

581.133.1:535.361.2

**В. А. Яценко¹, С. М. Кочубей², П. А. Хандрига³,
В. В. Донец⁴, О. В. Семенов¹**

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, Київ

²Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, Київ

³Інститут прикладного системного аналізу НТУУ «Київський політехнічний інститут», Київ

⁴Казенне підприємство Центральне конструкторське бюро «Арсенал», Київ

Новый метод дистанционного оценивания содержания хлорофилла в растительности и его программно-аппаратная реализация

Надійшла до редакції 26.10.06

Розглянуто проблему дистанційного оцінювання вмісту хлорофілу у рослинності за спектром відбивання для моніторингу її стану. Пропонується метод рішення проблеми на основі головних компонентів і нелінійних моделей регресії. Розроблено програмно-апаратний комплекс, що не вимагає обчислення перших похідних.

ВСТУПЛЕНИЕ

Проблема риска в связи с постоянно ухудшающейся экологической обстановкой является одной из основных в программе обеспечения безопасности существования человеческого общества. В ее решении важную роль играют системы мониторинга различных компонентов окружающей среды с целью наблюдения эволюции деградационных процессов в природе, а также обнаружения эксцессов в связи аварийными ситуациями техногенного происхождения или природными аномалиями. К числу задач мониторинга можно отнести следующие: а) выявление и прогнозирование эволюции состояния различных участков суши; б) раннее обнаружение экологических стрессов; в) контроль состояния техногенных объектов повышенной опасности и г) контроль хозяйственных социально важных объектов, например сельскохозяйственных угодий и лесов. Для решения таких задач наиболее приемлемы дистанционные наблюдения, что требует разработки новых методов получения

необходимой информации. Для этого нужно найти удобные для дистанционных измерений параметры объектов и способы тематической дешифровки результатов измерений. Растения являются необходимым компонентом среды обитания живого мира, а фотосинтетический аппарат зеленых листьев может быть использован как чувствительный индикатор стрессовых ситуаций. Последнее обусловлено тем, что стрессы различного происхождения влияют, прежде всего на содержание хлорофилла в листьях, а этот параметр может быть измерен бесконтактным дистанционным методом, основанном на использовании отражательных характеристик листьев в оптическом диапазоне. Имеется большое количество публикаций, указывающих на реакцию пигментного аппарата растений в ответ на действие стресса. Известны работы, указывающие на снижение хлорофилла в растительности Чернобыльской зоны [12], при утечках газа на магистральных газопроводах [20], вирусных заболеваниях [18], дефиците азотного питания [5, 15, 16] и влаги [8—10, 19].

Проблема информативности параметров спектра отражения растительности относительно различных показателей ее состояния активно разрабатывается в течение последних 30 лет. Работы более раннего периода были ориентированы на построение различных вегетационных индексов, использующих спектральные коэффициенты яркости, которые измеряли многоканальными дистанционными спектрорадиометрами. Полуширина спектрального участка таких каналов составляла 10—30 нм. Были найдены комбинации этих коэффициентов, которые обнаруживали высокую степень корреляции с содержанием в листьях тех или иных биохимических компонентов, в частности хлорофилла. Дистанционные измерения с использованием такого подхода называют мультиспектральными, а соответствующая аппаратура — это многозональные сканеры. Результаты таких измерений имеют существенное ограничение относительно дешифровки данных с целью получения корректной информации. Это обусловлено в основном двумя обстоятельствами: 1) необходимостью иметь эталоны коэффициентов яркости, которые необходимо измерять в тех же условиях, что и исследуемый объект и 2) искажение полезного сигнала отражения растительности вкладом отражения от почвы при работе с фитоценозами с неполным проективным покрытием.

В последнее время широкое развитие получили исследования, касающиеся информативных возможностей спектральных кривых отражения растительности, измеренных при высоком спектральном разрешении. Установлено, что изменения наклона линейного участка спектральной кривой в области так называемого красного края ($\lambda = 680\text{—}800$ нм) обусловлены вариациями содержания хлорофилла [13, 17]. В некоторых работах последних лет для качественной оценки изменений концентрации хлорофилла использовали отношение интенсивности двух экстремумов в графике первой производной спектральной кривой в области красного края. В работе [15] показано, что при более низкой концентрации хлорофилла доминирует коротковолновый экстремум. В работах [22, 23] предлагается отношение $D705/D722$ интенсивностей экстремумов при $\lambda = 705$ и 722 нм в качестве дифференциального индекса для распознавания ситуаций, соответствующих большему или меньшему со-

держанию хлорофилла, и выявления таким образом стресса у оливковых деревьев. Авторы, однако, считают, что в величину этого отношения дает вклад флуоресценция листьев.

Нами в течение ряда лет разрабатывается методологический подход для определения хлорофилла в листьях на основе корреляционной связи этого параметра с величиной отношения двух экстремумов в графике первой производной [1, 3—5, 14, 21]. Было показано, что такой подход позволяет получить уравнение регрессии для расчета хлорофилла [14] и что эта формула устойчива в отношении вкладов отражения от почвы [3]. Однако работоспособность метода существенно зависит от уровня шума на выходе измерительной установки, поскольку этот фактор определяет возможность различения двух экстремумов первой производной. Кроме того, для приборной реализации метода необходимо разработать способ автоматического поиска положения экстремумов и их интенсивности.

Указанные недостатки предложенного подхода стимулировали поиск альтернативных методов определения хлорофилла с использованием спектральной кривой отражения. Анализ методов позволил предложить и обосновать новый подход на основе отыскания главных компонентов. Основные принципы этого метода будут изложены ниже.

Для проверки применимости разработанных нами методов, адаптации их к полевым измерениям и внедрения в широкую практику необходим полевой прибор для измерения спектров отражения растительности. Он должен отвечать ряду специфических требований, обуславливающих его конструктивные особенности, а также включать специализированное программное обеспечение для расчетов хлорофилла по разработанным алгоритмам.

МЕТОДОЛОГИЯ

Спектральные измерения. Для работы по методу главных компонентов использовали спектры отражения листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла. Их записывали в цифровом виде на спектрофотометре СФ-10, снабженном интегрирующей сферой. Регистрирующая система была модифицирована с тем,

чтобы получать спектры в цифровом виде. Диапазон регистрации 400—750 нм, шаг отбора информации 1 нм. Кусочки листьев, спектры отражения которых были записаны, затем подвергали обработке 80 % ацетоном для экстракции хлорофилла, содержание которого в экстракте определяли спектрофотометрически по Арнону [7].

Системы растительность — почва, используемые для выяснения устойчивости алгоритмов оценки хлорофилла к влиянию вклада отражения от почвы при неполном проективном покрытии, имитировали в виде физических и графических моделей. Первые осуществляли путем покрытия листьями только определенной части поверхности измерительной кюветы. Фоном служила черная почва или песок, как подложки с минимальным и максимальным отражением. В графических моделях неполное проективное покрытие моделировали математическим сложением спектральных кривых отражения листьев и фона с заданными весовыми коэффициентами.

ОЦЕНИВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА НА ОСНОВЕ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Под спектральной кривой будем понимать зависимость коэффициента яркости q от длины волны λ . Представим спектральную кривую в виде вектора $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_M)$, где M — количество его компонентов. Когда мы имеем дело с множеством измерений, значения вектора \mathbf{q} изменяется в соответствии с изменением временного параметра t . Требуется получить более простое описание семейства векторов. Прежде всего сдвинем начало системы координат в «центр тяжести», определяемый по формуле

$$\bar{\mathbf{q}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{q}^l, \quad l=1, \dots, L,$$

где L — число спектральных кривых, или по формуле

$$\bar{q}_j = \frac{1}{T} \int_0^T q_j(t) dt, \quad j=1, \dots, M,$$

если рассматривать спектральные кривые как непрерывные функции по времени.

Чтобы произвести сдвиг начала координат в центр тяжести, введем новую переменную \mathbf{h} :

$$\mathbf{h}(t) = \frac{\mathbf{q}(t) - \bar{\mathbf{q}}(t)}{\bar{N}},$$

где \bar{N} — нормировочная постоянная, введенная для того, чтобы вектор \mathbf{h} имел единичную длину. Это достигается требованием

$$\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{h}(t)^2 dt = 1.$$

Для решения задачи необходимо построить наиболее простое и эффективное приближение зависящего от времени вектора \mathbf{h} .

Введя обозначение

$$R_{jk} = \frac{1}{T} \int_0^T h_j(t) h_k(t) dt,$$

мы можем получить выражение

$$\sum_{l=1}^M R_{jl} v_l^{(k)} = \lambda_k v_j^{(k)}, \quad j=1, \dots, M,$$

где $\mathbf{v}^{(k)}$ — k -й собственный вектор.

Введем корреляционную матрицу \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = [R_{jk}] = \langle q_j q_k \rangle, \tag{1}$$

которая позволяет записать для вектора \mathbf{h} следующее выражение [21]:

$$\mathbf{R} \mathbf{v}^{(k)} = \lambda_k \mathbf{v}^{(k)}.$$

Так как \mathbf{R} — действительная симметричная матрица, она обладает действительными собственными значениями

$$\lambda_k \geq 0.$$

Можно показать, что

$$\sum_{k=1}^M \lambda_k = 1.$$

Заметим, что описанный выше вектор \mathbf{h} можно представить в виде

$$\mathbf{h}(t) = \sum_{k=1}^M \xi_k(t) \mathbf{v}^{(k)}, \tag{2}$$

Амплитуды $\xi_k(t)$ можно найти, зная векторы \mathbf{h} и $\mathbf{v}^{(k)}$, из соотношения

$$\xi_k(t) = \mathbf{v}^{(k)} \mathbf{h}(t) = \sum_{j=1}^M v_j^{(k)} h_j(t). \tag{3}$$

Корреляция между ξ_k и ξ_k описывается соотношением

$$\frac{1}{T} \int_0^T \xi_{k'}(t) \xi_k(t) dt = \lambda_k \delta_{kk'}, \quad (4)$$

где $\delta_{kk'}$ — дельта-символ Кронекера.

Вычислим величину ошибки, которую мы совершаем, учитывая меньшее число членов K при максимальном числе членов M . Средняя ошибка, которая определяется квадратом разности между вектором \mathbf{h} и его приближенным разложением, вычисляется по формуле

$$E_k = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\mathbf{h}(t) - \sum_{k=1}^K \xi_k(t) \mathbf{v}^{(k)} \right)^2 dt, \quad (5)$$

$$K \leq M.$$

Можно показать, что

$$E_k = 1 - \sum_{k=1}^K \lambda_k. \quad (6)$$

Если упорядочить собственные векторы в порядке убывания их собственных значений, можно видеть, что быстрее всего ошибку можно минимизировать, если первыми включить в выражения (6) или (5) наибольшие собственные значения. Таким образом, определив собственные значения, мы получаем возможность оценить качество нашего приближения. Для анализа спектральных кривых можно ограничиться первыми членами разложения (3).

Для вычисления концентрации хлорофилла Z используем первые K членов разложения, на основе которых по текущим обучающим спектральным кривым строим регрессионное уравнение. Предложено бикубическое регрессионное уравнение

$$Z(x, y) = a + b\xi_1 + c\xi_2 + d\xi_1\xi_2 + d_1\xi_1\xi_2^2 + d_2\xi_1^2\xi_2 + e_1\xi_1^3 + e_2\xi_1^3 + f_1\xi_2^2 + f_2\xi_2^3,$$

где ξ_1 и ξ_2 — первый и второй главные компоненты; $a, b, c, d, d_1, d_2, e_1, e_2, f_1, f_2$ — параметры, определяемые с помощью соответствующей оптимизационной процедуры.

Описанный выше метод был использован для разработки численного алгоритма определения концентрации хлорофилла. Все формулы записывались в дискретной форме. Программная реализация была выполнена на языке C++ с использованием математической библиотеки, по-

ставляемой с пакетом Matlab. Для проведения экспериментов использовались спектральные кривые отражения листьев озимой пшеницы. Главные компоненты определяются на основе описанного выше метода с использованием набора спектральных кривых без предварительной фильтрации шумов. Содержание хлорофилла вычислялось на основе регрессионных моделей (линейной, полиномиальной, билинейной и бикубической) [21].

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ

Для определения концентрации хлорофилла методом главных компонент (МГК) были взяты спектральные кривые отражения листьев озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла, концентрация которого была установлена химическим методом. Три из них приведены на рис. 1. Главные компоненты (ГК) определялись по корреляционной матрице \mathbf{R} для диапазона $\lambda\lambda = 640...745$ нм. Рис. 2 демонстрирует зависимость первой главной составной от содержания хлорофилла.

Рис. 3 демонстрирует зависимость величины средней ошибки E (5) от числа главных компонент, используемых для вычисления концентрации хлорофилла. Из графика видно, что при использовании пяти собственных векторов средняя ошибка E близка к нулю. При построении

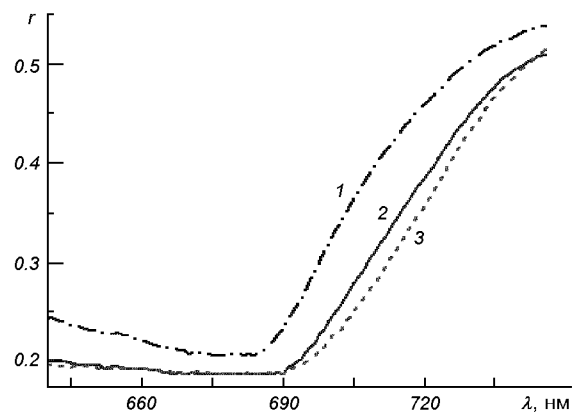


Рис. 1. Спектральные кривые озимой пшеницы с различным содержанием хлорофилла. Здесь $r = I_o/I_p$ — коэффициент отражения (безразмерная величина), I_o — интенсивность отраженного света, I_p — интенсивность падающего света

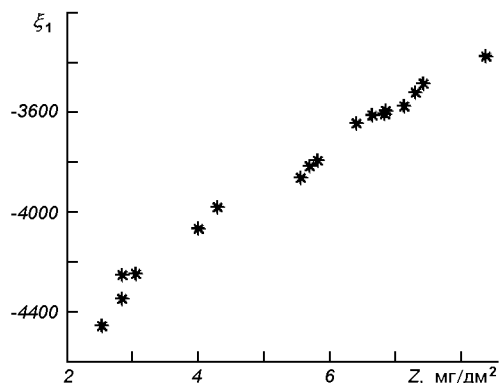


Рис. 2. График зависимости значения первой главной компоненты от концентрации хлорофилла

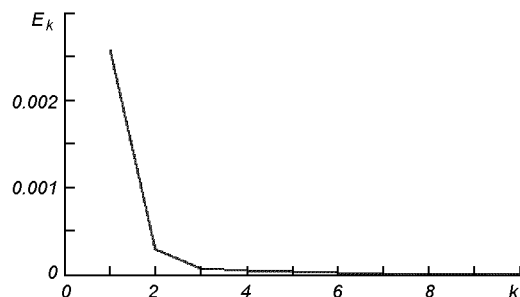


Рис. 3. Зависимость величины ошибки от числа собственных векторов

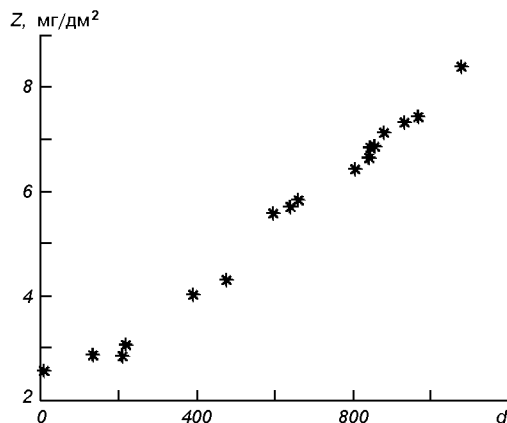


Рис. 4. Зависимости концентрации хлорофилла от эвклидова расстояния между векторами главных компонент

одномерной регрессионной модели концентрации (линейной и полиномиальной) вычислялось эвклидово расстояние между векторами главных компонент. В двумерных моделях регрессии

(билинейная и бикубическая) в качестве независимых переменных использовались первая и вторая главные компоненты корреляционной матрицы. Указанные модели были получены с использованием 17 обучающих кривых. На рис. 4 показана зависимость концентрации хлорофилла от эвклидова расстояния между векторами ГК, соответствующих обучающим кривым. Сумма квадратов ошибок (SSE) и средний квадрат ошибок (MSE) линейных регрессионных моделей, полученных по методу главных компонент (МГК) и методу первой производной (МПП), представлены в табл. 1. Полученные значения концентрации хлорофилла для различных типов регрессии, а также с применением биохимического метода и МПП приведены в табл. 2.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА СПЕКТРАЛЬНЫХ КРИВЫХ И ОЦЕНИВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА

С целью анализа спектральных кривых и оценивания содержания хлорофилла в растительности было разработано прикладное программное обеспечение (ППО) WINCHL, которое состоит из следующих функционально связанных подсистем: подсистемы управления, базы данных, библиотеки алгоритмов и графического интерфейса для взаимодействия с пользователем. Структурная схема ППО WINCHL представлена на рис. 5.

Система WINCHL предназначена для получения спектральных данных со спектрометра; вычисление значения хлорофилла по одному из разработанных алгоритмов и сохранения результатов в базе данных.

ППО разработано для двух вариантов использования. Первый, USWHL, предназначен для экспресс-оценивания хлорофилла в растительности в полевых условиях. В функции USWHL входит получение спектральных данных со спектрометра, вычисление концентрации хлорофилла и сохранение результатов в базе данных. Этот вариант ППО прост в использовании, он хорошо подходит для накопления спектральных кривых в базе данных и получения быстрых оценок содержания хлорофилла в растительности. Второй, WINCHL (рис. 6), предназначен для

Таблица 1. Ошибки регрессионных моделей

Бикубической		Билинейной		Линейной		Полиномиальной	
SSE	MSE	SSE	MSE	SSE	MSE	SSE	MSE
0.2779	0.0397	0.7376	0.0567	0.8547	0.0570	0.5754	0.0393

Таблица 2. Значения концентрации хлорофилла (различные типы регрессии)

Наименование кривой	Бикубическая	Билинейная	Линейная	Полиномиальная	Биохимический метод	Метод первой производной
RP62.dat	2.1418	2.1487	1.9854	2.2605	2.33	2.84
RP13.dat	2.8428	2.8929	3.1543	3.1628	2.90	3.20
RP50.dat	4.5774	4.7125	4.6984	4.5461	3.75	4.30
RP4.dat	4.6663	4.8861	4.7960	4.6409	4.76	4.95
RP40.dat	5.3740	5.5584	5.4719	5.3210	6.29	5.67
RP20.dat	5.8182	5.9891	5.8783	5.7500	6.57	6.02
RP19.dat	6.7840	6.6715	6.6551	6.6120	6.82	6.67
RP58.dat	7.1004	7.1326	6.9944	7.0058	7.65	7.45
RP35.dat	8.2049	7.8759	7.8213	8.0096	8.08	7.53
SSE =	2.4555	2.1792	2.7558	2.7965		1.7406

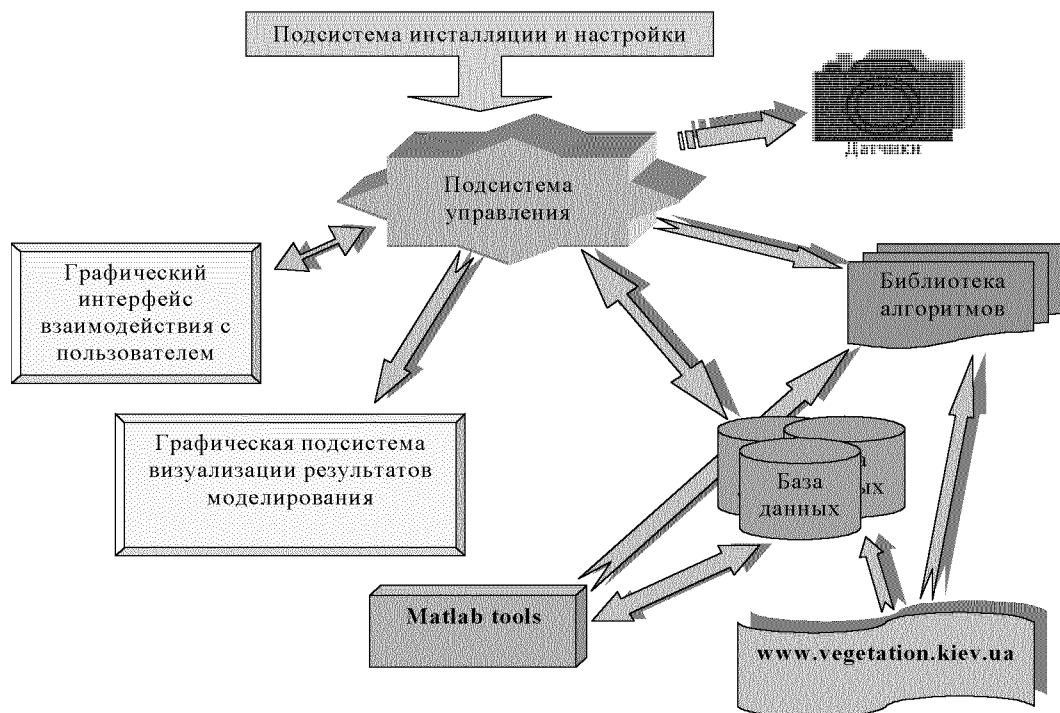


Рис. 5. Структурная схема прикладного программного обеспечения

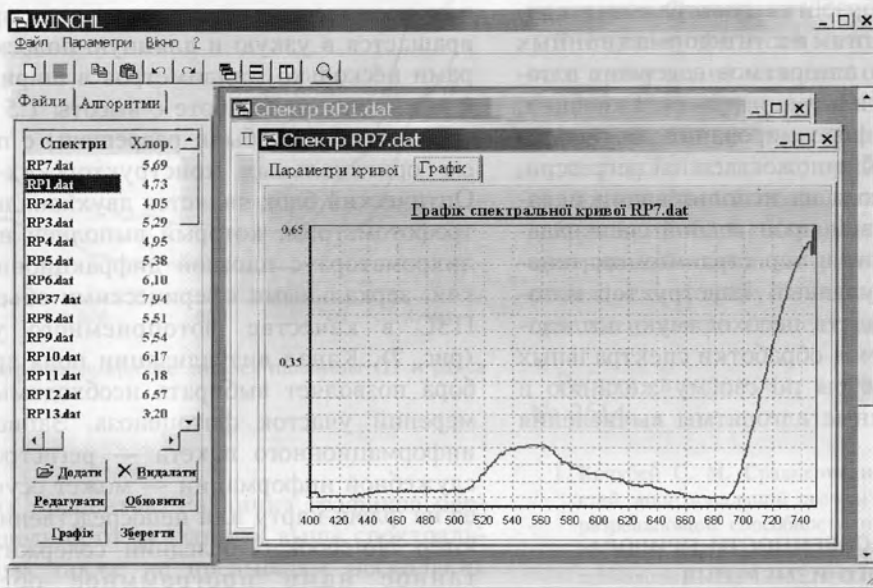


Рис. 6. Графический интерфейс ППО WINCHL

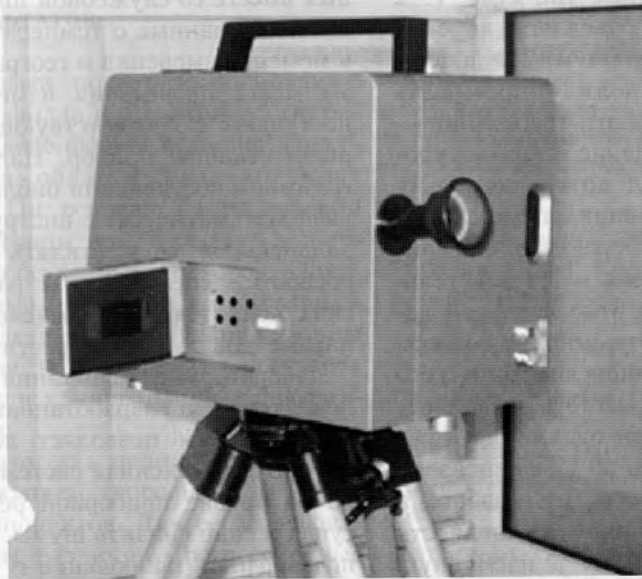


Рис. 7. Общий вид прибора

исследовательских целей с широким набором инструментов для обработки спектральных кривых и исследования их информационных свойств. Библиотека алгоритмов содержит алгоритмы цифровой фильтрации и сглаживания, фурье-анализа, дифференцирования, оптимизации, определения ГК, множественной регрессии, метода, базирующегося на использовании параметров графика первой производной спектральной кривой отражения и перестраиваемого генератора шумов. Визуальный конструктор алгоритмов позволяет задать необходимую последовательность алгоритмов обработки спектральных кривых и их параметры по своему желанию и формировать различные алгоритмы вычисления хлорофилла.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИБОРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Для реализации разработанного нами метода с применением главных компонентов, а также метода с использованием первой производной [5, 14] необходим полевой спектрометр с высоким спектральным разрешением (не хуже 1—2 нм). Второй из методов предъявляет высокие требования к уровню сигнал/шум. По нашим оценкам уровень шума не должен превышать 0.1 % от шкалы прибора. Оба эти требования — высокое спектральное разрешение и низкий уровень шума противоречат друг другу, поскольку первое из них требует сужения спектральной ширины входной щели прибора, что снижает интенсивность светового потока и, следовательно, способствует повышению относительной величины шумового сигнала. Эти условия должны сочетаться с большой величиной динамического диапазона, поскольку имеет место большой перепад значений коэффициента отражения в области красного края — от 3 до 60 % в диапазоне $\lambda\lambda = 680...800$ нм. Кроме того, при работе в полевых условиях натуральная освещенность может изменяться от 10 000 лк в пасмурную погоду до 120 000 лк в солнечную. В наземных измерениях возникает также специфическое требование к форме поля зрения прибора. При использовании традиционной конструкции вход-

ного тракта, используемой в аэродистанционных или космических измерениях поле зрения превращается в узкую и длинную полосу с размерами несколько миллиметров в ширину и более 1 м в длину при работе с высоты 1.5 м.

Эти проблемы были разрешены с применением оригинальных конструкторских решений. Оптический блок является двухканальным спектрофотометром, который выполнен на базе плоской дифракционной решеткой, зеркальными сферическими объективами и ПЗС в качестве фотоприемного устройства (рис. 7). Канал визуализации поля зрения прибора позволяет выбирать необходимый для измерений участок фитоценоза. Запись полного информационного пакета — регистрограммы и служебной информации — может осуществляться на флеш-карту или непосредственно в компьютер Notebook. Последний содержит разработанное нами программное обеспечение WINCHL, которое обеспечивает работу прибора в двух режимах — пользовательском и режиме для научных исследований. Пользовательский канал позволяет получать оценки хлорофилла в растительности в реальном масштабе времени. Режим для научных исследований производит запоминание спектральных кривых в базе данных вместе со служебной информацией, каковой являются данные о температуре и освещенности в момент измерения и географические координаты места проведения измерений. Эти данные поступают с соответствующих датчиков, которыми оснащен прибор. Наличие в нашем программном обеспечении библиотеки алгоритмов и ряда математических инструментов позволяет в дальнейшем осуществлять различные методы обработки спектров для разработки методических подходов для определения других важных параметров состояния растительности.

Лабораторные испытания оптического блока показали, что разработанная конструкция оптической схемы позволяет добиться разрешения 1.6 нм. Примененная система накопления сигнала на уровне приборной реализации позволяет существенно снизить шумы. Полевые испытания подтвердили заключение о низком уровне шумов. Сравнение единичной записи спектра отражения и усредненного из 10 повторных записей того же самого падающего в поле зрения прибора, показали, что их отличия не превышают

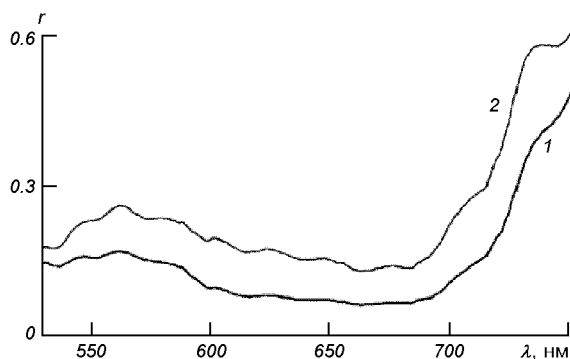


Рис. 8. Спектральные кривые листьев пшеницы (1) и рапса (2)

нескольких процентов. Различия графиков первой производной от указанных выше спектральных кривых также не превышают нескольких процентов. Форма спектральной кривой отражения соответствует лабораторным кривым, а отличия в области красного края при вариациях содержания хлорофилла имеют аналогичный характер. Спектральные кривые листьев пшеницы и рапса представлены на рис. 8.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Предложен новый подход к оцениванию концентрации хлорофилла в растительности, базирующийся на анализе формы исходной спектральной кривой в области красного края ($\lambda\lambda$ 680–750 нм). Он основан на построении ковариационной матрицы по обучающей выборке и определении собственных векторов. Показано, что необходимо не более пяти главных компонентов для адекватного описания формы спектральной кривой, что позволило построить регрессионные модели концентрации хлорофилла в растительности.

2. Установлено, что есть нелинейная зависимость между содержанием хлорофилла и значениями главных компонентов. Для ее исследования были построены различные регрессионные модели (линейная, полиномиальная, билинейная и бикубическая), и исследованы их статистические характеристики. Установлено, что наилучшее приближение обеспечивает бикубическая регрессионная модель. Регрессионные моде-

ли исследованы на адекватность с помощью критериев Фишера и Стьюдента.

3. Реализация этого метода для условий полевого применения налагает специфические требования на измерительный комплекс. Они были сформулированы и воплощены в виде специализированного полевого прибора. Результаты полевых испытаний позволили оценить работоспособность прибора. Установлено, что аппаратно-программный комплекс устойчив к шумам измерения и не требует вычисления производных при оценивании концентрации хлорофилла.

Работа выполнена в рамках гранта УНТЦ № 2614.

1. Кочубей С. М. Сравнение информативных 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. Аппаратура и методы дистанционного зондирования растительности в оптическом диапазоне // *Космічна наука і технологія*.—2002.—8, № 2/3.—С. 271—275.
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., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Количественный анализ формы спектральной кривой отражения листьев растений как способ тестирования их состояния // *Физиол. и биохимия культ. раст.*—1988.—20.—С. 535—539.
5. Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики.—Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
6. Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. — М.: Лань, 2002.—736 с.
7. Arnon D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* // *Plant Physiol.*—1949.—24.—P. 1—15.
8. Bowyer P., Danson F. M. Sensitivity of spectral reflectance to variation in live fuel moisture content at leaf and canopy level // *Remote Sens. Environ.*—2004.—92.—P. 297—308.
9. Ceccato P., Flasse S., Gregoire J. M. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data. 2. Validation and applications // *Remote Sens. Environ.*—2002.—82.—P. 198—207.
10. Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain // *Remote Sens. Environ.*—2001.—77.—P. 22—33.
11. Comon P. Independent component analysis. A new concept? // *Signal Processing*.—1994.—N 36 (3).—P. 287—314.
12. Davids C., Tyler A. N. Detecting contamination-induced

- tree stress within the Chernobyl exclusion zone // *Remote Sens. Environ.*—2003.—85.—P. 30—38.
13. Horler D. N. H., Dokray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance // *Int. J. Remote Sens.*—1983.—4.—P. 273—288.
 14. Kochubey S. M., Bidyuk P. I. A Novel approach to remote sensing of vegetation // *Proc. SPIE.*—2003.—5093.—P. 181—188.—(SPIE Conf. “AeroSense. Technologies and Systems for Defence & Security”, 21—25 April 2003, Orlando USA).
 15. Lamb D. W., Steyn-Ross M., Schaare P., et al. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: theoretical modelling and experimental observations // *Int. J. Remote Sens.*—2002.—23.—P. 3619—3648.
 16. Moran J. A., Mitchell A. K., Goodmanson G., Stockburger K. A. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods // *Tree Physiology.*—2000.—20.—P. 1113—1120.
 17. Pinar A., Curran P. J. Grass chlorophyll and the reflectance red edge // *Int. J. Remote Sens.*—1996.—17.—P. 351—357.
 18. Polischuk V. P., Shadchina T. M., Kompanetz T. I., et al. Changes in reflectance spectrum characteristics of *Nicotiana debney* plant under the influence of viral infection // *Arh. Phytopath. Pflanz.*—1997.—31.—P. 115—119.
 19. Riggs G. A., Running S. W. Detection of canopy water stress in conifers using the airborne imaging spectrometer // *Remote Sens. Environ.*—1991.—35.—P. 51—68.
 20. Smith K. L., Steven M. D., Coll 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.
 21. Yatsenko V. A., Kochubey S. M., Pardalos P. M., Zhan L. Estimation of chlorophyll concentration in vegetation using global optimization approach // *Proc. SPIE.*—2003.—5071.—P. 50—59.—(“Technologies, Systems, and Architectures for Transnational Defence II”, SPIE Conference “AeroSense. Technologies and Systems for Defence & Security”, 21—25 April 2003, Orlando USA).
 22. 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.
 23. Zarko-Tejada P. J., Pushnik J. C., Dobrowski S., Ustin S. L. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double peak red edge effect // *Remote Sens. Environ.*—2003.—84.—P. 283—294.

NEW METHOD FOR REMOTE SENSING ESTIMATION OF CHLOROPHYLL CONTENTS IN VEGETATION AND ITS SOFTWARE REALIZATION

V. O. Yatsenko, P. O. Khandriga, S. M. Kochubey, V. V. Donets

The problem of remote sensing estimation of vegetation chlorophyll content for condition monitoring by reflectance spectra is considered. We propose a way for the solution of the problem with the use of the principal components analysis method (PCA) and nonlinear regression models. A hardware-software complex is developed to realize the way. Some results of testing the complex and of its comparison with the first derivative method are presented.