

УДК 581.133.1.:535.361.2

С. М. Кочубей¹, Т. А. Казанцев¹, В. В. Донец²

Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, Київ
ДП Завод «Арсенал», Київ

Использование деривативных вегетационных индексов для устранения помех, создаваемых отражением почвы при дистанционном зондировании растительности

Надійшла до редакції 08.10.07

Вивчалась можливість використання деривативного вегетационного індексу для визначення концентрації хлорофілу за спектрами відбиття систем ґрунт—рослини з неповним проективним покриттям ґрунту. Вимірювалась спектри відбиття модельних систем, які включали листки рослин з різним вмістом хлорофілу на фоні темного і світлого ґрунту. При зменшенні величини проективного покриття до 25 % відхилення в оцінці хлорофілу практично не перевищували похибку рівняння регресії, яке використовували для розрахунку концентрації. Отримані результати свідчать про дієвість запропонованого підходу в умовах низького рівню покриття ґрунту рослинністю. Дані польових вимірювань спектрів відбиття посівів різною густиною підтверджують отримані лабораторні результати.

ВВЕДЕНИЕ

При дистанционных измерениях спектральных характеристик света, отраженного от растительного покрова, одной из наиболее существенных помех является вклад отражения почвы. Он значительно искажает спектр отражения растительности в случае неполного проективного покрытия почвы растительностью, причем по-разному в зависимости от отражательной способности почвы и спектрального распределения коэффициентов отражения [1, 8]. Это обстоятельство создает трудно преодолимые препятствия при использовании спектральных коэффициентов яркости для определения параметров состояния растительности. Для исключения вклада отражения почвы разработаны специальные вегетационные индексы, рассмотрение которых приведено в работе [3]. Для их расчета необходим ряд дополнительных параметров, в том числе изме-

ряемых в наземных условиях. Процедура таких измерений, а также некоторые другие обстоятельства обуславливают низкую эффективность применения указанных индексов. В последнее время определенный успех достигнут в результате разработки моделей, связывающих механизм пропускания света отдельным листом и фитоценозом [5, 12]. Однако и для этих моделей нужен ряд параметров, которые невозможно определить в непосредственных дистанционных измерениях [10].

Применение аппаратуры и техники гиперспектральных дистанционных измерений открывает новые возможности для исключения указанной выше помехи. Нами разработаны деривативные вегетационные индексы для оценки содержания хлорофилла в листьях, которые, по предварительным данным, выявили низкую чувствительность к уровню проективного покрытия почвы [2, 6]. Показано, что расчет содержания

хлорофилла в листьях некоторых растений, например кукурузы, свеклы и винограда, можно проводить по одному и тому же уравнению регрессии, в то время как для озимой пшеницы нужно использовать другое уравнение [7].

Целью настоящей работы является установление предельной величины отклонения оценки хлорофилла, полученной по нашему методу, с использованием деривативного вегетационного индекса, по спектральным кривым, соответствующим системам почва—растительность с низкими значениями проективного покрытия. Используются фоны почвы с различной отражательной способностью, а также листья разных растений с разным содержанием хлорофилла. Кроме того, проведены полевые измерения спектров отражения посевов озимой пшеницы с разным значением неполного проективного покрытия почвы.

МЕТОДИКА

В качестве объектов исследования были выбраны листья озимой пшеницы, кукурузы, свеклы, винограда и огурца. Растения выращивали на опытных участках Института физиологии растений и генетики НАН Украины. Листья указанных растений использовали для моделирования спектров отражения системы почва—растительность. Моделирование проводили в двух вариантах. Для физического моделирования измеряли спектры отражения фрагментов листьев определенной площади на фоне почвы, изменяя таким образом различную величину проективного покрытия. Графические модели системы почва—растительность представляли собой линейные комбинации спектральных кривых отражения почвы и листа с весовыми коэффициентами, которые можно было варьировать в диапазоне 0—100 % с шагом 1 %. Модельные спектральные кривые получали с помощью одного из блоков разработанного нами программного обеспечения WINCHL [Kochubey S. M., Yatsenko V. A., Gurinovich N. V., см. сайт <http://vegetation.kiev.ua>].

Спектры отражения измеряли на модифицированном двухлучевом спектрофотометре СФ-10 (ЛОМО), оборудованном интегрирующей сферой. Разработанный нами блок сопряжения с компьютером позволял получать данные в циф-

ровом виде. Спектры отражения измеряли в диапазоне $\lambda\lambda = 400\text{—}750$ нм с шагом 1 нм.

Спектральные кривые отражения сглаживали и рассчитывали первые производные по формулам Савицкого — Голая [9]. Для сглаживания применяли полиномы второй степени и скользящего окна размером 5 точек. Первые производные рассчитывали с использованием полиномов третьей степени и скользящего окна размером 11 точек.

Спектры отражения посевов озимой пшеницы измеряли с помощью разработанного нами полевого спектрометра [11, см. также сайт <http://vegetation.kiev.ua>]. Прибор устанавливали на штативе над посевом на высоте 115 см от верхушек растений. При этом размер исследуемого участка посева составлял 35×35 см. Измерения спектров отражения проводили с 3-кратной повторностью. Из этого участка посева отбирали девять растений из точек, отстоящих друг от друга на одинаковом расстоянии, для определения концентрации хлорофилла. Участок посева фотографировали, и по полученному изображению определяли величину проективного покрытия путем выборочного удаления цвета в программе Adobe Photoshop 7.0 Professional.

Концентрацию хлорофилла в пересчете на единицу площади листа определяли для каждого яруса листьев. Листья, собранные с каждого яруса всех девяти растений, сканировали с помощью сканера Mustek Scan Express 12000P и затем определяли их площади путем компьютерной обработки полученных изображений. После этого из этих листьев экстрагировали хлорофилл в 80 % ацетоне, спектрофотометрировали и рассчитывали содержание хлорофилла по формуле Арнона [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализировали форму спектров отражения модельных систем почва—растительность, которые имитировали проективное покрытие почвы, равное 100, 50 и 25 %. Они представляли собой фрагмент листа, помещенный поверх слоя почвы. В первом случае площадь исследуемой поверхности листьев совпадала с размером поля зрения прибора. В двух других — размеры фрагментов листа закрывали 50 или 25 % пло-

щади поля зрения на фоне темной или светлой почвы.

Спектры отражения систем с неполным проективным покрытием отличаются от таковых для варианта с полным покрытием (рис. 1). В случае светлой почвы увеличивается значение коэффициента отражения по всему спектральному диапазону. Зеленый максимум и красный минимум спектра становятся менее выраженными, изме-

няется наклон спектральной кривой в области красного края ($\lambda = 680\text{--}750\text{ нм}$). В случае темной почвы уменьшение проективного покрытия вызывает снижение коэффициента отражения по всему спектру, а также изменение деталей спектра.

Рассмотрение графиков первой производной спектральных кривых коэффициента отражения (рис. 2) показывает, что в случае неполного

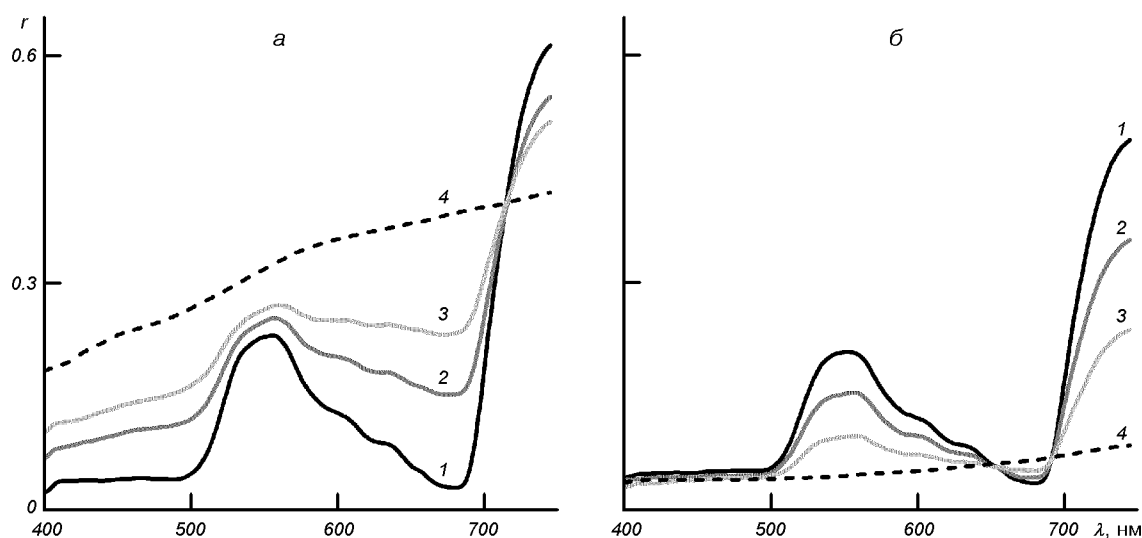


Рис. 1. Спектры отражения r системы почва—растительность, имитированные с использованием листьев огурца на фоне светлой (а) и темной (б) почвы: 1, 2, и 3 — для проективного покрытия 100, 50 и 25 %, 4 — спектр отражения почвы

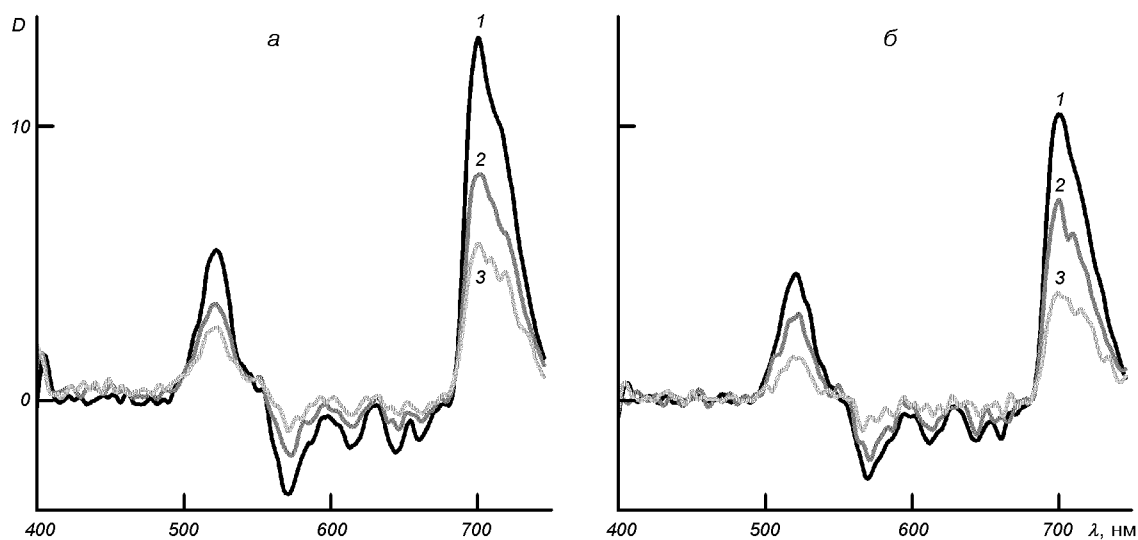


Рис. 2. Графики первых производных $D = dr/d\lambda$ от спектральных кривых отражения системы почва — растительность, приведенных на рис. 1

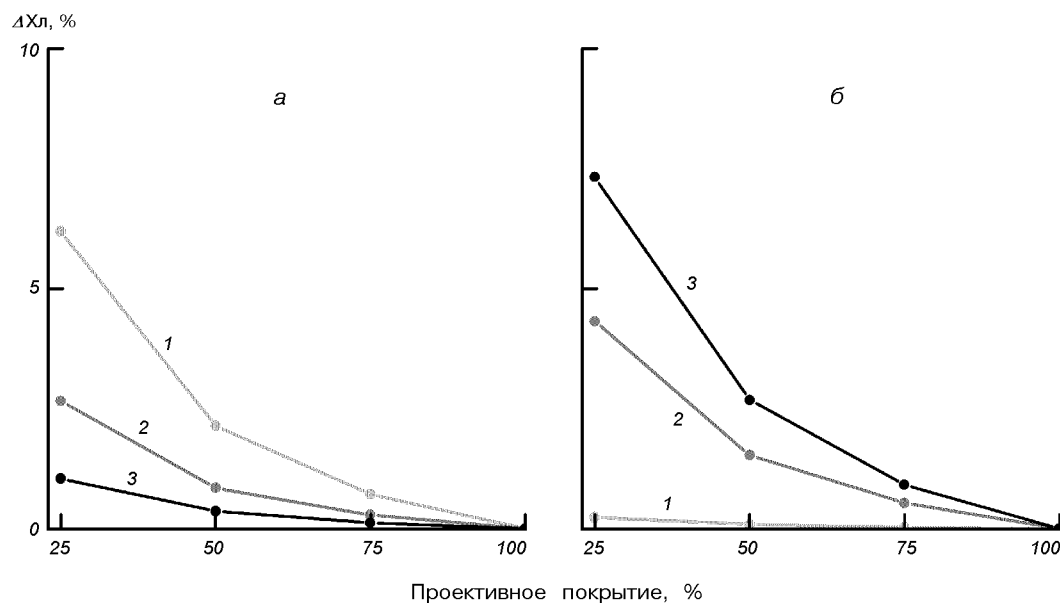


Рис. 3. Значения отклонений оценки хлорофилла в зависимости от величины проективного покрытия для светлой (а) и темной (б) почвы: 1, 2 и 3 — низкое (1.5 мг/дм^2), среднее (3.0 мг/дм^2) и высокое (3.8 мг/дм^2) содержание хлорофилла в листьях

проективного покрытия указанные изменения влияют только на амплитуду производной, но не на ее форму. Из этого следует, что разработанный нами деривативный вегетационный индекс D_{725}/D_{702} [7], где D_λ — значение первой производной при $\lambda = 725$ и 702 нм, должен сохранять свою работоспособность для оценки содержания хлорофилла в системах с неполным проективным покрытием. Для проверки этого заключения были рассчитаны концентрации хлорофилла по спектрам отражения моделей с полным и неполным проективным покрытием с применением указанного выше деривативного индекса.

Различие оценок хлорофилла для вариантов с неполным проективным покрытием увеличивается при уменьшении площади листа на фоне почвы. Характер изменений величины отклонения зависит от концентрации хлорофилла в листе и отражательной характеристики почвы. Для изучения зависимости отклонений концентрации хлорофилла от величины проективного покрытия в более широком диапазоне значений этих показателей были использованы графические модели (см. выше). Расчеты содержания хлорофилла по модельным и экспериментально

полученным спектральным кривым, соответствующим 50 и 25 % покрытию, дали хорошее совпадение, что дает основание к применению графического моделирования.

Указанные зависимости приведены на рис. 3 на примере листьев огурца с разной концентрацией хлорофилла на фоне темной и светлой почвы. Видно, что в случае светлой почвы максимальные отклонения наблюдаются для листьев с низким содержанием хлорофилла, в то время как темная почва сильнее влияет на оценку хлорофилла для листьев с высоким содержанием пигмента. Однако даже при уровне проективного покрытия 25 % отклонения оценки хлорофилла от варианта покрытия 100 % лишь незначительно превышает величину ошибки уравнения регрессии, использованного для расчета концентрации хлорофилла по деривативному индексу (табл. 1, 2).

Максимальные отклонения оценки хлорофилла в моделях с проективным покрытием 25 % были определены для нескольких видов растений, для которых, как было показано ранее, оказалось возможным использовать приведенный выше деривативный индекс [7]. Были ис-

Таблица 1. Различия оценок концентрации хлорофилла для вариантов покрытия 25 % и 100 % (ХЛ₂₅ и ХЛ₁₀₀) в системе с низкой концентрацией хлорофилла и светлой почвой

| Вид растения | ХЛ ₁₀₀ , мг/дм ² | ХЛ ₂₅ /ХЛ ₁₀₀ , % | Ошибка регрессии, % |
|--------------|--|---|---------------------|
| Пшеница | 2.7±1.2 | 111 | 44 |
| Кукуруза | 1.0±0.3 | 132 | 35 |
| Виноград | 1.0±0.3 | 122 | 29 |
| Огурец | 1.8±0.2 | 106 | 11 |

Таблица 2. Различия оценок концентрации хлорофилла для вариантов покрытия 25 % и 100 % (ХЛ₂₅ и ХЛ₁₀₀) в системе с высокой концентрацией хлорофилла и темной почвой

| Вид растения | ХЛ ₁₀₀ , мг/дм ² | ХЛ ₂₅ /ХЛ ₁₀₀ , % | Ошибка регрессии, % |
|--------------|--|---|---------------------|
| Пшеница | 7.6±1.2 | 89 | 16 |
| Кукуруза | 4.6±0.3 | 88 | 8 |
| Виноград | 3.9±0.3 | 91 | 7 |
| Огурец | 3.5±0.2 | 93 | 6 |

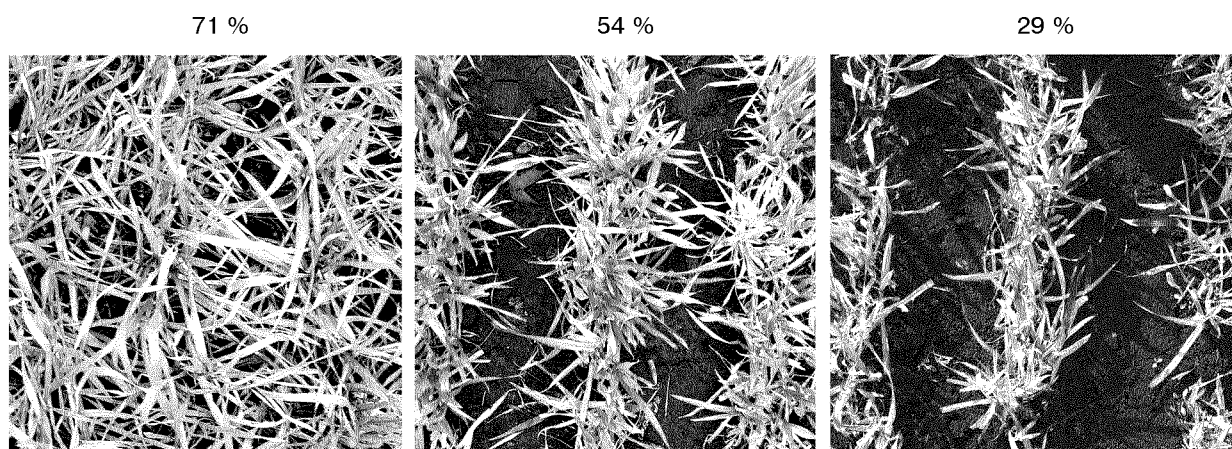


Рис. 4. Изображения участков посевов озимой пшеницы с разным проективным покрытием, использованных для спектрометрирования в натуральных условиях

пользованы листья с низким и предельно высоким для каждого вида содержанием хлорофилла на фоне темной и светлой почвы. Для всех растений отклонения не превышали ошибку регрессии в вариантах со светлой почвой и низким содержанием хлорофилла, и в некоторых случаях незначительно превышали ее в вариантах с темной почвой и высокой концентрацией хлорофилла (табл. 1, 2).

Таким образом, разработанный нами деривативный индекс позволяет с достаточной точностью получать оценки хлорофилла для самых неблагоприятных систем почва—растительность и для проективного покрытия вплоть до 25 %. Известно, что в этих случаях методы, основанные на использовании коэффициентов яркости, теряют работоспособность [1].

Оценено содержание хлорофилла по спектральным кривым отражения посевов озимой пшеницы. Измерения проведены с помощью разработанного нами полевого спектрометра. Посевы спектрометрировались в разных фазах вегетации, благодаря чему величина проективного покрытия варьировала в диапазоне 29—71 %. Фотографии участков с разным проективным покрытием показаны на рис. 4. Как указывалось выше, химическим способом измеряли концентрацию хлорофилла в листьях разных ярусов. Исследовали корреляцию между концентрацией хлорофилла и индексом D_{725}/D_{702} , рассчитанным по спектрам посевов. Оказалось, что наивысшая корреляция ($R = 0.94$) обнаруживается для верхних ярусов листьев растений в посевах (рис. 5).

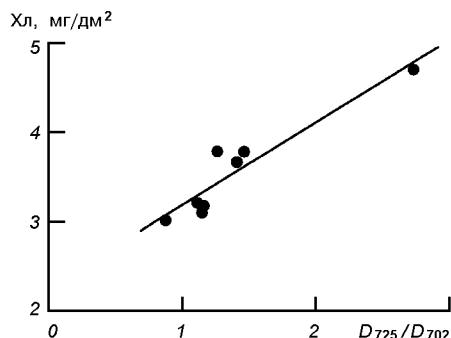


Рис. 5. Зависимость между средней концентрацией хлорофилла (Хл) в верхних листьях посевов озимой пшеницы и значением деривативного индекса D_{725}/D_{702} , рассчитанного по спектральным кривым отражения этих посевов

Таким образом, испытания метода, проведенные в натуральных условиях, подтвердили вывод о том, что метод оценки хлорофилла с использованием деривативных индексов действительно работоспособен при низких значениях проективного покрытия почвы растительностью. Аппаратура, построенная на основе этого метода, может применяться в быстрых полевых обследованиях для тестирования содержания хлорофилла в растениях.

1. Кочубей С. М. Сравнение информационных возможностей многозональной съемки и спектроскопии высокой разрешающей способности при дистанционном зондировании растительного покрова // *Космічна наука і технологія*.—1999.—5, № 2/3.—С. 41—48.
2. Кочубей С. М. Оценка основных параметров сельскохозяйственных посевов по спектру отражения растительности в оптическом диапазоне // *Космічна наука і технологія*.—2003.—9, № 5/6.—С. 185—190.
3. Шадчина Т. М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. — Київ: Укр. фітосоц. центр, 2001.—319 с.
4. Arnon D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* // *Plant Physiol.*—1949.—24.—P. 1—15.

5. Jacquemoud S., Bacour C., Polive H., Frangi J.-P. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode // *Remote Sens. Environ.*—2000.—74.—P. 471—481.
6. Kochubey S. M., Bidyuk P. I. A Novel Approach to remote sensing of vegetation // *Proc. SPIE.*—2003.—5093.—P. 181—188.
7. Kochubey S., Kazantsev T. Changes in the first derivatives of leaf reflectance spectra of various plants induced by variations of chlorophyll content // *J. Plant Physiol.*—2007.—164, N 12.—P. 1648—1655.
8. Kochubey S. M., Yatsenko V. A. Monitoring system for agricultural crops on chlorophyll basis // *Proc. SPIE.*—2000.—5232.—P. 92—99.
9. Savitzky A., Golay M. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // *Analyt. Chem.*—1964.—36, N 8.—P. 1627—1639.
10. 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 // *Remote Sens. Environ.*—2002.—81.—P. 337—354.
11. 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.
12. Zarco-Tejada P. J., Miller J. R., Harron J., et al. Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from boreal conifer forest canopies // *Remote Sens. Environ.*—2004.—89, N 2.—P. 189—199.

THE USE OF DERIVATIVE VEGETATION INDICES FOR THE ELIMINATION OF INTERFERENCES CAUSED BY SOIL REFLECTION IN REMOTE SENSING OF VEGETATIVE COVER

S. M. Kochubey, T. A. Kazantsev, V. V. Donets

Effectiveness of derivative vegetation index for chlorophyll estimation in oil-vegetation systems with incomplete soil covering was tested. We measured reflectance spectra for the model systems consisting of plant leaves with various chlorophyll content and soil with various brightness. Distinctions between chlorophyll values estimated for 25 % and 100 % soil covering did not significantly exceed the error of regression formula used for the chlorophyll estimation. Our results prove the capability of the proposed approach for testing crops with a low level of soil covering. The field reflectance measurements of crops with various growing density confirm the laboratory results.