

УДК 581.133.1:535.361.2

**С. М. Кочубей, Т. А. Казанцев**

Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, Київ

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕРИВАТИВНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ИЗ КОСМОСА**

---

*Вивчено можливість використання деривативних вегетаційних індексів для моніторингу рослинності на основі гіперспектральних вимірювань з борту космічного супутника. За допомогою імітаційних моделей «грунт — рослинність» проведено розрахунки деривативною вегетаційного індексу  $D_{725}/D_{702}$  з використанням спектральних кривих відбиття листків. Показано, що зниження спектрального розділення до 10 нм, що відповідає максимальним відомим на сьогодні значенням для супутникових сенсорів, не викликає істотних змін індексу  $D_{725}/D_{702}$ . При повному проєктивному покритті ґрунту рослинністю відхилення його величини від значень, отриманих при розділенні 1 нм, знаходяться в межах 2–7 % при варіаціях концентрації пігменту в широкому діапазоні. У разі неповного проєктивного покриття відхилення не перевищують 16 % для найбільш несприятливого випадку: проєктивне покриття ґрунту 25 %, низький вміст хлорофілу і високе відбиття ґрунту. Теоретичне обґрунтування інформативності індексу  $D_{725}/D_{702}$  при зниженому спектральному розділенні підтверджено результатами аналізу даних спектрального сенсора Hyperion, встановленого на борту супутника EO-1. Встановлена висока кореляція між відбиттям в зеленій області спектрів посівів пшениці, присутніх на знімку, і концентрацією хлорофілу, розрахованою за індексом  $D_{725}/D_{702}$ .*

---

Растительность — один из важнейших объектов, которые подлежат дистанционным исследованиям и контролю. Фотосинтетический аппарат растений является чувствительным индикатором состояния растений, что обусловлено быстрыми изменениями содержания пигментов, в первую очередь хлорофилла, в ответ на изменения параметров окружающей среды. Форма спектра отражения растительности в видимом диапазоне определяется в основном спектральными характеристиками хлорофилла, что открывает возможность создать высокоинформативные методы дистанционного зондирования состояния растительности. Так называемые «хлорофильные индексы» широко используются для оценки различных параметров, в том числе оценки продуктивности агроценозов [1]. На основе данных о содержании хлоро-

филла в листьях оценивается обеспеченность растений азотным питанием [6, 8]. В решении экологических задач оценки хлорофилла могут быть использованы для раннего обнаружения факторов риска, например утечки газа или нефти из продуктопроводов [13], радиационного загрязнения территорий [7].

В настоящее время используются два типа индексов для оценки хлорофилла. Это либо комбинации спектральных коэффициентов яркости, либо так называемые деривативные вегетационные индексы, которые рассчитываются как отношение амплитуд при двух длинах волн в графиках первой производной от контура спектра отражения. Последние имеют ряд существенных преимуществ, позволяющих создать надежную базу для дистанционного мониторинга состояния фитоценозов. Основным преимуществом является крайне слабая чувствительность индексов к вкладу отражения от почвы. Было показано, что при 25 % проєктивном покрытии

почвы растительностью с низким содержанием хлорофилла отклонение данных его оценки от варианта 100 % покрытия не превышает 10 % даже при высокой отражательной способности почвы [3, 4, 11].

Известны различные деривативные индексы, отличающиеся выбором длин волн, для которых проводятся расчеты отношения амплитуд в графиках первой производной [5, 9, 12—14]. Создание метода оценки хлорофилла по деривативным индексам налагает ряд требований на выбор такого индекса. К их числу относится устойчивость к помехам, например возникающим при вариациях формы спектра отражения в зависимости от содержания хлорофилла в растениях. Возникает необходимость обеспечить такую процедуру вычисления, чтобы получить наиболее простой алгоритм оценки хлорофилла. Деривативный индекс должен быть приемлемым для работы с различными видами растений. Как было показано нами, наилучшим образом этим требованиям удовлетворяет индекс  $D_{725}/D_{702}$  [10], который представлен отношением амплитуд в графике первой производной при  $\lambda = 725$  и  $702$  нм. Этот индекс может быть использован для оценки хлорофилла в растениях различных видов, и в отличие от предложенного ранее [5, 9] его вычисление не требует поиска экстремумов в графике первой производной, что упрощает алгоритм расчета.

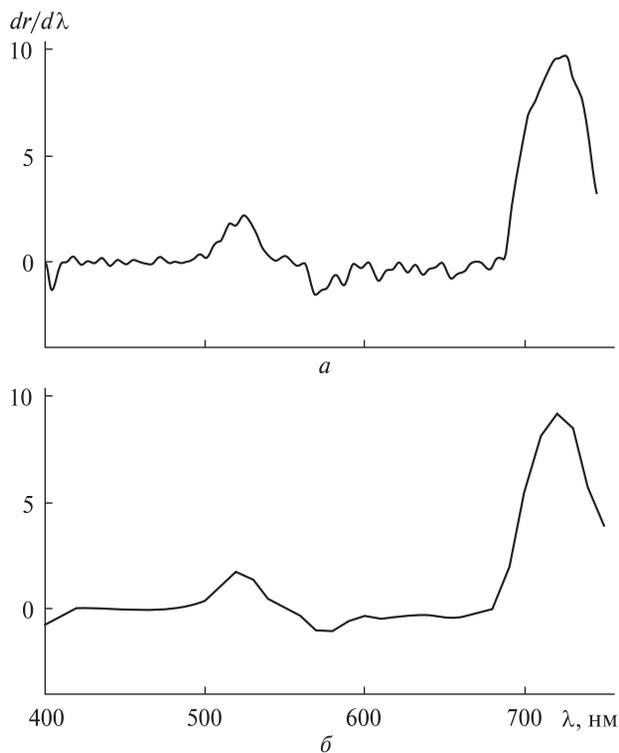
Успешные испытания в полевых условиях предложенного нами метода дистанционной оценки хлорофилла на основе индекса  $D_{725}/D_{702}$  [2] позволяют поставить вопрос о приемлемости его для измерений с борта космических спутников. Для этого необходимо проверить работоспособность метода при использовании гиперспектральной аппаратуры, разрешающая способность которой не превышает 10 нм. В данной работе с помощью имитационных моделей были оценены отклонения величины индекса  $D_{725}/D_{702}$ , рассчитанного по спектральным кривым с разрешением  $\Delta\lambda = 10$  нм, по сравнению с его значениями, полученными при разрешении  $\Delta\lambda = 1$  нм. Расчеты проведены для системы «почва — растительность» с различными параметрами, такими как величина проек-

тивного покрытия, концентрация хлорофилла, отражательная способность почвы. Теоретически обоснованная возможность использования такого индекса была подтверждена с помощью анализа гиперспектральных данных, полученных сенсором «Nuregion», установленным на спутнике EO-1.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для теоретических расчетов использовали спектры отражения листьев озимой пшеницы, измеренные с разрешением 1 нм с помощью модифицированного лабораторного спектрофотометра СФ-10 как описано ранее [10]. Исходные спектральные кривые трансформировались к разрешению 10 нм. По исходным и трансформированным спектрам строились графики их первых производных, как описано ранее [10], и рассчитывались значения индекса  $D_{725}/D_{702}$ . Аналогичные вычисления были проведены по спектрам отражения модельных систем «почва — растительность», имитирующих неполное проективное покрытие. Модели таких систем были организованы в лабораторных условиях с использованием листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла и почвы с существенно различающейся отражательной способностью — чернозем и светлый песок [3, 4].

Анализ гиперспектрального снимка, полученного сенсором «Nuregion» со спутника EO-1 и откорректированного на пропускание атмосферы, проводили следующим образом. С помощью компьютерной программы ENVI было построено 3-канальное изображение в цветовой модели RGB сцены размером  $10.5 \times 7.62$  км, на котором есть сельскохозяйственные посеяны. Представление объектов сцены в натуральных цветах позволило выбрать 10 фрагментов посевов с различающейся интенсивностью зеленой окраски, от светло- до темно-зеленой. Согласно модели RGB цвет каждого пикселя представлен суперпозицией красного, зеленого и синего цвета с разными уровнями светимости. Относительные величины светимости для каждого цвета, нормируются от 0 до 255. Величины в «зеленом» канале для выбранных фрагментов



**Рис. 1.** Графики первой производной спектра отражения листьев озимой пшеницы (концентрация хлорофилла — 8.08 мг/дм<sup>2</sup>), построенные по спектральным кривым, соответствующим разрешениям  $\Delta\lambda = 1$  нм (а) и 10 нм (б)

изображения использовались в качестве меры интенсивности зеленого цвета. В дальнейшем они будут называться «значение G-канала». Так же с помощью ENVI конвертировались спектры отражения пикселей в формат ASCII для дальнейших расчетов вегетационного индекса согласно алгоритму, разработанному нами ранее [10].

Для каждого из 10 выбранных фрагментов посевов был получен усредненный спектр отражения, для которого построен график первой производной, рассчитан вегетационный индекс  $D_{725}/D_{702}$ , и с помощью процедуры [10] получена оценка содержания хлорофилла. Для выбранных фрагментов также были вычислены средневзвешенные «значения G-канала» в программе Adobe Photoshop CS4 и затем рассчитана корреляция между этими величинами и оценками содержания хлорофилла.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены графики первых производных спектров отражения листьев озимой пшеницы, записанных с различным спектральным разрешением. Как видно, уменьшение разрешения приводит к сглаживанию деталей тонкой структуры.

В табл. 1 приведены значения  $D_{725}/D_{702}$  для листьев с различным содержанием хлорофилла, рассчитанные по спектральным кривым отражения с различным разрешением. Из таблицы следует, что отклонения величины  $D_{725}/D_{702}$ , вызванные снижением спектрального разрешения, не превышают 7 %. Поэтому можно считать, что спектры отражения, измеряемые гиперспектральной аппаратурой с разрешением 10 нм с борта спутника, вполне приемлемы для количественной оценки хлорофилла.

Известно, что основной проблемой, существенно искажающей результаты дистанционных измерений растительности, является неполное проективное покрытие почвы растительностью [3]. В связи с этим были проанализированы отклонения деривативного индекса  $D_{725}/D_{702}$ , рассчитанного по спектрам отражения модельных систем «почва — растительность», имитирующих различное проективное покрытие, по сравнению с его значениями, отвечающими варианту полного проективного покрытия и разрешению 1 нм. Модели составляли из листьев озимой пшеницы с высокой, средней и низкой концен-

**Таблица 1.** Влияние спектрального разрешения спектрометра на расчетную оценку индекса ДИ =  $D_{725}/D_{702}$  (спектральные кривые, соответствующие низкому разрешению, имитированы с помощью спектров листьев озимой пшеницы, измеренных при разрешении 1 нм)

Концентрация хлорофилла, мг/дм <sup>2</sup>	$\Delta\lambda$ , нм	ДИ = $D_{725}/D_{702}$	ДИ <sub>10</sub> /ДИ <sub>1</sub> *
8.08	1	1.41	0.98
	10	1.39	
4.47	1	0.71	1.03
	10	0.73	
1.50	1	0.43	1.07
	10	0.46	

\* — отношение значений ДИ при разрешениях  $\Delta\lambda = 10$  и 1 нм

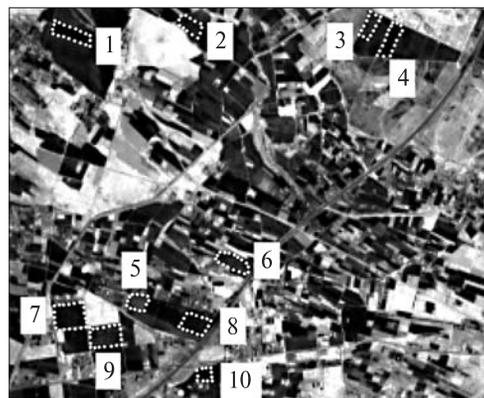
трацией хлорофилла. Фоном служила черноземная почва с низким отражением 5–10 % в спектральном диапазоне 680–750 нм, используемом для измерений, и светлая песчаная, для которой коэффициент отражения составлял от 20 до 50 % в указанном диапазоне. Результаты расчетов индекса  $D_{725}/D_{702}$  по спектрограммам таких систем приведены в табл. 2.

Видно, что наиболее высокие отклонения величины индекса от значений, полученных по спектрограммам с высоким разрешением, проявляются в случае низкого содержания хлорофилла. Максимальное отклонение 16 % соответствует самому неблагоприятному случаю — проективное покрытие 25 % на фоне светлой почвы при низком содержании хлорофилла. Следует отметить, что основной причиной увеличения отклонения является не пониженное спектральное разрешение, а искажение формы спектра отражения, вызванное вкладом отраже-

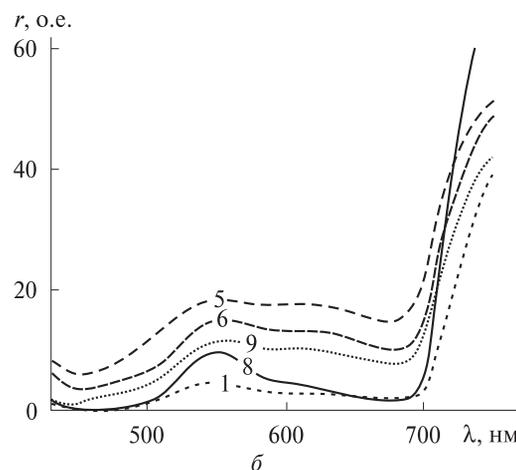
**Таблица 2. Отклонения величины деривативного вегетационного индекса  $D_{725}/D_{702}$ , рассчитанного по спектральным кривым с разрешением 10 нм, от величины, определяемой по кривым с разрешением 1 нм в моделях «почва — растительность» с неполным проективным покрытием почвы**

Концентрация хлорофилла, мг/дм <sup>2</sup>	Грунт	Проективное покрытие, %	ДИ = $D_{725}/D_{702}$	ДИ <sub>10</sub> /ДИ <sub>1</sub> *
8.08	Чернозем	50	1.38	1.03
		25	1.37	1.04
	Светлый песок	50	1.34	1.06
		25	1.24	1.12
5.67	Чернозем	50	1.03	0.96
		25	1.06	0.93
	Светлый песок	50	1.02	0.97
		25	1.02	0.97
2.90	Чернозем	50	0.60	0.91
		25	0.63	0.86
	Светлый песок	50	0.61	0.89
		25	0.64	0.84

\* — отношение значений индекса  $D_{725}/D_{702}$ , рассчитанных для модельных систем по спектрограммам с разрешением  $\Delta\lambda = 10$  нм, и рассчитанных по спектрограммам с разрешением  $\Delta\lambda = 1$  нм, соответствующих полному проективному покрытию



а



**Рис. 2.** а — снимок, полученный сенсором «Hyperion» с борта спутника EO-1 (1–10 — номера фрагментов, выбранных для анализа); б — усредненные спектры отражения, соответствующие некоторым фрагментам

ния почвы. Как было показано ранее, такие искажения спектра приводят к отличиям индекса  $D_{725}/D_{702}$  около 10 % по сравнению с оценками при полном проективном покрытии и в случае использования спектральных данных, полученных при разрешении 1 нм [3, 4].

Таким образом, теоретический анализ, проведенный для самых различных систем «почва — растительность», показывает, что метод деривативных индексов дает вполне удовлетворительные результаты для оценки хлорофилла по спектрам отражения, измеренным спектральной аппаратурой с разрешением 10 нм.

Для проверки этого заключения проведен анализ данных, полученных спектральным сенсо-

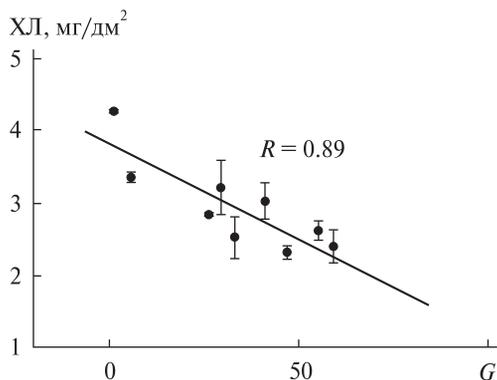


Рис. 3. Зависимость значений концентрации хлорофилла, рассчитанных по снимку «Нурегіон» для фрагментов 1—10 от значений канала G

ром «Нурегіон» с борта спутника EO-1. Значения деривативного индекса  $D_{725}/D_{702}$ , рассчитанные для 10 фрагментов изображения сельскохозяйственных посевов, сопоставляли со «значениями G-канала» этих фрагментов (рис. 2). Отражение света растительностью в зеленой области спектра зависит от содержания хлорофилла. Коэффициент отражения более высокий при меньшем содержании пигмента [6], поэтому такие участки на цветном изображении будут выглядеть светло-зелеными. В пределах одного снимка в условиях одинакового освещения интенсивность зеленой окраски объекта может быть использована как относительный показатель концентрации хлорофилла.

Рис. 3 демонстрирует взаимосвязь между оценкой хлорофилла, рассчитанной с помощью индекса  $D_{725}/D_{702}$  по спектрам отражения фрагментов посевов, и интенсивностью зеленой окраски этих фрагментов на изображениях — «значениями G-канала». Обнаруживается тесная корреляция между этими величинами.

Таким образом, теоретические расчеты и предварительная экспериментальная проверка показывают, что разработанный нами деривативный вегетационный индекс может быть использован для количественной оценки содержания хлорофилла в растительности по космическим снимкам, полученным с помощью гиперспектральной аппаратуры с разрешением не хуже 10 нм. Следует отметить, что такой подход выдвигает

весомую альтернативу используемым в настоящее время методам оценки хлорофилла по космическим измерениям, например с применением NDVI-индексов. Это обусловлено прежде всего тем, что для вычисления деривативных индексов не нужно нормировать спектры к эталону 100 % отражения. Кроме того, в отличие от методов, использующих спектральные коэффициенты яркости, в частности NDVI-индексы, наш метод может вполне уверенно работать с разреженными посевами, например на ранних стадиях вегетации или рядковыми посевами.

Также следует отметить, что использование одного и того же алгоритма расчетов для гиперспектрального снимка и наземных измерений с помощью разработанного нами полевого спектрометра, снабженного GPS-датчиком, обеспечивает надежную основу для разработки технологии валидации космических данных.

1. Андрианова Ю. Е., Тарчевский И. А. Хлорофилл и продуктивность растений. — М.: Наука, 2000. — 135 с.
2. Казанцев Т. А., Туменок Л. В., Кочубей С. М. Дистанционные измерения динамики содержания хлорофилла в посевах озимой пшеницы // Физиол. и биохим. культурных растений. — 2010. — 42, № 6. — С. 544—549.
3. 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.
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, № 3. — С. 69—74.
5. Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Количественный анализ формы спектральных кривых отражения листьев растений как способ тестирования их состояния // Физиол. и биохим. культурных растений. — 1988. — 20, № 6. — С. 535—539.
6. Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990. — 136 с.
7. Davids C., Tyler A. N. Detecting contamination-induced tree stress within the Chernobyl exclusion zone // Remote Sens. Environ. — 2003. — 85, N 1. — P. 30—38.
8. Graeff S., Claupein W. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea mays L.*) in the field by reflectance measurements // Eur. J. Agron. — 2003. — 19, N 4. — P. 611—618.

9. Kochubey S. M., Bidiuk P. I. Novel approach to remote sensing of vegetation // Proc. of SPIE. — 2003. — 5093. — P. 181—188.
10. Kochubey S. M., Kazantsev T. A. 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.
11. Kochubey S. M., Yatsenko V. A. Monitoring system for agricultural crops on chlorophyll basis // Proc. of SPIE. — 2003. — 5232. — P. 92—99.
12. Lamb D. W., Steyn-Ross M., Schaars P., et al. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass // Int. J. Rem. Sens. — 2002. — N 23. — P. 3619—3648.
13. Smith K. L., Steven M. D., Colls J. J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red edge region to identify plant stress responses to gas leaks // Remote Sens. Environ. — 2004. — 92. — P. 207—217.
14. Zarko-Tejada P. J., Miller J. R., Morales A., et al. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops // Remote Sens. Environ. — 2004. — 90. — P. 463—476.

Надійшла до редакції 07.01.11

S. M. Kochubei, T. A. Kazantsev

#### THE USE OF DERIVATIVE VEGETATION INDICES FOR THE ESTIMATION OF CHLOROPHYLL CONTENT IN VEGETATION ON THE BASIS OF SATELLITE DATA

The possibility to use derivative vegetation indices for the monitoring of vegetation on the basis of satellite hyperspectral measurements is studied. Soil-vegetation models are employed to calculate the derivative vegetation index  $D_{725}/D_{702}$  with the use of reflectance spectra of leaves. It is shown that a decrease in spectral resolution down to 10 nm, which corresponds to the maximum value for satellite hyperspectral sensors, causes no significant changes in the  $D_{725}/D_{702}$  value. Variations of the index lay in the range from 2 to 7 % in the case of full soil covering and do not exceed 16 % for the most complicated model configuration which is 25 % soil covering, a low chlorophyll content and a high soil reflectance. The results are tested practically by analyzing the spectral image of wheat crops obtained with the hyperspectral sensor Hypersion onboard the satellite EO-1. A high correlation is revealed between the reflectance in the green region of the spectra of the wheat crops from the image and the chlorophyll content calculated with the use of the  $D_{725}/D_{702}$  index.