична насадка приладу встановлювалась скраю посіву на центральній поздовжній осі ділянки. Кут огляду використаного об’єктива — 1°, тримач пістолетного типу з оптичною насадкою закріплювався на стандартному штативі з висотою над поверхнею ґрунту — 1,2 м, віддаль від об’єктива до ділянки спектрометрування посіву — 5 м, величина площі посіву, яка потрапляє в поле зору — 80 см², 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 червоного краю *RE*.

На дату 16.06.2010 р. тут вирощувались різні сорти 14 сільськогосподарських культур, характерних для степової зони України. Об’єктом досліджень були посіви сортів озимої пшениці м’якої або звичайної (вид *Triticum aestivum* L., різновиди лютесценс та еритроспермум, ширина їх ділянок становила 3 м) та озимої пшениці твердої (вид *Triticum durum* Desf., різновид гордеїформе, ширина ділянок — 1,5 м), які перебували у фазі молочно-воскової стиглості і мали зімкнутий рослинний покрив.

Різновид лютесценс об’єднував безості сорти Служниця, Безоста, Подолянка, Фаворитка, Херсонська безоста. Довжина колосу цих рослин становила 7–10 см, а зовнішня квіткова луска закінчувалась остюковим відростком, довжина якого не перевищувала 0,5 см.

Різновид еритроспермум об’єднував сорти Ліона, Селянка, Зміна, Ніконія, Кірія, Турчунчук, Шестопаловка; Отаман, Подяка, Пошана, Куяльник, Тітона, Кохана та Херсонська-99. Перші сім сортів з довжиною остюків (2,5–3,0 см), приблизно вдвічі меншою за

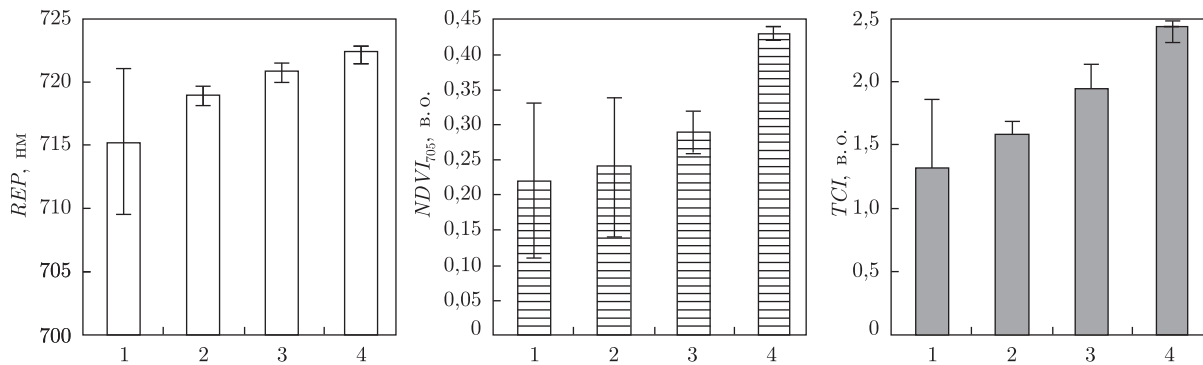


Рис. 2. Значення вегетаційних індексів червоного краю сортів озимої пшениці за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec[®]3 FR від 16.06.2010 р.:

1 — озима пшениця м'яка, різновид лютеценс, колос безостий, 5 сортів; 2 — озима пшениця м'яка, різновид еритроспермум, колос короткоостистий, 7 сортів; 3 — озима пшениця м'яка, різновид еритроспермум, колос середньоостистий, 7 сортів; 4 — озима пшениця тверда, різновид гордеїформе, колос остистий, 4 сорти. Планки розбіжностей по вертикальній осі позначають межі довірчого інтервалу з рівнем значущості $\alpha = 0,05$

довжину колоса (6–8 см), нами були віднесені до групи короткоостистих. Інші сім сортів з довжиною остюків (5–7 см), майже співмірною довжині колоса (6–8 см), склали групу середньоостистих.

До різновиду гордеїформе належали сорти остистої пшениці Аргонавт, Лагуна, Дельфін та Алий парус, довгі остюки якої (10 см) більш ніж удвічі перевищували довжину колоса (4 см).

Усі проаналізовані сорти озимої пшениці є середньоранніми з тривалістю вегетаційного періоду в межах 270–280 діб, за винятком сорту Фаворитка (різновид лютеценс), який належить до групи середньостиглих, та сорту Шестопаловка (різновид еритроспермум), що входить до групи ранньостиглих сортів.

У дослідженні використано три індекси червоного краю: позицію червоного краю REP [4], мерсівський наземний хлорофільний індекс $MTCI$ [5], який позначено як TCI , та модифікований нормалізований різницевий індекс червоного краю $NDVI_{705}$ [6]. Обчислення вегетаційних індексів REP , TCI й $NDVI_{705}$ для кожного сорту за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec[®]3 FR здійснювалось за такими формулами:

$$REP = 701 + 41 \frac{(\bar{R} - R(701))}{(R(742) - R(701))}, \quad \bar{R} = \frac{R(671) + R(783)}{2}, \quad (1)$$

$$TCI = \frac{R(754) - R(708)}{R(708) - R(681)}, \quad (2)$$

$$NDVI_{705} = \frac{R(750) - R(705)}{R(750) + R(705)}, \quad (3)$$

де $R(\lambda)$ — значення спектрометричного коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ .

Отримані дані було статистично оброблено з розрахунком середніх значень та їх довірчих інтервалів на рівні значущості $\alpha = 0,05$ відповідно для виділених груп озимої пшениці з врахуванням кількості сортів кожного різновиду (рис. 2). З рисунку видно, що найнижчі значення всіх розрахованих індексів червоного краю характерні для озимої пшениці різновиду лютеценс. Причому значення REP для безостих пшениць майже на 7 нм, а значення TCI

та $NDVI_{705}$ достовірно з імовірністю 95% майже вдвічі нижчі, ніж в остистих пшениць. Це, вірогідно, зумовлене тим, що відбивні поверхні посівів пшениць з безостим колосом в умовах степової зони України до середини червня 2010 р. помітно втратили фотосинтетичні пігменти (про це свідчить найменший хлорофільний індекс TCI) і мали жовтіший аспект порівняно з остистими різновидами пшениці. Серед групи пшениць з різними за довжиною остюками для різновиду еритроспермум були властиві, як правило, колос зеленого кольору, а остюки — жовтуватого, в той час як у *Tr. durum* різновиду гордеїформе зеленими були і колос, і остюки, і більша частина листків. Згідно з детальнішою фенологічною шкалою Задокса [7], тверда озима пшениця перебувала на етапі пізньої молочної стиглості (77–79 стадії), а м'яка — на етапі ранньої воскової стиглості (81–83 стадії).

Слід зазначити, що для досліджених ділянок пшениці різновиду лютеценс властиве більше варіювання отриманих вегетаційних індексів, про що свідчать значно ширші границі довірчих інтервалів кожного з них (див. гістограму 1 для REP , $NDVI_{705}$ й TCI на рис. 2). Можна припустити, що це спричинене наявністю в групі лютеценс нових високоінтенсивних сортів Фаворитка і Подолянка, які мають вищу фотосинтетичну активність в репродуктивний період розвитку на противагу іншим сортам пшениці з безостим колосом. Звісно, вивчення виявленої особливості потребує більшої кількості дистанційних спектрометричних вимірювань і подальших досліджень на ширшому обсязі рослинного матеріалу.

Порівнюючи величини довірчих інтервалів досліджених індексів, відзначимо більшу мінливість, властиву TCI й $NDVI_{705}$. Зокрема, за допомогою останнього достовірно розрізняються тільки види *Tr. aestivum* та *Tr. durum*. У той самий час REP й TCI реагують на морфологію верхнього ярусу посіву, проявляючи чітку тенденцію до зростання зі збільшенням довжини остюків колоса навіть у межах різновиду еритроспермум (див. гістограми 2 і 3 для REP й TCI на рис. 2).

Спектри відбиття посівів досліджених різновидів озимої пшениці також демонструють відмінності в конфігурації кривих відбиття на довжинах хвиль 350–750 нм (наприклад, неоднакова амплітуда характерного для досягаючих посівів максимуму на 630–640 нм) та різну позицію точки початку підняття спектра близько 680 нм, де мінімальне значення функції відбиття для сорту Служниця становить 0,20 в.о., для сорту Шестоपालовка — 0,14 в.о., для сорту Херсонська-99 — 0,11 в.о., а для сорту Аргонавт — 0,06 в.о. (рис. 3).

Отримані дані не суперечать виявленим Т. А. Казанцевим зі співробітниками [8] сортовим відмінностям форми динамічних кривих деривативного вегетаційного індексу D_{725}/D_{702} озимої пшениці сортів Смуглянка і Переяславка, вирощених на різних рівнях мінерального живлення в умовах мікропольового дослідження лісостепової зони України. Про сортові відмінності рослин під час дистанційного зондування посівів зернових йдеться і у монографії Т. М. Шадчиної [9]. Зазначене вище засвідчує неоднорідність спектрального відгуку посівів озимої пшениці молочно-воскової стиглості в зоні червоного краю, що слід брати до уваги при подальшому аналізі відповідних індексів, розрахованих за супутниковими даними.

Таким чином, на підставі спектрометрування посівів озимої пшениці молочно-воскової стиглості виявлено відмінності в значеннях REP , TCI , $NDVI_{705}$ як для різних її видів, так і для поширеніших в Україні різновидів цієї культури: найнижчими вегетаційні індекси були в озимої пшениці м'якої з безостим колосом різновиду лютеценс, а найвищими — в озимої пшениці твердої різновиду гордеїформе. Придатнішими для виявлення особливостей морфології відбивної поверхні посівів різновиду еритроспермум виявились індекси REP й TCI ,

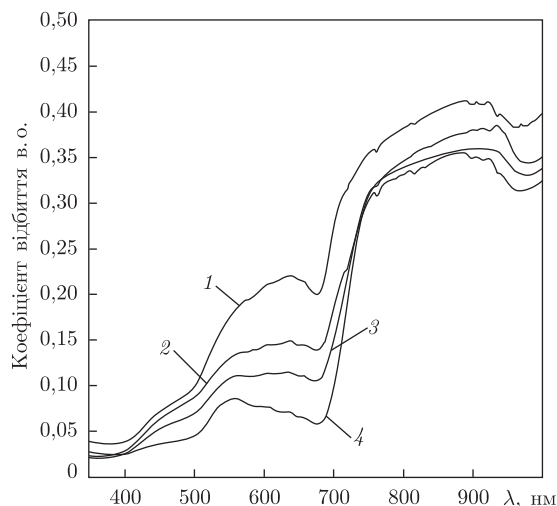


Рис. 3. Спектри відбиття дрібноділянкових посівів озимої пшениці у Миколаївській області, що отримані спектрорадіометром ASD FieldSpec[®]3 FR 16.06.2010 р.

Номер спектрів відбиття: 231 — озима пшениця м'яка, колос безостий, різновид лютеценс, сорт Служниця (1); 285 — озима пшениця м'яка, колос короткоостистий, різновид еритроспермум, сорт Шестопаловка (2); 290 — озима пшениця м'яка, колос середньоостистий, різновид еритроспермум, сорт Херсонська-99 (3); 244 — озима пшениця тверда, різновид гордеїформе, колос остистий, сорт Аргонавт (4)

проте в даному повідомленні викладено початкові напрацювання в цьому напрямі, що зумовлює актуальність подальших більш масштабних досліджень гетерогенності рослинного покриву посівів озимої пшениці під час досягання.

1. Ustin S. L., Gitelson A. A., Jacquemoud S. E. et al. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy // Remote Sensing of Environment. – 2009. – **113**, Supplement 1. – P. S67-S77.
2. Biewer S., Erasmi S., Fricke T., Wachendorf M. Prediction of yield and the contribution of legumes in legume-grass mixtures using field spectrometry // Precision Agriculture. – 2009. – **10**, No 2. – P. 128-144.
3. Kiang N. Y., Siefert J., Govindjee S., Blankenship R. E. Spectral signatures of photosynthesis. I. Review of Earth organisms // Astrobiology. – 2007. – No 7. – P. 222-251.
4. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance // Int. J. Remote Sensing. – 1983. – **4**. – P. 273-288.
5. Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // Ibid. – 2004. – **25**. – P. 5403-5413.
6. Gitelson A. 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 // J. Plant Physiology. – 1994. – **143**. – P. 286-292.
7. Zadoks J. C., Chang T. T., Konzak C. F. A Decimal Code for the Growth Stages of Cereals // Weed Research. – 1974. – **14**, No 6. – P. 415-421.
8. Казанцев Т. А., Туменов Л. В., Кочубей С. М. Дистанционные измерения динамики содержания хлорофилла в посевах озимой пшеницы // Физиол. и биохим. культ. растений. – 2010. – **42**, № 6. – С. 544-549.
9. Шадчина Т. М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. – Київ: Фітосоціоцентр, 2001. – 220 с.

ДУ "Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України", Київ

Надійшло до редакції 04.04.2012

Г. М. Жолобак, З. М. Шпортюк, О. Н. Сибирцева, С. С. Дугин

Исследования спектров отражения посевов озимой пшеницы молочно-восковой спелости в зоне красного края как потенциальных индикаторов дистанционной дифференциации гетерогенности растительного покрова

*Изложены результаты спектрометрирования прибором ASD FieldSpec®3 FR мелкоделяночных посевов демонстрационного полигона элитного семенного хозяйства “Золотой колос” в Николаевской области, на основании которых вычислены вегетационные индексы ближнего инфракрасного края (REP, TCI, NDVI₇₀₅) для двух разновидностей (лютесценс и еритропермум) озимой пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) и разновидности гордеиформе озимой пшеницы твердой (*Triticum durum* Desf.). Самые низкие значения индексов зафиксированы для безостой озимой пшеницы мягкой разновидности лютесценс, а самые высокие — для озимой пшеницы твердой разновидности гордеиформе.*

G. M. Zholobak, Z. M. Shportiuk, O. N. Sibirtseva, S. S. Dugin

The study of reflectance spectra for winter wheat at the early dough stage in the red edge range as potential indicators for the remote differentiation of vegetation cover heterogeneity

*The results of spectrometry surveying by an ASD FieldSpec®3 FR device for small plot sowing at a demonstration test site for elite seminal enterprise “Zoloty Kolos” in the Mykolaiv Oblast are presented. Acquired field data have allowed to calculate the vegetation red edge indices (REP, TCI, NDVI₇₀₅) for soft red winter wheat (*Triticum aestivum* L., varieties lutescens and erythrosperrum) and for winter durum wheat (*Triticum durum* Desf., var. hordeiforme). The lowest values of indices are detected for awnless soft red winter wheat var. lutescens and the highest ones for winter durum wheat var. hordeiforme.*