

УДК 581.132

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ПОСЕВАХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Т.А. КАЗАНЦЕВ, Л.В. ТУМЕНОК, С.М. КОЧУБЕЙ

*Институт физиологии растений и генетики Национальной академии наук Украины
03022 Киев, ул. Васильковская, 31/17*

Изучена взаимосвязь спектров отражения посевов озимой пшеницы и содержания хлорофилла в листьях разных ярусов посевов. Установлено, что разработанный ранее спектральный показатель — деривативный вегетационный индекс D_{725}/D_{702} коррелирует с содержанием хлорофилла преимущественно в верхнем ярусе листьев. Построены динамические кривые изменения индекса D_{725}/D_{702} на протяжении вегетации. Выявлены различия в их форме для двух сортов, а также вариации у растений, выращенных на разном фоне минерального питания. Сделано заключение о достаточной чувствительности вегетационного индекса D_{725}/D_{702} , рассчитанного по спектрам отражения посева, к уровню накопления хлорофилла и возможности тестирования состояния посева по этому показателю.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., деривативный вегетационный индекс, хлорофилл, дистанционное зондирование.

Разработка эффективных методов дистанционного тестирования растительности по ее спектрам отражения актуальна по крайней мере по двум причинам. Быстрое обследование посевов культурных и дикорастущих растений может составить основу новых технологий в сельском хозяйстве, быть полезным для решения экологических проблем или ранней оценки экологических рисков. Во многих лабораториях мира интенсивно разрабатываются аппаратура и методы такого рода измерений, ищутся параметры спектров для тестирования различных физиологических характеристик. Достигнуты значительные успехи в разработке методологии оценки содержания хлорофилла в листьях растений [7—9, 11]. Однако основной проблемой в течение многих лет является адаптация методов, разработанных в лабораторных условиях, к полевым измерениям [12]. При этом возникает необходимость фильтрации такой существенной помехи, как вклад отражения от почвы, которое может значительно исказить спектр отражения собственно растительности, особенно при не очень высоком проективном покрытии почвы растительностью. Кроме того, возникает вопрос, какого рода информацию содержит спектр отражения посева. Зависит ли он от содержания хлорофилла на единицу площади листа или на единицу площади посева? Для растений с несколькими ярусами листьев важно установить распределение вкладов от различных ярусов.

Ранее мы показали, что разработанный нами метод оценки содержания хлорофилла в листьях с помощью деривативных вегетационных индексов имеет слабую чувствительность к вкладу отражения от почвы

[4]. Цель данной работы — анализ вкладов отражения от листьев разных ярусов в спектр отражения посева озимой пшеницы. Рассмотрена также чувствительность разработанного нами деривативного вегетационного индекса, коррелирующего с содержанием хлорофилла и измеряемого по спектрам отражения посевов, относительно вариаций минерального питания, накопления хлорофилла и его динамики в период вегетации.

Методика

Измерения проводили на посевах озимой пшеницы сортов Смуглянка и Переяславка, выращиваемых при различных уровнях минерального питания: $N_{220}P_{180}K_{180}$ — контроль; $N_{220}P_{180}K_{180}S_{45}$ — дополнительное внесение серы, $N_{220}P_{180}K_{180}S_{90}$ — дополнительное внесение двойной дозы серы. Так были проведены измерения на шести посевах. Площадь каждой делянки составляла 2×5 м, густота растений — 600—800 стеблей на 1 м^2 .

Спектры отражения измеряли разработанным нами ранее полевым спектрометром [10, 14] в диапазоне 500—800 нм с шагом 1,5 нм в 5-кратной повторности. Поле зрения спектрометра соответствовало участку посева размером 40×40 см. Для интегральной характеристики посевов на каждом из них спектрометрированию подвергали 12 участков, равномерно распределенных по площади делянки. Измерены спектры для следующих фаз вегетации: у сорта Переяславка — выход в трубку, колошение, цветение, молочно-восковая спелость, восковая спелость; у сорта Смуглянка — те же, кроме фазы выхода в трубку. Всего выполнено 5 циклов измерений.

С использованием производных измеренных значений спектральных кривых вычисляли деривативный вегетационный индекс D_{725}/D_{702} , разработанный нами ранее [9]. D_{725} и D_{702} — значения первой производной, соответствующие длинам волн 725 и 702 нм. Применяли описанную ранее [3] методику сглаживания и дифференцирования кривых.

В каждом цикле измерений на 2 из 12 участков в каждом посеве отбирали растения для определения концентрации хлорофилла химическим способом. Отбирали по 5 растений с участка, т.е. 10 растений с одного посева, всего — 60 растений со всех участков за 1 цикл измерений. В каждой отдельной группе из 5 растений концентрацию хлорофилла определяли поярусно. Листья сканировали сканером Mustek Scan Express 1200, затем вычисляли их площадь с помощью стандартного программного пакета Photoshop 7.0. После этого листья измельчали и навеску помещали в пробирки с диметилсульфоксидом (ДМСО). Экстрагировали хлорофилл в течение 3 ч при температуре $68 \text{ }^\circ\text{C}$ в темноте, его концентрацию ($a + b$) определяли согласно Веллбурну [13].

Результаты и обсуждение

В таблице приведены коэффициенты корреляции между индексом D_{725}/D_{702} и содержанием хлорофилла в листьях различных ярусов. Данные по всем вариантам и фазам вегетации объединены в общий массив. В качестве показателей обеспеченности растений хлорофиллом использованы его концентрация на единицу площади листа, общее содержание хлорофилла в листьях одного или нескольких ярусов пяти растений, отобранных параллельно со спектральными измерениями посевов, а также общее содержание хлорофилла в листьях одного или нескольких ярусов на всем участке измерения. Последний показатель учитывает густоту

Коэффициенты корреляции между значениями вегетационного индекса D_{725}/D_{702} , рассчитанного по спектрам отражения посевов озимой пшеницы, и содержанием хлорофилла

Показатель	Выборка (<i>n</i>)	<i>R</i>
Концентрация хлорофилла в листьях, мг/дм ²		
1-го яруса ¹	37	0,82 ± 0,05
2-го яруса	37	0,67 ± 0,09
3-го яруса	27	0,24 ± 0,18
Общее содержание хлорофилла в листьях 5 отобранных растений, мг		
1-го яруса	37	0,71 ± 0,08
1- и 2-го ярусов	37	0,51 ± 0,12
1-, 2- и 3-го ярусов	27	0,44 ± 0,14
Общее содержание хлорофилла в листьях на участке измерения, мг		
1-го яруса	37	0,71 ± 0,12
1- и 2-го ярусов	37	0,63 ± 0,13
1-, 2- и 3-го ярусов	27	0,38 ± 0,18

¹Нумерация ярусов начинается с верхнего.

растений в посевах. Выборки корреляционных зависимостей, включая листья третьего яруса, меньше остальных, так как в заключительных фазах вегетации листья этого яруса не содержат хлорофилл.

Как видно из данных таблицы, индекс D_{725}/D_{702} лучше всего коррелирует с концентрацией и общим содержанием хлорофилла в листьях первого (верхнего) яруса. При его сопоставлении с содержанием хлорофилла во втором ярусе корреляция снижается. Введение в зависимость данных по содержанию хлорофилла в третьем ярусе разрушает корреляцию. Эти данные подтверждают наличие вкладов двух верхних ярусов листьев в спектр отражения посевов и отсутствие вклада третьего яруса. С помощью множественного корреляционного анализа оценено соотношение вкладов первого и второго ярусов. Зависимость индекса D_{725}/D_{702} от концентрации хлорофилла в листьях двух верхних ярусов описывает уравнение

$$D_{725}/D_{702} = 0,27 X_{Л1} + 0,04 X_{Л2},$$

где $X_{Л1}$, $X_{Л2}$ — концентрация хлорофилла в листьях соответственно первого и второго ярусов.

Согласно уравнению, вклад первого яруса составляет 85 %, второго — 15 %.

Индекс D_{725}/D_{702} теснее коррелирует с концентрацией хлорофилла на единицу площади листа, чем с его общим содержанием: концентрации хлорофилла в листьях первого яруса соответствует коэффициент 0,82, общему его содержанию в листьях первого яруса 5 растений или всего участка измерений — коэффициент 0,71. Аналогичная тенденция наблюдается и для листьев второго яруса.

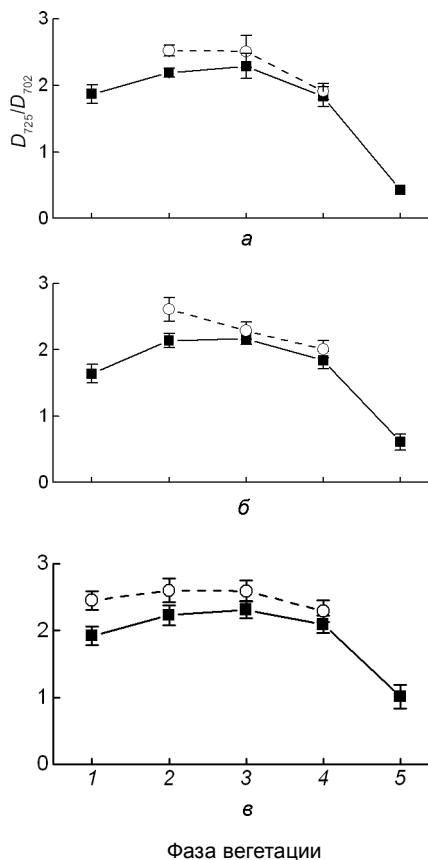
Динамику вегетационного индекса D_{725}/D_{702} в посевах обоих сортов озимой пшеницы за период вегетации иллюстрирует рисунок. По каждому посеву значения индекса для каждой точки усреднены по данным измерений 12 различных фрагментов посева.

Как видно из рисунка, значения вегетационного индекса всегда выше для сорта Смуглянка, хотя достоверные отличия наблюдались не для всех точек. Отличия в форме приведенных зависимостей обусловлены прежде всего тем, что в фазу восковой спелости хлорофилл в листьях пшеницы сорта Смуглянка отсутствовал, в то время как в посеве сорта Переяславка листья некоторого количества растений были пигментированы, что и зафиксировано прибором.

На участках с внесением серных удобрений наблюдалось изменение динамики индекса D_{725}/D_{702} : для сорта Переяславка максимальное его значение зафиксировано в фазе колошения, для сорта Смуглянка — также и в фазе выхода в трубку для варианта с внесением двойной дозы серных удобрений (см. рисунок, в).

Измеренные в полевых условиях зависимости изменений вегетационного индекса за период вегетации подобны полученным для отдельных листьев в лабораторных исследованиях [5] и согласуются с изученной ранее динамикой содержания хлорофилла в листьях посевов [7]. Четкие отличия полученных зависимостей для посевов разных сортов при выращивании на разных фонах минерального питания указывают на достаточную чувствительность метода и примененной технологии измерений. Таким образом, следуя предложенной нами процедуре измерений вегетационного индекса и используя установленную корреляцию между

этим показателем и содержанием хлорофилла в листьях растений пшеницы в посеве, можно оценивать накопление пигмента. Информация о содержании хлорофилла позволяет не только тестировать состояние посевов на разных стадиях вегетации, но и прогнозировать урожай, например на основе данных о суммарном количестве хлорофилла в посеве, накопленном в период вегетации [1, 2, 6]. Однако, согласно представленным в этой работе данным, при спектрометрировании посева в направлении, перпендикулярном к плоскости расположения растений, невозможно получить информацию о содержании пигмента во всех ярусах пигментированных листьев. При высоком фоне минерального питания даже на заключительных фазах вегетации у растений пшеницы пигментируются 3–4 яруса листьев. Как показано выше, спектрометр фиксирует лучевой поток, отраженный только верхним и частично следующим



Динамика индекса D_{725}/D_{702} на протяжении вегетации растений озимой пшеницы сортов Переяславка (сплошная линия) и Смуглянка (штриховая линия), выращиваемых при разных фонах минерального питания:

а — контроль; б, в — дополнительное внесение соответственно одинарной и двойной доз серы; 1–5 — фазы вегетации (1 — выход в трубку, 2 — колошение, 3 — цветение, 4 — молочно-восковая спелость, 5 — восковая спелость)

за ним ярусом листьев. Поэтому по данным дистанционных измерений практически невозможно определить сумму хлорофилла, накопленного всем растением. Из этого следует, что необходима разработка иных показателей, по которым можно было бы прогнозировать урожай на основе дистанционных спектральных измерений.

Авторы выражают благодарность члену-корреспонденту НАН Украины В.В. Швартау за предоставление посевов озимой пшеницы для проведения измерений.

1. Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А. Хлорофилл и продуктивность растений. — М.: Наука, 2000. — 135 с.
2. Вержук В.Г. Сравнительный анализ современных и стародавних сортов яровой пшеницы по показателям фотосинтеза и продуктивности // Тр. по прикл. ботанике, генетике, селекции. — 1980. — 67, № 2. — С. 22—29.
3. Казанцев Т.А. Використання спектральних характеристик листків рослин для визначення їх фізіологічних показників: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. — Київ, 2008. — 21 с.
4. Кочубей С.М., Казанцев Т.А., Донец В.В. Использование деривативных вегетационных индексов для устранения помех, создаваемых отражением почвы при дистанционном зондировании растительности // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 1. — С. 69—74.
5. Кочубей С.М., Кобец Н.И., Шадчина Т.М. Спектральные свойства листьев как основа дистанционной диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990. — 132 с.
6. Хангильдин В.В., Комарова В.П., Бирюков С.В. Динамика продукционного процесса у гибридов F₁ озимой пшеницы с разными генами короткостебельности // Цитология и генетика. — 1999. — 33, № 1. — С. 62—69.
7. Шадчина Т.М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. — К.: УФСЦ, 2001. — 219 с.
8. Gitelson A.A., Merzlyak M.N., Lichtenthaler H.K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm // J. Plant Physiol. — 1996. — 148. — P. 501—508.
9. Kochubey S., Kazantsev T. Changes in the first derivatives of leaf reflectance spectra of various plants induced by variations of chlorophyll content // Ibid. — 2007. — 164, N 12. — P. 1648—1655.
10. Kochubey S.M., Yatsenko V.A., Donets V.V., Chichik P.D. Hardware-software complex for chlorophyll estimation in phytocenoses under field conditions // Abstracts of SPIE Conf. — Jena, Germany, 2005. — P. 58.
11. Maire G., Francois C., Dufrene E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements // Remote Sens. Environ. — 2004. — 89, N 1. — P. 1—28.
12. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Ibid. — 2002. — 81, N 2—3. — P. 337—354.
13. Wellburn A.R. The spectral determination of chlorophylls a and b as well, as the total carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolution // J. Plant Physiol. — 1994. — 144, N 3. — P. 307—313.
14. Yatsenko V., Kochubey S., Donets V., Kazantsev T. Hardware-software complex for chlorophyll estimation in phytocenoses under field conditions // Proc. SPIE. — 2005. — 5964. — P. 267—270.

Получено 16.11.2009

ДИСТАНЦІЙНІ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІКИ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ В ПОСІВАХ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ

Т.А. Казанцев, Л.В. Туменок, С.М. Кочубей

Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, Київ

Вивчено взаємозв'язок спектрів відбиття посівів озимой пшениці та вмісту хлорофілу в листках різних ярусів посівів. Встановлено, що розроблений раніше спектральний показник — деривативний вегетаційний індекс D_{725}/D_{702} корелює з вмістом хлорофілу переваж-

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА

но у верхньому ярусі листків. Побудовано динамічні криві зміни індексу D_{725}/D_{702} в період вегетації. Виявлено відмінності в їх формі для двох сортів, а також варіації у рослин, вирощених на різному фоні мінерального живлення. Зроблено висновок про достатню чутливість вегетаційного індексу D_{725}/D_{702} , розрахованого за спектрами відбиття посіву, до рівня накопичення хлорофілу і можливість тестування стану посіву за цим показником.

REMOTE MEASUREMENTS OF DYNAMICS OF CHLOROPHYLL CONTENT IN WHEAT CROPS

T.A. Kazantsev, L.V. Tumenok, S.M. Kochubey

Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasykivska St., Kyiv, 03022, Ukraine

The relationships between reflectance spectra of winter wheat crops and chlorophyll content in different leaf layers of the crops were analyzed. It was established that earlier developed spectral parameter — derivative vegetation index D_{725}/D_{702} correlated with chlorophyll content predominantly in the upper leaf layer. Dynamic curves of changing of D_{725}/D_{702} during growing period were plotted. Differences between these curves were revealed in two cultivars and in plants growing at different levels of mineral nutrition. Conclusion has been made about rather high sensitivity of vegetation index D_{725}/D_{702} calculated by crop reflectance spectrum to level of chlorophyll accumulation. Possibility of testing of crop status by the index has been also concluded.

Key words: *Triticum aestivum* L., derivative vegetation index, chlorophyll, remote sensing.