

581.133.1:535.361.2

**С. М. Кочубей**

Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Київ

**Оценка основных параметров  
сельскохозяйственных посевов  
по спектру отражения растительности  
в оптическом диапазоне**

---

Показано, що спектральні криві відбивання рослинності містять достатню інформацію, щоб створити набір параметрів для ефективного контролю стану посівів сільськогосподарських культур. Для більшості з них використовується оцінка вмісту хлорофілу чи характеристики, що залежать від впливу внутрішньої структури листової тканини на відбивальну здатність листя в області поглинання хлорофілу. На прикладі озимої пшениці запропоновано новий хлорофільний індекс для оцінки вмісту хлорофілу в листках на основі кількісного параметра форми спектральної кривої відбивання. Ним є відношення двох максимумів у графіку першої похідної від спектральної кривої відбивання в області  $\lambda\lambda$  680—750 нм, яке корелює із вмістом хлорофілу. Використання фізичної, графічної і математичної моделей дозволило оцінити стійкість результатів обчислення концентрації хлорофілу із застосуванням вказаного хлорофільного індексу до впливу відбивання ґрунту. Показано, що відношення двох максимумів в графіку першої похідної змінюється не більш ніж на 5 % і 11 % при проективному покритті 50 % і 25 % відповідно, на фоні темного ґрунту чи піску. Коефіцієнт відбивання на  $\lambda = 550$  нм корелює з вмістом хлорофілу і загального азоту, але виявляє чутливість до вмісту вологи в листках. Він також чутливий до вкладу відбивання від ґрунту. Тому комбінаторні оцінки хлорофілу, отримані за допомогою кількісного параметра, що характеризує форму спектру в області червоного краю, і коефіцієнта відбивання  $\lambda = 550$  нм, дають можливість оцінювати величину проективного покриття для незімкнутих посівів, або вміст вологи в листках у зімкнутих посівах.

---

**ВСТУПЛЕНИЕ**

Использование дистанционного тестирования состояния агроценозов привлекательно как эффективный инструмент контроля и управления этим видом природных ресурсов. Создание адекватной системы мониторинга посевов сельскохозяйственных культур требует разработки методов оценки их основных характеристик, а также разработки аппаратуры для инструментальной реализации этих методов. Эффективность системы увеличивается, если одно и то же устройство способно контролировать несколько различных параметров.

Содержание хлорофилла в листьях высших растений является важной характеристикой их состоя-

ния. Следовательно, дистанционное определение этого показателя может быть использовано для создания набора методов тестирования состояния посева. Спектры отражения листьев растений в оптическом диапазоне являются наиболее информативными относительно содержания хлорофилла, вследствие того, что они обусловлены специфическими спектральными свойствами этого пигмента. Кроме того, эти спектры являются удобной характеристикой для дистанционных измерений и имеют высокий информативный потенциал. В настоящее время стало ясно, что именно спектры отражения, но не коэффициенты яркости, являются наиболее перспективными показателями, пригодными для создания системы мониторинга растительности.

Этим, очевидно, обусловлен большой интерес к исследованиям с применением дистанционной гиперспектральной изображающей аппаратуры, а также по спектральным характеристикам растительности.

Известны некоторые спектральные параметры, коррелирующие с содержанием хлорофилла. К их числу относятся положение так называемого красного края в спектрах отражения (область  $\lambda\lambda$  680—800 нм) [1, 6, 8] и отношение интенсивностей в двух максимумах в графике первой производной от спектральной кривой в области красного края [2, 3, 7, 10].

Основные характеристики сельскохозяйственных посевов, важные для оценки их состояния, следующие: содержание хлорофилла, общего азота и влаги в листьях, проективное покрытие. Ниже будут приведены данные, демонстрирующие информативные возможности различных параметров спектральных кривых отражения листьев озимой пшеницы в отношении физиологических характеристик, необходимых для оценки состояния посевов.

#### МЕТОДОЛОГИЯ

Листья растений озимой пшеницы, выращенных в полевых условиях, использовали для проведения спектральных измерений. Вариации содержания хлорофилла были обусловлены различиями минерального питания и возрастом растений. Спектры отражения измерены на спектрофотометре СФ-10, снабженном интегрирующей сферой. Система регистрации была модифицирована с тем, чтобы получать спектры в цифровом виде. Их регистрировали в диапазоне  $\lambda\lambda = 400\text{—}750$  нм с шагом 1 нм. Части листьев, спектры отражения которых были записаны, затем использовали для определения хлорофилла химическим методом [5].

Эксперименты с изменением влагоемкости листьев проводили по следующей схеме. Измеряли спектры отражения листьев пшеницы. Затем взвешивали листья каждого образца, использованного для записи спектральной кривой. Листья каждой пробы помещали в цилиндры с водой, так что только нижняя часть листьев с открытыми проводящими пучками была погружена в воду. Цилиндры закрывали крышками и оставляли на 12 ч в темном прохладном месте. Такая процедура позволяет осуществить 100 %-ю влагоемкость листа. После этого листья каждой пробы взвешивали, записывали спектры отражения, каждую пробу высушивали в термостате и взвешивали для определения массы сухих листьев.

Изучение влияния величины проективного покрытия на спектры отражения проводили с использованием физических, графических и математических моделей, которые осуществляли следующим образом. Проективное покрытие 100 % и 50 % в физических моделях было достигнуто, когда поверхность измерительной кюветы была полностью или наполовину закрыта листьями. Черную почву или песок использовали в качестве подложки. В графической модели проективное покрытие 50 % было представлено как полусумма спектральных кривых отражения листьев и подложки. Проективное покрытие 25 % моделировалось как сумма спектров листьев и подложки, первый из которых умножали на 0.25, а второй на 0.75.

Спектральное распределение света, отраженного от системы почва-растительность, представляли следующим уравнением:

$$R_{n-p}(\lambda) = R_p(\lambda)k + (1 - k)(a\lambda + b),$$

где  $R_{n-p}(\lambda)$  — коэффициент отражения системы почва-растительность,  $R_p(\lambda)$  — спектральный коэффициент отражения растительности,  $k$  — проективное покрытие. Спектры отражения почвы близки к прямой линии, поэтому они смоделированы функцией  $a\lambda + b$ .

Первая производная от функции  $R_{n-p}(\lambda)$  записывается в виде

$$dR_{n-p}(\lambda)/d\lambda = k dR_p/d\lambda + (1 - k)a. \quad (1)$$

Пусть  $I_2$  и  $I_1$  — значения первой производной для двух длин волн,  $\lambda_2$  и  $\lambda_1$ , тогда их отношение определяется следующим уравнением:

$$(I_2/I_1)_{n-p} = \{ [kI_2^p/(1 - k)] + a \} : \{ [kI_1^p/(1 - k)] + a \}, \quad (2)$$

где  $I_2^p$  и  $I_1^p$  — значения первой производной спектра листьев, т. е. спектра, соответствующего 100 %-му проективному покрытию. Можно видеть, что отношение значений первой производной для двух различных длин волны зависит от проективного покрытия и крутизны нарастания функции спектрального распределения отражения почвы. Измерив  $I_2^p$  и  $I_1^p$  для конкретных спектральных кривых, а также определив  $a$  по графику первой производной от спектра отражения того или иного типа почвы, можно проследить за изменениями величины  $(I_2/I_1)_{n-p}$  при различных значениях  $k$ , т. е. при различном проективном покрытии.

**Обработка данных.** Как было показано нами ранее [7], уровень шумов, свойственный нашему спектрофотометру, позволяет использовать формулу Савицкого—Голай для вычисления производной

без предварительного сглаживания спектральных кривых. Использовалась формула с 9-точечным подвижным окном и аппроксимацией спектральной кривой полиномами второй степени [9].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерение спектров отражения листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла выявило зависимость формы спектра в области красного края ( $\lambda = 680\text{—}750$  нм) от содержания пигмента. На рис. 1, а показаны такие спектры. Видно, что кривизна спектральной кривой в этой области увеличивается с уменьшением содержания хлорофилла. В качестве количественного показателя формы спектральной кривой использовали отношение интенсивностей в двух основных максимумах графика первой производной ( $I_2/I_1$ ). Представленные на рис. 1, б данные демонстрируют четкую зависимость указанного отношения от содержания пигмента. Величину  $I_2/I_1$  и концентрацию хлорофилла удастся связать уравнением линейной регрессии и таким образом получить формулу для расчетов содержания пигмента по спектральным

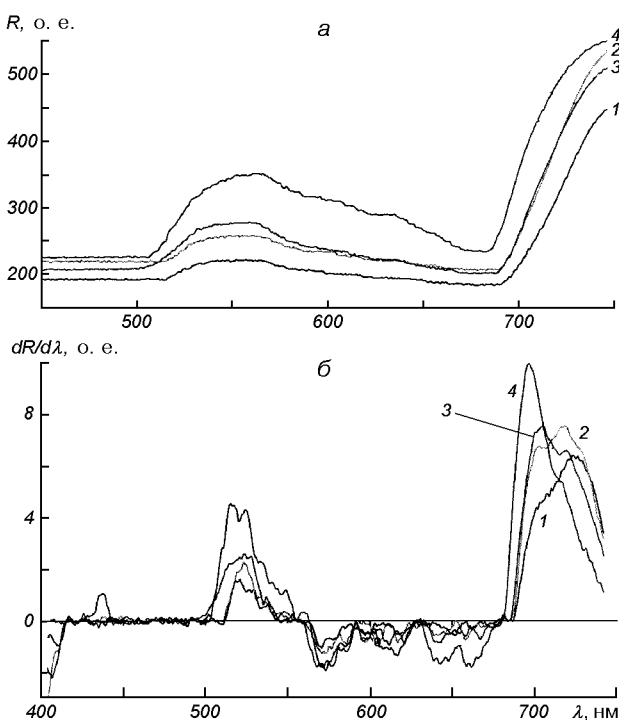


Рис. 1. Спектры отражения (а) и их первые производные (б) для листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла: 1, 2, 3 и 4 — концентрация хлорофилла 9.3; 6.6; 4.1 и 1.5 мг/дм<sup>2</sup> соответственно

характеристикам. Коэффициент корреляции равен 0.97.

Была проверена чувствительность  $I_2/I_1$  к вкладу отражения от почвы, которое вносит существенные искажения в спектр отражения растительности при измерениях несомкнутых посевов. Для проверки влияния отражения почвы на информативность предложенного спектрального показателя были проведены исследования на моделях с использованием в качестве подложки почв с наиболее сильным и наиболее слабым отражением, песка и чернозема соответственно. Такие измерения были проведены для листьев с высоким и низким содержанием пигмента. Значение изменений интенсивностей двух максимумов первой производной,  $I_2$  и  $I_1$ , а также их отношение, определенные с использованием различных моделей, показаны в табл. 1. Сравнение изменений величин  $I_2/I_1$  и коэффициента отражения в зеленом максимуме, R550 показано в табл. 2. Из табл. 1 следует, что снижение величины проективного покрытия вызывает уменьшение  $I_2$  и  $I_1$ , которое оказывается большим при использовании математической и графической моделей по сравнению с физической. Изменение отношения  $I_2/I_1$  практически одинаково при использовании всех моделей. Оно невелико, максимальное отличие не более 8 и 10 % в условиях 25 %-го проективного покрытия на светлой почве при высоком и низком содержании хлорофилла соответственно (табл. 2). Коэффициент отражения на длине волны  $\lambda = 550$  нм для случая проективного покрытия 25 % может изменяться и на 145 %, как это

Таблица 1. Влияние отражения почвы на форму графика первой производной от спектральной кривой отражения системы «почва — растительность»

Значение проективного покрытия, %	Модель	$I_1$	$I_2$	$K = I_2/I_1$	$K_{100}/K_n$
Темная почва, концентрация хлорофилла 6.8 мг/дм <sup>2</sup>					
100		5.18	6.37	1.23	1.00
50	физическая	4.57	5.48	1.20	1.02
	математическая	2.71	3.30	1.22	1.01
25	графическая	2.78	3.35	1.20	1.02
	математическая	1.47	1.77	1.20	1.02
	графическая	1.60	1.88	1.17	1.05
Светлая почва, концентрация хлорофилла 9.3 мг/дм <sup>2</sup>					
100		5.20	8.08	1.55	1.00
50	физическая	4.35	6.38	1.47	1.05
	математическая	2.77	4.17	1.50	1.03
25	графическая	2.80	4.15	1.48	1.05
	математическая	1.55	2.27	1.46	1.06
	графическая	1.53	2.21	1.43	1.08

Таблица 2. Сравнение влияния отражения почвы на различные спектральные характеристики системы «почва — растительность»

Значение проективного покрытия, %	$K = I_2/I_1$	$K_{100}/K_n$	$R_{550}, \%$	$R_{100}/R_n$
Темная почва, концентрация хлорофилла 6.8 мг/дм <sup>2</sup>				
100	1.23	1.00	10.3	1.00
50	1.20	1.02	8.8	1.17
25	1.17	1.05	6.9	1.49
Светлая почва, концентрация хлорофилла 9.3 мг/дм <sup>2</sup>				
100	1.55	1.00	10.3	1.00
50	1.48	1.05	14.0	0.73
25	1.43	1.08	17.9	0.57
Темная почва, концентрация хлорофилла 1.5 мг/дм <sup>2</sup>				
100	0.54	1.00	26.7	1.00
50	0.53	1.02	16.1	1.66
25	0.56	0.96	10.9	2.45
Светлая почва, концентрация хлорофилла 1.5 мг/дм <sup>2</sup>				
100	0.54	1.00	26.7	1.00
50	0.57	0.95	23.5	1.14
25	0.60	0.90	21.9	1.23

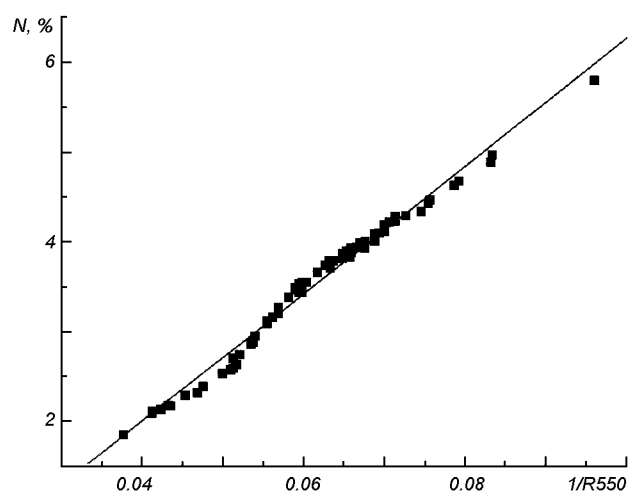


Рис. 2. Зависимость величины  $1/R_{550}$  от содержания общего азота в листьях озимой пшеницы, точки — эксперимент, сплошная линия — линейная аппроксимация

наблюдается для варианта с низким содержанием хлорофилла на фоне темной почвы. Для 50 %-го проективного покрытия изменения  $R_{550}$  составляют от 14 до 66 % в зависимости от содержания хлорофилла и типа почвы (табл. 2).

Таким образом, параметр, представляющий собой отношение интенсивностей двух основных максимумов на графике первой производной, оказывается устойчивым к вкладу отражения почвы и

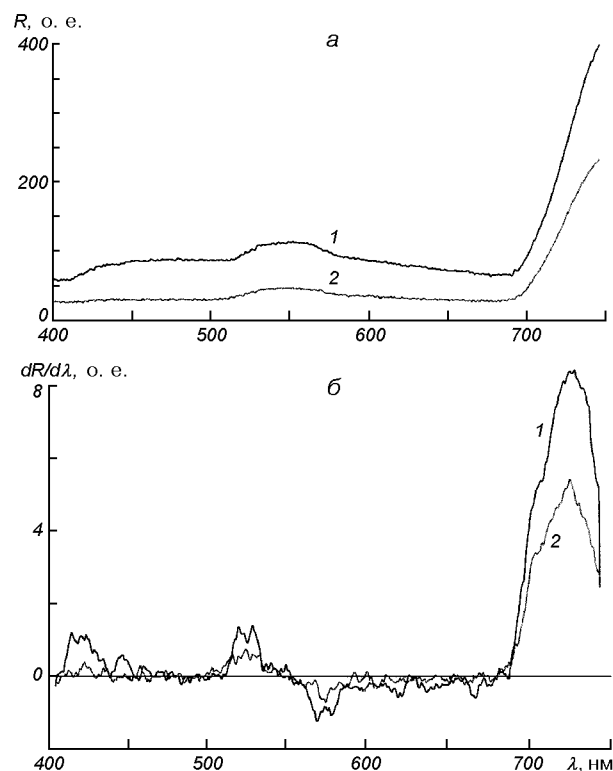


Рис. 3. Спектры (а) и их первые производные (б) для листьев с разным содержанием влаги: кривые 1 — исходные листья, 2 — пропитанных водой до 100 % влагоемкости

позволяет определять один из основных физиологических параметров растительности — содержание хлорофилла в системе «почва—растительность» — с точностью не хуже чем 10 % в условиях 25 %-го проективного покрытия на фоне любой почвы, независимо от содержания хлорофилла.

Коэффициент отражения  $R_{550}$  оказался чувствительным к содержанию общего азота в листьях. Эти параметры можно связать уравнением линейной регрессии

$$C_N = A/R_{550} - B.$$

Зависимость между содержанием общего азота и  $R_{550}$  показана на рис. 2. Коэффициент корреляции 0.93. Зависимость  $R_{550}$  от вклада отражения почвы делает эту формулу пригодной только для сомкнутых посевов. Для несомкнутых можно использовать установленную нами ранее [3] корреляционную связь между концентрациями хлорофилла и азота в листьях и использовать формулу для определения пигмента по отношению интенсивностей в максимумах графика первой производной. Эти результаты дают возможность оценки параметра, важного для тестирования состояния агроценозов, поскольку

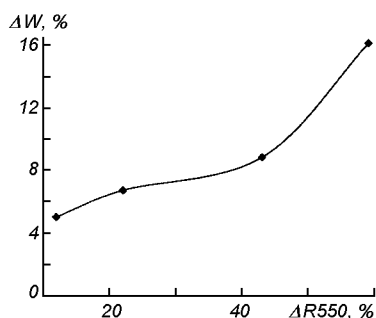


Рис. 4. Изменения коэффициента отражения при  $\lambda = 550$  нм в зависимости от изменений содержания влаги в листьях озимой пшеницы

обеспеченность азотным питанием непосредственно связана с урожайностью, по крайней мере для зерновых культур.

На рис. 3, а показаны спектры отражения листьев озимой пшеницы с различным содержанием влаги. Видно, что величина отражения влажного листа уменьшается во всем спектральном диапазоне. При этом форма спектральной кривой в области красного края спектра практически не изменяется. Это наглядно демонстрируют графики первой производной, показанные на рис. 3, б. Величина отношения интенсивностей в максимумах равна 1.56 и 1.60 для исходного листа и со 100 % влагоемкостью соответственно. При расчете концентрации хлорофилла по полученному уравнению регрессии такая разница отношений максимумов дает различие в 3 %. Масса листа в эксперименте, данные которого приведены на рис. 3, возросла на 16 % при увеличении влагоемкости до 100 %, а коэффициент R550 уменьшился при этом в 2.4 раза. Изменения R550 в зависимости от вариации содержания влаги в листьях озимой пшеницы показаны на рис. 4.

## ДИСКУССИЯ

Полученные результаты показывают, что количественный параметр формы спектральной кривой отражения листьев в области красного края ( $\lambda$  650–680 нм) является показателем, устойчивым к таким помехам, создаваемым объектом измерения как вклад отражения почвы в системе почва-растительность и вариациями влаги в листьях. Причем устойчивость наблюдается в широких пределах вариаций искажающих факторов, например, снижение проективного покрытия до 25 % на фоне сильно отражающей почвы и при низком содержании хлорофилла или повышении влагоемкости ли-

ста до 100 %. Если пользоваться широко распространенными в практике дистанционных измерений уравнениями, включающими коэффициенты яркости, то информация о содержании пигмента значительно искажается уже при проективном покрытии 50 % и значениях концентрации хлорофилла ниже 5 мг/дм<sup>2</sup>, в особенности на светлых почвах. Таким образом, свойство высокой устойчивости предлагаемого нового хлорофилльного индекса обеспечивает возможность его использования для оценки содержания пигмента при работе с практически любым типом системы почва-растительность и указывает на высокую эффективность этого параметра в отличие от коэффициентов яркости или их комбинаций. Следует также отметить, что указанный подход не выдвигает достаточно жестких требований к эталонам отражения и не нуждается в проведении калибровки по энергетическим параметрам отражения.

Величина коэффициентов отражения листьев, в частности в области зеленого максимума  $\lambda = 550$  нм, оказывается чувствительной к ряду параметров системы почва-растительность, таких как концентрация хлорофилла, влаги и общего азота в листьях, а также к величине проективного покрытия и отражательным характеристикам почвы. Первые два биохимических компонента уменьшают величину R550, третий ее увеличивает. Направленность и величина изменений R550 при неполном проективном покрытии зависит от отражательных характеристик почвы (табл. 2). Как показали наши исследования [3], основное определяющее влияние на величину R550 оказывает концентрация хлорофилла. Корреляционная связь между содержанием хлорофилла и общего азота [4], очевидно, является причиной того, что величина R550 чувствительна к содержанию азота в листьях. Можно также предположить, что связь между этими параметрами обусловлена не только вариациями содержания пигмента, но и спецификой рассеяния света на клеточных и иных компонентах структуры листовой ткани, на которые может влиять содержание азота. Чувствительность R550 к содержанию влаги можно отнести к проявлению влияния листовых структур на формирование сигнала отражения при  $\lambda = 550$  нм. Действительно, вода не имеет в этой области полос поглощения и уменьшение R550 при увеличении содержания влаги можно объяснить только за счет увеличения рассеяния на клеточных структурах при заполнении клеток водой.

Располагая двумя параметрами спектральной кривой отражения листьев, чувствительными к содержанию хлорофилла, один из которых устойчив к влиянию внешних факторов, а другой, напротив, очень чувствителен, можно попытаться разработать

методы оценки значений этих «помех», которые, в свою очередь, являются важными параметрами системы почва-растительность. В частности, представляется возможным оценивать величину проективного покрытия, сравнивая результаты определения содержания хлорофилла по  $I_2/I_1$  и R550. Аналогичным образом можно пытаться оценить уровень содержания влаги в листьях для сомкнутых посевов, т. е. при отсутствии помехи, создаваемой отражением почвы.

Полученные в работе результаты указывают на возможность разработки набора параметров на основе спектральной кривой отражения листьев в видимом диапазоне для тестирования основных физиологических характеристик для определения состояния фитоценозов. Это обстоятельство открывает возможность более простой приборной реализации системы дистанционного мониторинга состояния агроценозов, поскольку основные параметры для тестирования можно получить, используя не очень широкий спектральный диапазон, приблизительно от  $\lambda = 500$  до  $\lambda = 800$  нм, что легко реализуется в одном спектральном приборе.

1. Жумарь А. Ю. Исследования влияния параметров растительности на положение максимального наклона красного края // Исслед. Земли из космоса.—1990.— 4.—С. 15—20.
2. Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Количественный анализ формы спектральной кривой отражения листьев растений как способ тестирования их состояния // Физиология и биохимия культурных растений.—1988.— 20.—С. 535—539.
3. Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
4. Шадчина Т. М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. — Київ, Український фітосоціологічний центр, 2001.—219 с.
5. Arnon D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* // Plant Physiol.—1949.— 24.—P. 1—15.
6. Demetriodes-Shan T. H., Steven M. D., Clark J. A. High resolution derivative spectra in remote sensing // Rem. Sens.

Envir.—1993.—33.—P. 55—64.

7. Kochubey S. M., Biduk P. I. Novel Approach to Remote Sensing of Vegetation // Proc. of SPIE. Int. Conf. «AeroSense. Technologies and Systems for Defence Security», 21-25 April 2003, Orlando USA. — 5093.—P. 373—378.
8. Miller J. R., Hare E. W., Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance. 1. An inverted Gaussian reflectance model // Int. J. Rem. Sens.—1990.—11.—P. 1755—1773.
9. Savitzky A., Golay M. G. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // Analyt. Chem.—1964.—36.—P. 1627—1639.
10. Zarko-Tejada P. J., Miller J. R., Mohammed G. H., et al. Vegetation stress detection through chlorophyll a+b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery // J. Environ. Qual.—2002.—31.—P. 1433—1441.

---

#### ESTIMATION OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF AGRICULTURAL CROPS FROM REFLECTANCE SPECTRUM OF VEGETATION IN THE OPTICAL RANGE

S. M. Kochubei

Reflectance spectra of vegetation are shown to contain sufficient information for developing a set of parameters to control effectively a status of agricultural crops. Most of the parameters can be based on chlorophyll estimation or on the other characteristics depending on influence of inner structure of leaf tissue on the leaf reflection in the chlorophyll absorption range. A novel chlorophyll index based on a quantitative characteristic of the shape of reflectance spectral curve is proposed for chlorophyll content estimation in winter wheat leaves. The index is a ratio of intensities in two main maxima in the first derivative plot from reflectance spectrum curve in a range of 680—750 nm. The ratio correlates with chlorophyll content. Application of physical, graphic and mathematical models allowed us to test the stability of chlorophyll estimations by the proposed novel chlorophyll index in relation to contribution of soil reflectance. The ratio of two maxima in the first derivative plot is shown to be changed no more than 5 and 11 % when 50 and 25 % projective covering took place and dark soil or sand are used as a background. Coefficient of reflection at 550 nm correlates with chlorophyll and total nitrogen content, but it shows sensitivity to leaf moisture and to the contribution of soil reflection. Therefore, the combinatorial estimations of chlorophyll derived with quantitative parameter of the shape of reflectance spectral curve and coefficient of reflection at 550 nm give the possibility to estimate the value of projective covering for dense sowing or to estimate moisture for undense sowing.