

УДК 581.133.12:528.88.042.3+577.342:535.361.2

**Сравнение информативных возможностей  
многозональной съемки и спектроскопии  
высокой разрешающей способности  
при дистанционном зондировании  
растительного покрова**

**С. М. Кочубей**

Институт фізіології рослин і генетики НАН України, Київ

*Надійшла до редакції 02.11.98*

---

Імітаційні моделі використані для дослідження спотворень, що вносяться в кінцевий результат при оцінюванні вмісту хлорофілу в листках за спектральними кривими відбивання. Використовуючи спектральні криві відбивання листка гарбуза, записані на лабораторному спектрометрі з високим спектральним розділенням, імітовано роботу мультиспектрального радіометра. Досліджено вплив варіації параметрів вимірюваного об'єкта та інструментальних. Серед перших — проективне покриття, концентрацію хлорофілу у листку, відбивальні характеристики ґрунту, серед інших — півширину, інтенсивність пропускання у максимумі і форму контура пропускання смугових світлофільтрів, що виділяють спектральні інтервали зондування, рівень високочастотних шумів. Ці результати порівняли з тими, які були отримані на приладі з високим спектральним розділенням. Показано, що спотворення шуканої величини концентрації хлорофілу в умовах неповного проективного покриття менше при використанні спектрометра з високим спектральним розділенням. Відхилення від значень, отриманих хімічним методом, залежать також від концентрації хлорофілу у об'єкті і відбивальних характеристик ґрунту. Результати, отримані в моді мультиспектрального радіометра, стійкіші до впливу високочастотних шумів.

---

Основной задачей дистанционного зондирования агроценозов является оценка их состояния. При этом пытаются определить содержание хлорофилла, общего азота и воды в листьях, изреженность посева, равномерность созревания, а также получить прогноз урожая. Результаты собственных разработок, а также анализ многочисленных литературных данных позволяет заключить, что практически все указанные выше параметры, кроме содержания воды, можно получить на основании измерений содержания хлорофилла. Зависимость между последним параметром и урожаем более

© С. М. КОЧУБЕЙ, 1999

сложна, хотя, несомненно, он является одним из определяющих.

Дистанционные методы оценки содержания хлорофилла в листьях основаны на особенностях их спектров отражения [1]. Поэтому для этой цели используется спектральная аппаратура различных модификаций. Две основные разновидности — это так называемые мультиспектральные приборы и появившиеся сравнительно недавно спектрометры с высоким спектральным разрешением. Мультиспектральные сканеры регистрируют распределение яркости на исследуемом участке земной поверхности

в определенных спектральных интервалах. Их полуширина, как правило, составляет  $\Delta\lambda = 50$  нм и более. Мультиспектральные радиометры фиксируют суммарную энергию светового потока, отраженного от поверхности, попадающей в поле зрения прибора, в течение единичного измерения в достаточно широких спектральных интервалах. Спектрометры высокого спектрального разрешения работают как радиометры, регистрируя энергию в спектральных интервалах 1—10 нм.

Характер воспринимаемой информации различается для мультиспектральных сканеров, радиометров и спектро радиометров с высоким спектральным разрешением. Для первых это распределение яркости по поверхности зондируемой площадки, для второго и третьего — распределение яркости по спектру в суммарном световом потоке, отраженном от определенной площадки. В последнее время интенсивно разрабатываются устройства, которые могут давать информацию обоих типов. Это аппаратура так называемой изображающей спектроскопии (imaging spectroscopy) [6]. Ее основу составляют сложные оптические и электронные системы, построенные из двух или более спектрометров, которые эксплуатируются в двух режимах: высоко го пространственного разрешения при использовании восьми или более относительно узких спектральных каналов,  $\Delta\lambda = 6$ —10 нм, либо в режиме высокого спектрального разрешения при зондировании отдельных пространственных участков размером в несколько десятков метров [8]. Поэтому по сути эти системы представляют собой совокупность мультиспектрального сканера и спектрометра высокого спектрального разрешения. Особенности восприятия информации для них такие же, как для отдельных приборов указанных номинаций.

При работе спектро радиометра или сканера с небольшим пространственным разрешением в поле зрения зондирующего прибора могут попадать участки, только частично покрытые растительностью, так что вклад почвы может быть достаточно высоким. В этом случае воспринимаемый аппаратурой сигнал будет формироваться в результате участия световых потоков, отраженных от поверхностей разных типов, с разными весовыми коэффициентами. Причем объекты, дающие вклад в отражение могут существенно отличаться как по величине, так и по спектральному распределению коэффициентов отражения. В связи с этим возникает необходимость проанализировать устойчивость расчетных формул, по которым оценивают содержание хлорофилла в листьях, к помехам, вызываемым гетерогенностью отражательных характеристик поверхности, попадающей в поле зрения прибора. Такой

анализ для двух классов аппаратуры — мультиспектральных радиометров и спектрометров с высокой разрешающей способностью — проведен ниже. Проанализировано также влияние некоторых инструментальных параметров приборов обоих классов на точность результатов.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спектры отражения измерялись на спектрофотометре СФ-18 с интегрирующей сферой. Для измерений использовались крупные листья тыквы, которые могли закрыть всю площадь измерительной кюветы. Листья с различным содержанием хлорофилла помещались на подложке из светлой или темной почвы. При этом лист заполнял либо всю поверхность измерительной кюветы, либо покрывал только часть ее площади — 75, 50, 25 или 12.5 %. Записывались также спектры отражения указанных подложек. Полученные записи оцифровывались с шагом 1 нм. Цифровые массивы использовались для расчетов концентрации хлорофилла и моделирования влияния инструментальных параметров. После измерений определялась концентрация хлорофилла в каждом листе химическим методом. Для этого хлорофилл экстрагировался из высечек стандартного размера и проводились спектрофотометрические измерения, как описано ранее [5].

Вегетационный индекс — параметр, с помощью которого оценивают уровень хлорофилла при использовании мультиспектральных оптических сенсоров — вычислялся по формуле нормализованной разности [7]:

$$V = R_{\text{дк}} - R_{\text{к}} / R_{\text{дк}} + R_{\text{к}},$$

где  $R_{\text{дк}}$  и  $R_{\text{к}}$  — коэффициент отражения в далекой красной и красной областях соответственно. Вычисление величин  $R$ , имитирующих величины отражения, которые измеряются мультиспектральным оптическим сенсором, проводились по формуле  $R = \int R(\lambda) f(\lambda) d\lambda$ , где  $R(\lambda)$  — спектр отражения измеряемого объекта,  $f(\lambda)$  — контур пропускания оптического сенсора, который имитировался распределением гауссовской или прямоугольной формы. Программа расчета на ПЭВМ позволяла производить вычисления  $R$  для различного положения максимума  $f(\lambda)$  в шкале длин волн, различной полуширины и интенсивности в максимуме. Для контура гауссовского типа интегрирование проводилось в пределах, соответствующих захвату 95 % площади под контуром, т. е. в спектральном интервале, соответствующем двойной полуширине контура. Имитацию высокочастотных шумов, которые характерны

для современных фотоприемников, проводили путем наложения на экспериментально измеренный контур функции генератора случайных чисел с определенным коэффициентом. Для каждого уровня шумов вычисляли 20 числовых массивов с наложением шумов, которые использовались для расчетов среднего значения и величины погрешности параметра, определяемого по данному числовому массиву. За нулевой уровень шумов была взята его величина в экспериментально измеренных кривых, которая составляла не более 0.6 % целой шкалы.

Расчеты концентрации хлорофилла в листьях с использованием спектральной кривой отражения и графика первой производной этой кривой проводились по методу [1, 3].

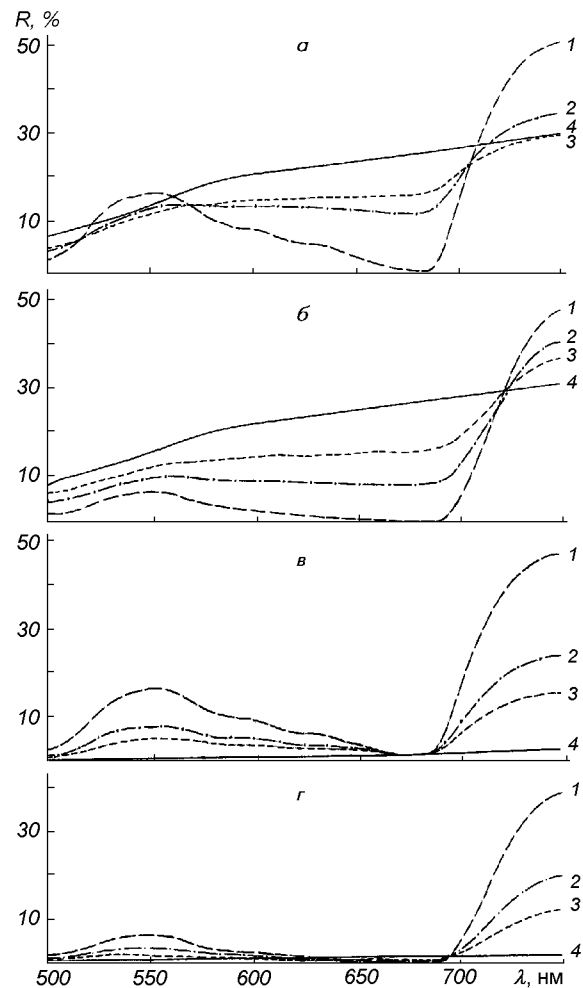
## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке показаны спектры отражения листьев с разным содержанием хлорофилла на фоне светлой почвы (*a, б*) при различном проективном покрытии  $P$ . Изменения спектральных кривых при неполном проективном покрытии, которые максимальны в экстремумах, обусловлены суперпозицией отраженных потоков от обоих компонентов гетерогенной оптической системы. Характер изменений несколько различается в зависимости от концентрации хлорофилла в листе. Форма спектра зависит также от отражающих свойств грунта (*в, г*).

Рассмотрим влияние концентрации хлорофилла в листе, проективного покрытия и отражательных свойств грунта на величину вегетационного индекса, который измеряется мультиспектральным прибором, а также влияние инструментальных параметров такого прибора: полуширины контура пропускания и его формы, интенсивности в максимуме, асимметрии указанных параметров для двух выбранных спектральных интервалов, необходимых для реализации формулы нормированной разности, уровня высокочастотных шумов.

### ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПОЧВА—РАСТИТЕЛЬНОСТЬ НА ЗНАЧЕНИЯ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА

**Влияние проективного покрытия.** В табл. 1, *A* приведены значения  $V$  для спектральных кривых отражения от светло-зеленого и темно-зеленого листков с содержанием хлорофилла 1.94 и 5.04 мг/дм<sup>2</sup> и разным проективным покрытием  $P$ . Полуширина  $\Delta\lambda$  и пропускание в максимуме фильтрующего контура одинаковы для всех пар фильт-



Спектры отражения листа с содержанием хлорофилла 1.94 мг/дм<sup>2</sup> (*a, в*) и 5.04 (*б, г*) на фоне светлой (*a, б*) и темной (*в, г*) почвы. 1, 2, 3, 4 — проективное покрытие  $P = 100, 50, 25, 0$  % соответственно

ров, положение одного из максимумов выбрано близким к характеристическим точкам пересечения спектральных кривых отражения листьев и грунта (рисунок, *a, б*). Видно, что уменьшение проективного покрытия значительно уменьшает величину вегетационного индекса, причем снижение тем больше, чем меньше содержание хлорофилла в листе. Так, для светло-зеленого листа уменьшение проективного покрытия на 25 % приводит к уменьшению  $V$  на 34 %, в то время как для темно-зеленого листа — на 21 %. Изменения  $V$  минимальны для выбранных пар фильтров, так как  $R_{\text{дк}}$  измеряется в области точки пересечения спектров, и поэтому изменяется слабо в широком диапазоне значений проективного покрытия, а  $R_{\text{к}}$  соответствует спектральному минимуму, где крутизна спект-

Таблица 1. Влияние величины проективного покрытия для разных типов грунта и содержания хлорофилла в листе на расчетную величину вегетационного индекса (светлый и темный лист соответствуют 1.94 и 5.04 мг/дм<sup>2</sup> хлорофилла)

Проек- тивное покры- тие, %	Красный макс.		Пропу- скание, %	Далекий крас- ный макс.		Про- пускание, %	V	ΔV, %	Проек- тивное покры- тие, %	Красный макс.		Пропу- скание, %	Далекий крас- ный макс.		Про- пускание, %	V	ΔV, %
	λ, нм	Δλ, нм		λ, нм	Δλ, нм					λ, нм	Δλ, нм						
<b>А. Светло-зеленый лист, почва светлая</b>																	
100	680	3	100	707	3	100	0.399	100	100	680	3	100	740	3	100	0.576	
		30			30		0.378	94			10			10		0.574	
75		3			3		0.263	66			30			30		0.498	
		30			30		0.247	62			3			10		0.900	
50		3			3		0.132	33			3			30		0.961	
		30			30		0.131	33			10			3		-0.163	
25		3			3		0.083	21			10			30		0.814	
		30			30		0.079	20			30			3		-0.639	
12.5		3			3		0.052	13			30			10		0.061	
		30			30		0.046	11									
<b>Темно-зеленый лист, почва светлая</b>																	
100	680	3	100	724	3	100	0.474	100	100	680	3	100	715	3	100	0.367	
		30			30		0.265	56			10			10		0.371	
75		3			3		0.374	79			30			30		0.376	
		30			30		0.368	77			3			10		0.836	
50		3			3		0.288	60			3			30		0.946	
		30			30		0.277	58			10			3		-0.408	
25		3			3		0.177	38			10			30		0.750	
		30			30		0.165	34			30			3		-0.766	
12.5		3			3		0.082	17			30			10		-0.185	
		30			30		0.084	17									
<b>Б. Темно-зеленый лист, почва светлая</b>																	
100	680	3	100	724	3	100	0.474	100	100	680	3	100	715	3	100	0.482	
		30			30		0.378	85			80			80		0.482	
75		3			3		0.374	79			50			50		0.482	
		30			30		0.288	60			100			80		0.392	
50		3			3		0.288	60			100			50		0.178	
		30			30		0.177	38			80			100		0.563	
25		3			3		0.177	38			80			50		0.283	
		30			30		0.082	17			50			100		0.703	
<b>Темно-зеленый лист, почва темная</b>																	
100	680	3	100	724	3	100	0.443	100	100	680	3	100	715	3	100	0.642	
		30			30		0.378	85			50			80		0.642	
75		3			3		0.378	85			50			80		0.642	
		30			30		0.258	58			80			80		0.371	
50		3			3		0.258	58			80			80		0.371	
		30			30		0.160	36			50			50		0.371	
25		3			3		0.160	36			50			50		0.371	
		30			30		0.102	23			100			80		0.271	
<b>Светло-зеленый лист, почва светлая</b>																	
100	680	3	100	707	3	100	0.399	100	100	680	3	100	715	3	100	0.371	
		30			30		0.263	66			100			100		0.463	
75		3			3		0.263	66			80			100		0.463	
		30			30		0.132	33			80			50		0.153	
50		3			3		0.132	33			80			50		0.153	
		30			30		0.083	21			50			100		0.627	
25		3			3		0.083	21			50			100		0.627	
		30			30		0.052	13			50			80		0.554	
<b>Светло-зеленый лист, почва темная</b>																	
100	680	3	100	707	3	100	0.395	100	100	680	3	100	715	3	100	0.487	
		30			30		0.346	87			30			30		0.462	
75		3			3		0.346	87			30			30		0.462	
		30			30		0.242	61			3		740	3		0.576	
50		3			3		0.242	61			30			30		0.498	
		30			30		0.166	42			30			30		0.498	
25		3			3		0.166	42			30			30		0.498	
		30			30		0.114	29			30			30		0.498	
12.5		3			3		0.114	29			30			30		0.498	
<b>Светло-зеленый лист, почва светлая, контур гауссовский</b>																	
100	680	3	100	707	3	100	0.395	100	100	680	3	100	715	3	100	0.487	
		30			30		0.346	87			30			30		0.462	
75		3			3		0.346	87			30			30		0.462	
		30			30		0.242	61			3		740	3		0.576	
50		3			3		0.242	61			30			30		0.498	
		30			30		0.166	42			30			30		0.498	
25		3			3		0.166	42			30			30		0.498	
		30			30		0.114	29			30			30		0.498	
12.5		3			3		0.114	29			30			30		0.498	
<b>Светло-зеленый лист, почва светлая, контур прямоугольный</b>																	
100	680	3	100	715	3	100	0.487		100	680	3	100	715	3	100	0.483	
		10			10		0.482				30			30		0.446	
		30			30		0.462				3		740	3		0.574	
		3			3		0.873				30			30		0.464	
		30			30		0.957				30			30		0.464	
		10			10		-0.281				30			30		0.464	
		30			30		0.797				30			30		0.464	
		10			10		-0.281				30			30		0.464	
		30			30		0.797				30			30		0.464	
		10			10		-0.281				30			30		0.464	
		30			30		0.797				30			30		0.464	
		10			10		-0.066				30			30		0.464	

ральной кривой наименьшая. Как видно из рисунков *a*, *б*, при уменьшении проективного покрытия увеличивается отражение в минимуме ( $\lambda = 680$  нм) за счет вклада отражения грунта, что обуславливает снижение  $V$ , причем большее для светло-зеленого листа, поскольку искажающий эффект в этом случае сильнее. Для темно-зеленого листа понижение  $V$  при уменьшении проективного покрытия меньше так как искажения в минимуме более слабые (рисунок, *б*).

Увеличение полуширины фильтрующего контура вызывает снижение величины  $V$ , которое более существенно для темно-зеленого листа. Причиной этого является захват при измерении  $R_{\text{дк}}$  частей спектральных кривых, которые удаляются от точки пересечения тем больше, чем больше полуширина фильтра. Вклад этих участков в величину сигнала тем сильнее, чем больше крутизна спектральной кривой, что видно, например, при сравнении темных и светлых листьев. Из проведенного исследования следует, что измерения и расчеты вегетационного индекса для площадей с неполным проективным покрытием не могут быть использованы для оценки концентрации хлорофилла в листьях по уравнениям регрессии, рассчитанным по показателям, которые измерялись на системах с полным проективным покрытием. Метод имитационных моделей позволяет разработать новый подход к калибровке мультиспектральных приборов со светофильтрами для получения уравнений регрессии с учетом проективного покрытия и характеристик отражения почвы.

**Влияние отражательных способностей грунта** на величину вегетационного индекса при различных величинах проективного покрытия иллюстрируется данными табл. 1, *Б*. Уменьшение вегетационного индекса при уменьшении проективного покрытия тем сильнее, чем выше отражение грунта и меньше содержание хлорофилла в листьях. Для всех объектов заметные отличия от варианта с полным проективным покрытием обнаруживаются уже при проективном покрытии 75 %.

#### **ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА**

Как указывалось выше, величина вегетационного индекса, рассчитываемая по уравнению нормированной разности, зависит от полуширины выделяющих светофильтров (табл. 1, *А*). Еще более сильные вариации этой величины наблюдаются в случае использования выделяющих светофильтров с раз-

личной полушириной спектрального контура (табл. 1, *В*). Эти различия обусловлены особенностями формы спектральной кривой в области, выделяемой светофильтром (рисунок *a*, *б*).

Из данных табл. 1, *Г* можно сделать заключение о влиянии коэффициента пропускания в максимуме светофильтра на результаты расчета вегетационного индекса. Эта величина получается существенно различной, в том случае, если пропускание в максимуме неодинаково, и зависит также от того, в каком положении, соответствующем  $R_{\text{к}}$  или  $R_{\text{дк}}$ , находится светофильтр с меньшим значением пропускания.

Фильтрующие контуры двух типов, примененные в данной работе, гауссовский и прямоугольный, почти одинаково влияют на величину вегетационного индекса при различной крутизне участков спектральной кривой (табл. 1, *Д*). Следует, однако, отметить, что использование фильтра прямоугольной формы дает чуть более низкие значения  $V$ , чем в случае гауссовской формы. В особенности это заметно при больших значениях полуширины контура пропускания ( $\Delta\lambda = 30$  нм) и большей крутизне спектральной кривой. Причиной является обстоятельство, что прямоугольный фильтр имеет одинаковую ширину по всем уровням пропускания от 0 до 100 %, а фильтр гауссовской формы — изменяющуюся. Более узкий около верхнего уровня пропускания он расширяется, асимптотически приближаясь к нулевому уровню. При этом использование 95 %-го значения площади под контуром задает границу крыльев, соответствующую двойной полуширине, что приводит к увеличению участка спектральной кривой, который захватывается прибором.

Результаты анализа влияния уровня высокочастотных шумов на значение вегетационного индекса для различных величин полуширины фильтрующего контура на участках спектральной кривой различной крутизны представлены в табл. 2. Видно, что высокочастотные шумы слабо влияют на измеряемую величину вегетационного индекса вплоть до значений 50 %. Последний уровень вносит значительные искажения при узкой щели на участке спектральной кривой с большой крутизной ( $\lambda = 715$  нм). В этом случае значение величины  $V$  отличается от такового для нулевого уровня шума на 39 %. Во всех остальных случаях величина такого отклонения находится в диапазоне 2—7 %. Для мультиспектральных приборов с полушириной фильтрующего контура более 30 нм высокочастотный шум с уровнем не более 50 % не приводит к существенным искажениям величины вегетационного индекса.

Таблица 2. Влияние уровня высокочастотных шумов на расчетную величину вегетационного индекса V (светло-зеленый лист, почва светлая, проективное покрытие 100 %)

Уровень шума, %	Красный максимум		Далекий красный максимум		V
	$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм	$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм	
0	680	3	715	3	0.487±0.000
5		3	715	3	0.497±0.003
10		3	715	3	0.488±0.006
20		3	715	3	0.497±0.026
50		3	715	3	0.299±0.135
0		30	715	30	0.462±0.000
5		30	715	30	0.460±0.004
10		30	715	30	0.462±0.004
20		30	715	30	0.493±0.033
50		30	715	30	0.479±0.023
0		3	740	3	0.576±0.000
5		3	740	3	0.571±0.004
10		3	740	3	0.574±0.002
20		3	740	3	0.559±0.011
50		3	740	3	0.570±0.092
0		30	740	30	0.498±0.000
5		30	740	30	0.496±0.002
10		30	740	30	0.499±0.002
20		30	740	30	0.491±0.007
50		30	740	30	0.531±0.017

Таблица 3. Значения концентрации хлорофилла в листе, полученные спектральным методом при измерении объектов с различным проективным покрытием

Проективное покрытие, %	Положение максимумов в графике первой производной		Концентрация хлорофилла		$\Delta$ , %
	$\lambda_1$ , нм	$\lambda_2$ , нм	$C_{\text{хл}}$ , мг/дм <sup>2</sup>	$\Delta_{\text{р-х}}$ , абс. ед.	
Светло-зеленый лист*, светлая почва					
100	701	723	1.89	-0.05	100
75	704	723	2.01	0.07	106
50	700	724	2.48	0.54	131
25	699	721	3.18	1.24	163
12.5	696	724	3.04	1.10	160
Темно-зеленый лист*, светлая почва					
100	705	727	5.57	0.54	100
75	708	727	4.34	-0.70	78
50	713	728	4.43	-0.61	78
25	713	721	6.91	1.87	123
12.5	711	715	6.71	1.67	124
Темно-зеленый лист, темная почва					
100	710	720	4.89	-0.16	3
75	710	723	5.43	0.39	7
50	713	720	5.95	0.91	18
25	709	720	5.14	0.10	2
12.5 %	704	721	6.50	1.48	29

$\Delta_{\text{р-х}}$  — разница между значениями  $C_{\text{хл}}$  и химическим методом,  $\Delta$  — изменение по отношению к величине, полученной при полном проективном покрытии

#### ПРИБОР С ВЫСОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Рассмотрим влияние тех же характеристик объекта, что и для мультиспектрального прибора — концентрация хлорофилла в листе, проективное покрытие и отражательные свойства грунта — на результат измерения содержания хлорофилла в листе (табл. 3—5). Инструментальные параметры, которые могут оказать влияние — это уровень высокочастотных шумов, спектральное разрешение и алгоритм расчета концентрации хлорофилла.

Данные табл. 3 соответствуют инструментальному уровню шумов, который выбран в данной работе за условный нулевой. Содержание хлорофилла в случае самых неблагоприятных условий измерения (лист с низким содержанием пигмента на фоне грунта с высоким отражением) определяется с ошибкой около 60 % для проективного покрытия 25 и 12.5 %. Для мультиспектрального прибора она составляет 87—89 % (табл. 1, А). Для листа с высоким содержанием хлорофилла ошибка определения не превышает 25 % для самых низких значений проективного покрытия на сильно отражающем грунте. Такого же порядка ошибка наблюдает-

ся для более слабо отражающего грунта при низких значениях проективного покрытия. Следует отметить, что точность определения зависит от точности выделения максимумов для тестирования в графике первой производной. Суперпозиция спектра отражения листьев со спектрами отражения грунтов различных типов приводит к размыванию и сдвигу максимумов.

Результаты исследования влияния уровня высокочастотных шумов на определение содержания хлорофилла в листьях приведены в табл. 4. Видно, что использованный метод очень чувствителен к уровню высокочастотных шумов в записях спектральной кривой отражения. Для низких концентраций пигмента уровень шума, превышающий значение 0.5 %, ведет к отклонениям от варианта с нулевым уровнем шума более чем на 30 %. Для высоких концентраций пигмента 5 %-й уровень вызывает приблизительно 20 %-е отклонение. Эти отклонения вызываются главным образом изменениями положения максимумов в графике производной.

Таблица 4. Влияние уровня высокочастотных шумов на расчетные значения содержания хлорофилла (проективное покрытие 100%)

Уровень шума	Положение максимумов в графике первой производной		Концентрация хлорофилла		$\Delta$ , %
	$\lambda_1$ , нм	$\lambda_2$ , нм	$C_{\text{хл}}$ , мг/дм <sup>2</sup>	$\Delta_{\text{р-х}}$ , аб. ед.	
Светло-зеленый лист, почва светлая					
0 %	701.0±0.0	723.0±0.0	1.89±0.00	0.00	100
0.5 %	701.1±0.1	725.2±1.0	2.08±0.10	0.19	110
1.0 %	701.0±0.1	726.5±0.7	2.72±0.28	0.83	144
2.5 %	698.8±0.4	728.1±0.6	2.59±0.54	0.70	137
5.0 %	699.8±0.8	723.8±0.6	3.99±0.98	1.10	211
Темно-зеленый лист, почва светлая					
0 %	705.0±0.0	727.0±0.0	5.57±0.00	0.00	100
0.5 %	705.3±0.2	726.4±0.6	5.52±0.11	-0.05	99
1.0 %	704.9±0.1	725.0±0.7	5.69±0.24	0.12	102
2.5 %	704.8±0.4	724.0±0.3	6.49±0.60	0.92	116
5.0 %	705.5±0.3	725.3±0.5	6.78±0.67	1.21	123
Темно-зеленый лист, почва темная					
0 %	710.0±0.0	720.0±0.0	4.89±0.00	0.00	100
0.5 %	710.5±0.5	721.7±0.3	4.77±0.10	-0.12	98
1.0 %	711.9±0.3	721.3±0.5	4.74±0.39	-0.15	97
2.5 %	709.8±1.0	722.0±0.3	4.47±1.05	-0.52	91
5.0 %	711.4±0.4	725.3±0.4	5.72±0.97	0.68	117

На примере спектральной кривой отражения листа с низким содержанием хлорофилла на фоне сильно отражающего грунта при 100 %-м проективном покрытии смоделированы спектры отражения, соответствующие измерениям с меньшей величиной спектрального разрешения  $\Delta\lambda = 2$  и 3 нм. Результаты исследования влияния этого параметра, а также разных процедур вычисления первой производной на расчетную величину содержания хлорофилла показаны в табл. 5. При уменьшении спектрального разрешения увеличиваются отклонения от величины содержания хлорофилла, измеренной химическим методом (строчки 1, 2). Это отклонение, очевидно, обусловлено уменьшением объема информации за счет сокращения количества значений в числовом массиве, описывающем спектральную кривую отражения (при уменьшении спектрального разрешения увеличивается шаг считывания информации) [2]. Подтверждением этого предположения является уменьшение величины отклонения для расчетов с исключением процедуры сглаживания (строчки 4, 5). Последняя уменьшает объем информации за счет частичного смешивания значений для соседних отсчетов на сглаживаемых участках. Увеличение точности определения в про-

Таблица 5. Расчет содержания хлорофилла в листе по спектрам отражения с различным спектральным разрешением и различными алгоритмами обработки данных (концентрация, определенная химическим методом, равна 1.94 мг/дм<sup>2</sup>)

$\Delta\lambda$ , нм	Положение максимумов в графике первой производной		Концентрация хлорофилла*		$\Delta$ , %
	$\lambda_1$ , нм	$\lambda_2$ , нм	$C_{\text{хл}}$ , мг/дм <sup>2</sup>	$\Delta_{\text{р-х}}$ , аб. ед.	
1	701	723	1.89	0.00	100
2	700	720	2.47	0.58	131
2	702	720	2.36	0.47	125
2	702	720	2.22	0.33	117
2	702	722	2.19	0.30	116
3	701	722	1.91	0.02	100

Строчки 1, 2 — предварительное скользящее сглаживание по 5 точкам, вычисление производной при аппроксимации полиномами второй степени по 5 точкам; 3 — сглаживание то же, вычисление производной при аппроксимации полиномами третьей степени по 5 точкам; 4 — без сглаживания, полином второй степени по 5 точкам; 5, 6 — без сглаживания, полином третьей степени по 5 точкам;  $\Delta$  — отклонения от результата, полученного при спектральном разрешении 1 нм

цедурах без сглаживания указывает на то, что основной помехой является не уровень шумов, а недостаточный объем информации. Сравнение результатов при использовании для вычислений полиномов второй и третьей степени показывает, что при разрешении 2 нм и сглаживании немного лучший результат дает применение полинома третьей степени. При исключении сглаживания величина отклонения от варианта с высоким разрешением (1 нм) практически одинакова для обоих способов вычисления. В этом случае различия частотных характеристик числовых фильтров, описываемых полиномами второй и третьей степени [4], не оказывает влияния на результаты. Уменьшение разрешения до 3 нм вызывает дальнейшее снижение точности при использовании полиномов второй степени (результаты не показаны). Применение полинома третьей степени позволяет существенно улучшить результат. Из этого следует, что в случае использования числового массива, размер которого не обеспечивает достаточную точность аппроксимации спектрального контура, эффективнее работает более высокочастотный числовой фильтр, каковым является полином третьей степени. Повышение эффективности, возможно, обусловлено более точной настройкой на максимум первой производной.

Проведенный анализ позволяет сделать ряд важных заключений. Точность измерений содержания хлорофилла мультиспектральными приборами мо-

жет быть существенно повышена за счет подбора параметров прибора. Дальнейшее повышение точности, в особенности при зондировании оптически гетерогенных объектов, может быть достигнуто путем введения поправок на отражение почвы, метод вычисления которых может быть основан на использовании имитационных моделей.

Информация, получаемая с помощью спектрометров с высокой разрешающей способностью, более устойчива к помехам, вносимым оптической гетерогенностью объекта измерения, но более чувствительна к уровню высокочастотных шумов.

Пользуясь результатами настоящей работы, можно выбирать аппаратуру, адекватную поставленной задаче. Для систем «изображающей» спектроскопии оказывается возможным выбирать режим эксплуатации аппаратуры, позволяющий достигнуть максимального эффекта.

1. Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
2. Коробков М. Е., Кочубей С. М. Метод оценки величины шага при дифференцировании спектральных кривых с помощью ЭЦВМ // Журн. прикл. спектр.—1975.—22, вып. 6.—С. 1093—1097.
3. Кочубей С. М., Шадчина Т. М. Спосіб дистанційного визначення вмісту хлорофілу в листках монокультури рослин // Патент на винахід № 10370 від 25.12.96.
4. Сураев В. Ф., Кочубей С. М. О точности цифрового дифференцирования экспериментально измеренных спектральных контуров // Журн. прикл. спектр.—1985.—42, вып. 4б.—С. 627—631.
5. Шевченко О. В., Кочубей С. М. Изменения структурной организации пигментного аппарата листьев озимой пшени-

цы в различные фазы вегетации // Физиология растений.—1993.—40, № 5.—С. 749—753.

6. Goetz A. F. High resolution imaging spectrometer (HIRIS): Science and instrument // Int. J. Imaging Systems and Technology.—1991.—3.—P. 131—143.
7. Hinzman L. D., Bauer V. E., Daughtry C. S. T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat // Rem. Sens. Environ.—1986.—19, N 1.—P. 47—61.
8. Miller J. R., Hare E. W. Imaging spectrometry as a tool for botanical mapping // Proc. Int. Soc. Opt. Eng.: Vol. 834. Imaging Spectroscopy II / Ed. G. Vane, 20—21 August 1987, San Diego, 1987.—P. 108—113.

---

#### COMPARISON OF THE INFORMATION POWER OF MULTISPECTRAL IMAGING AND HIGH-RESOLUTION SPECTROSCOPY IN THE REMOTE SOUNDING OF VEGETATION COVER

S. M. Kochubei

Imitation models were used to study the distortions in the chlorophyll content estimates calculated from reflectance spectra of pumpkin leaves depending on some optical parameters of measured sample and parameters of spectral device: projective cover, soil reflectance, the level of chlorophyll concentration in leaves, light filter characteristics (half-width, passband profile, intensity at maximum, signal-to-noise ratio). These results were compared to those obtained with spectrometers with high spectral resolution. The accuracy of chlorophyll estimates with multispectral devices is shown to be very sensitive to optical heterogeneity of objects and tolerant to the level of high frequency noises. The information obtained with spectrometers of high spectral resolution is sensitive to noise level, spectral resolution, and algorithm of data treatment. The deviations of calculated chlorophyll concentrations from those determined by the chemical method depend on projective cover, soil reflectance, and chlorophyll concentration in measured leaves.