

Аппаратура и методы дистанционного зондирования растительности в оптическом диапазоне

С. М. Кочубей

Институт физиологии растений и генетики НАН Украины, Киев

Дистанционное зондирование растительности в оптическом диапазоне основывается на характерном виде спектра отражения, что определяет богатые информационные возможности такого подхода. Из показанного на рис. 1 спектра зеленого листа видно, что характерными областями являются широкий максимум в зеленой области, минимум в красной области и резкое нарастание интенсивности от красного минимума до плато в ближней инфракрасной области. Эта область подъема называется красным краем спектра отражения растительности и служит тестовым признаком для ее обнаружения, например при наблюдениях поверхности Земли из космоса.

Специфическая форма спектров отражения растительности в оптическом диапазоне обусловлена спектральными характеристиками зеленого пигмента листьев хлорофилла. Поэтому такие спектры могут быть использованы как источник информации для дистанционного определения содержания пигмента. Это показатель важен для детекции состояния растительности. Известно, например, что содержание хлорофилла в листьях может быть

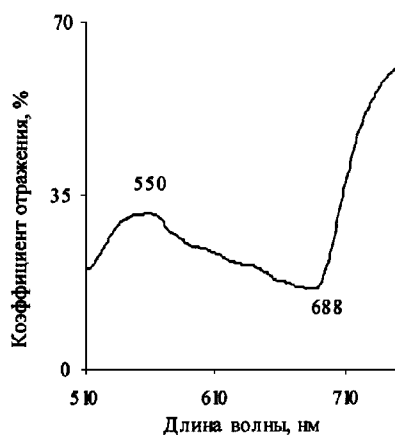


Рис. 1. Спектр отражения зеленого листа

показателем потенциальной мощности фотосинтетического аппарата и использоваться для прогнозных оценок урожая. Экологические стрессы различных типов прежде всего влияют на фотосинтетический аппарат, индуцируя вариации содержания хлорофилла. Сезонные изменения этого показателя дают важную информацию о ходе вегетации в том или ином растительном сообществе. Например, измерения так называемых кривых «зелености», т. е. зависимости содержания хлорофилла в течение вегетационного сезона на тех или иных участках земной поверхности, позволяют классифицировать тип растительности. Для посевов сельскохозяйственных культур по таким данным можно оценить сроки созревания.

Задача определения биохимических компонентов листьев по спектральным характеристикам отражения является привлекательной для самых различных аспектов получения экспресс-информации о состоянии растений. Очевидно, поэтому поиски надежных тестовых характеристик интенсивно ведутся в различных лабораториях мира. Использование наряду с видимой областью спектра и ближней инфракрасной позволило разработать показатели для определения содержания лигнина, белка, крахмала, общего азота [1—3]. Водный статус листьев тестировали по спектральным данным в работах [4—8]. Данные по определению хлорофилла приведены в ряде исследований [9—13], оценки содержания каротиноидов проводили в работах [14—16]. Спектральные коэффициенты яркости применялись также для тестирования стрессов растительности и оценок фотосинтеза [17, 18]. В большинстве случаев для этого находили математические комбинации спектральных коэффициентов яркости, которые коррелировали с содержанием того или иного биохимического компонента. Полученные линейные регрессии между указанными параметрами давали хорошую статистическую достоверность результатов, но только для лабораторных измерений.

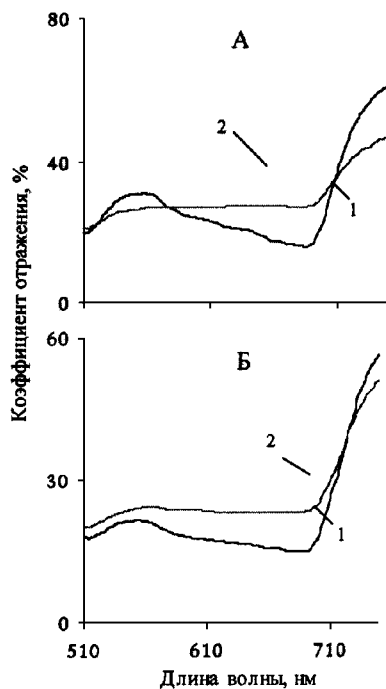


Рис. 2. Спектры отражения листьев с низким (2 мг/дм² (А) и высоким (5 мг/дм² (Б) содержанием хлорофилла на фоне светлой почвы. Кривые 1 и 2 — 100 и 50 % проективного покрытия соответственно

При проведении дистанционных измерений в полевых условиях, с борта самолета или космического корабля корреляция между спектральными параметрами и биохимическими показателями ухудшается или полностью разрушается [1, 6]. Одной из основных причин является суперпозиция потоков света, отраженных от растительности и подстилающей поверхности, почвы, которая значительно искажает спектр отражения растительности. Величина искажений различна в различных областях спектра и зависит от соотношения полезного и искажающего сигналов. На рис. 2 показаны спектры отражения листьев с различным содержанием хлорофилла на фоне почвы с различным отражением при различном проективном покрытии. Видно, что наибольшие искажения, в особенности формы красного края, наблюдаются при низком содержании хлорофилла и высоких показателях отражения почвы.

Уменьшить влияние вклада отражения почвы на величину полезного сигнала пытаются путем разработки более сложных индексов, в том числе включающих отражение в инфракрасной области спектра [19, 20]. Эти индексы оказались чувствительными к помехам, создаваемым пропусканием атмосферы, поэтому предлагались еще более сложные выражения для поправок на этот фактор [21]

Однако до сих пор не проведены количественные оценки снижения уровня влияния искажающих помех. Кроме того, эти подходы представляются мало эффективными для широкого практического применения по ряду причин. Так, использование ИК-области для получения внутреннего репера оценки вклада почвы нецелесообразно, так как для растительности характерны высокие коэффициенты отражения в этой области. Наблюдения динамики отражательных характеристик ценоза требует больших затрат времени и позволяет провести оценку измеряемых величин только в конце вегетации. Возможны также и помехи, обусловленные изменениями отражательных характеристик почвы во времени.

Более корректные результаты по отделению вклада отражения почвы от полезного сигнала могли бы дать непосредственные измерения коэффициентов яркости почвы, на которой произрастает данное растительное сообщество. При этом измерения должны проводиться в то же время, что и растительности. Разнесение измерений во времени может вызвать большие искажения результатов, поскольку величина и спектральное распределение отражения от почвы существенно зависят от степени ее увлажненности и поверхностной структуры. Использование формул определения биохимических компонентов через спектральные коэффициенты яркости практически неприемлемо для аэрокосмических измерений в связи с большими трудностями проведения корректных измерений эталонных поверхностей, необходимыми для вычисления указанных спектральных характеристик. Эти причины, очевидно, являются основными факторами, разрушающими корреляции, полученные при лабораторных измерениях в случае применения их в полевых условиях.

Альтернативу указанному подходу дают методы, базирующиеся на спектральных измерениях с высоким разрешением по спектру. Исследования с применением такой техники с борта самолета начались с 80-х годов прошлого столетия. Основное внимание уделялось характеристикам красного края спектра отражения. Уже в ранних работах отмечалось, что положение красного края зависит от содержания хлорофилла [22, 23]. Указывалось, что информация, содержащаяся в этой области спектра достаточна для детекции небольших различий в химическом и морфологическом состоянии растений [24]. Отмечалась чувствительность параметров красного края к стрессу [25]. Установлена корреляция различных параметров красного края с содержанием хлорофилла в листьях сахарной свеклы [26]. В отделе биохимии фотосинтеза Института физиологии растений и генетики с середины 80-х годов был проведен обстоятельный цикл исследова-

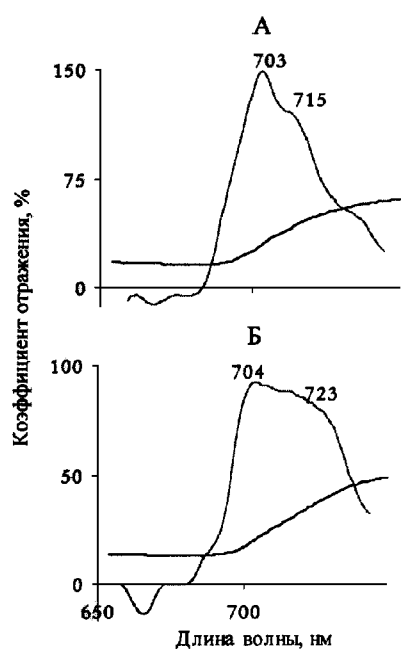


Рис. 3. Спектры отражения листьев с низким (2 мг/дм^2) (А) и высоким (5 мг/дм^2) (Б) содержанием хлорофилла и графики 1-й производной

ний, связанный с разработкой методов тестирования состояния растений с использованием спектроскопии высокого разрешения. В частности, были разработаны методы определения концентрации содержания хлорофилла и общего азота в листьях, обоснованы подходы к определению таких показателей как проективное покрытие и сроки созревания [13]. Позднее была показана возможность прогноза урожая озимой пшеницы [27]. Основным информативным параметром в наших подходах служило отношение максимумов в графике первой производной от спектральной кривой отражения в области красного края.

На рис. 3 показаны спектры отражения листьев с различным содержанием хлорофилла и графики первой производной. Видно, как изменяется форма красного края и насколько выразительны эти отличия в графиках первой производной. Отношение максимумов первой производной является количественной характеристикой формы спектральной кривой в указанной области.

В силу этого оказалось возможным связать его регрессионным отношением с содержанием хлорофилла и общего азота. Нами впервые было указано на повышенную устойчивость указанного параметра формы спектра отражения к помехам, обусловленным отражением подстилающей поверхности и влиянию пропускания атмосферы [13]. Основной причиной является то обстоятельство, что спек-

ральное распределение отражения от почвы является медленно изменяющейся функцией, в то время как скорость изменения этой величины в области красного края во много раз больше даже для случаев низкого содержания пигмента в листьях. Применяемая нами процедура вычисления первой производной с помощью аппроксимации экспериментальной кривой полиномами второй степени равносильна применению числового фильтра, который эффективно отсекает низкочастотную часть, обусловленную слабо изменяющимся спектральным распределением отражения почвы. Исследование, проведенное на экспериментальных имитационных моделях, показало, что даже в наихудшем варианте — низкое содержание хлорофилла (около 2 мг/дм^2) на фоне светлой почвы (отражение при 700 нм около 20%) отклонение от значения содержания хлорофилла, определенного химическим способом, не превышает 30% [28]. Для аналогичного определения с помощью формулы, использующей коэффициенты яркости, соответствующие значения отличаются в три раза.

Недостатком описываемого метода является его чувствительность к таким параметрам, как спектральное разрешение и уровень инструментальных шумов. Первая из этих причин влияет на положение максимумов в графике первой производной и их разрешение по спектру. Вторая — на относительную интенсивность максимумов. Искажающее влияние возрастает по мере снижения уровня информативного сигнала. Так, по мере уменьшения содержания хлорофилла уменьшается крутизна спектральной кривой в области красного края, при этом влияние шумового компонента возрастает. На рис. 4 приведены графики 1-й производной от спектральных кривых отражения листьев с различным содержанием хлорофилла, построенных для уровней шума 5% и 20% . Отношения максимумов для кривых с большим и меньшим уровнями шумов отличаются в 1.5 раза для варианта с более низким содержанием пигмента. Величина этого отношения снижается до 1.25 при более высоком содержании хлорофилла. Такой результат получен с применением двойной процедуры сглаживания — сплайнами по 11 точкам, и при аппроксимации полиномами 2-й степени по 11 точкам. Следует отметить, что в данном случае изменение уровня шума в 4 раза вызвало изменение величины параметра, используемого для расчета содержания хлорофилла, в 1.5 и 1.25 раза. Такой результат получен благодаря тому, что высокое спектральное разрешение, 1 нм , дает достаточную информацию для проведения высокого уровня усреднения данных. Следует отметить, что для приведенного примера, соответствующего высокой степени сглаживания шумов, расчетное значение содержания хлорофилла отличается

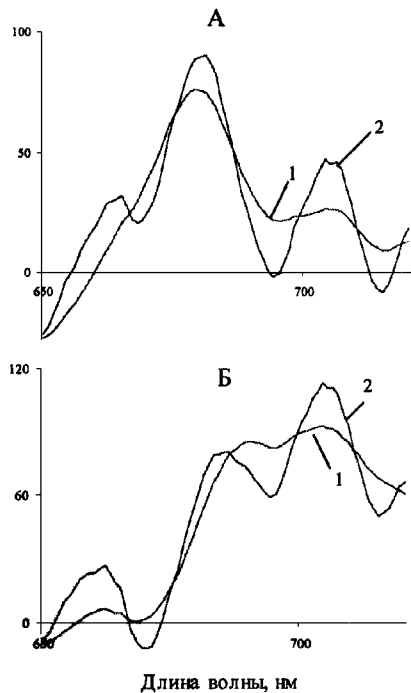


Рис. 4. Графики 1-й производной от спектральных кривых отражения листьев с низким (2 мг/дм^2 (А) и высоким (5 мг/дм^2 (Б) содержанием хлорофилла. Кривые 1 и 2 — уровень шума в записи 5 и 20 % соответственно

на 50 и 25 % при использовании спектрограмм с разным уровнем шума.

Рассмотренное выше влияние инструментальных параметров на точность вычисления содержания хлорофилла показывает, что при конструировании приборов для реализации метода необходимо провести оптимизацию указанных параметров, исходя из конкретных условий измерения и существующей элементной базы. Прежде всего критичным оказывается расстояние, на котором предполагается проводить измерения. Если оно порядка размеров площадки, с которой желательно получить информацию, то возникают значительные трудности как с формированием изображения измеряемой площадки в области фотоприемника, так и в связи с уменьшением светового потока, поступающего в прибор, что обуславливает понижение уровня полезного сигнала. Такие проблемы возникают, в частности, при конструировании приборов для полевых исследований в наземных условиях. Например, проведенные расчеты показывают, что использовавшийся в работах отдела биохимии фотосинтеза Института физиологии растений и генетики НАН Украины оптический блок бортового спектрометра при измерениях с расстояния 1.5 м захватывает световой поток с площадки размером $1 \text{ м} \times 3 \text{ м}$.

При этом электрический сигнал от попадающего в прибор светового потока в минимуме спектра отражения при разрешении 1 нм и освещенности объекта порядка 50 000 люкс только в 10 раз превышает уровень шума фотоумножителя типа ФЭУ-84. Понятно, что возникает проблема как с формированием более приемлемого поля изображения, так и с улучшением энергетических параметров.

Проведенный нами предварительный анализ показывает, что приборная реализация разработанного нами подхода для дистанционного измерения содержания хлорофилла в растительности требует разработки теоретической базы, которая бы формулировала принципы оптимизации как алгоритма вычисления, так и параметров спектрального прибора.

- Peterson D. L., Aber J. D., Matson P. A., et al. Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents // *Remote Sens. Environ.*—1988.—24.—P. 85—108.
- Bo-Cai Gao and Goetz A. F. H. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopy from AVIRIS data // *Remote Sens. Environ.*—1995.—52.—P. 155—162.
- Wessman C. A., Aber J. D., Peterson D. L., Melillo J. M. Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen cycling in temperate forest ecosystems // *Nature.*—1988.—335, N 9.—P. 154—156.
- 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.
- Penuelas J., Fiella I., Biel C., et al. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status // *Int. J. Remote Sens.*—1993.—14.—P. 1887—1905.
- Bostater C., Rebbman J. Temporal measurement and analysis of high resolution spectral signatures of plants and relationships to biophysical characteristics // *Proc. Int. Symp. Remote Sensing for Agriculture, Forestry, and Natural Resources*, 26—28 September 1995, Paris France.
- Bowman W. D. The relationship between leaf water status, gas exchange and spectral reflectance in cotton leaves // *Remote Sens. Environ.*—1989.—30.—P. 249—255.
- Shibayama M., Takahashi W., Morinaga S., Akyama T. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectrometer // *Remote Sens. Environ.*—1993.—45.—P. 117—126.
- Кондратьев К. Я., Федченко П. П., Бармина Ю. М. Опыт определения содержания хлорофилла в листьях растений по цветовым координатам // *Докл. АН СССР.*—1982.—262, № 4.—С. 1022—1024.
- Сидько А. Ф., Шевырнов А. П. Изучение сезонной зависимости спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур от содержания хлорофилла и физиологических параметров растений // *Исслед. Земли из космоса.*—1998.—№ 3.—С. 96—105.
- Campbell J. W., Esalas W. E. Basis for spectral curvature algorithms in remote sensing of chlorophyll // *Appl. Opt.*—1983.—22, N 7.—P. 1084—1090.
- Milton N. M., Monat D. A. Remote sensing of vegetation responses to natural and cultural environment condition // *Photogram. Eng. And Remote Sens.*—1989.—55.—P. 1167—1173.
- Кочубей С. М., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной

- диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
14. Gitelson A. A., Merzlyak M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer Platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation // J. Plant Physiol.—1994.—143.—P. 286—292.
 15. Merzlyak M. N., Gitelson A. A., Chircunova O. B., Rakitin V. Yu. Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening // Physiol. Plant.—199.—106.—P. 136—141.235
 16. Penuelas J., Baret F., Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll {a }ratio from leaf spectral reflection // Photosynthetica.—1995.—31.—P. 221—230.
 17. Carter G. A., Cibula W. G., Miller R. L. Narrow-band reflectance imagery compared with thermal imagery for early detection of plant stress // J. Plant Physiol.—1996.—148.—P. 515—520.
 18. Carter G. A. Reflectance wavebands and indices for remote estimation of photosynthesis and stomatal conductance in pine canopies // Remote Sens. Environ.—1998.—63.—P. 61—72.
 19. Qi J., Huete A. R., Modified soil adjusted vegetation index (MSAVI) // Remote Sens. Environ.—1994.—48.—P. 119—126.
 20. Чимитдоржиев Т. Н., Ефременко В. В. Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем // Исслед. Земли из космоса.—1998.—№ 3.—С. 49—56.
 21. Huete A. R., Liu H. Q. An error and sensitivity analysis of the atmospheric and soil correcting variant of the NDVI for the MODIS-EOS // IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.—1995.—32, N 4.—P. 897—905.
 22. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflection // Int. J. Remote Sens.—1983.—4, N 2.—P. 273—288.
 23. Ferns D. C., Zara S. J., Barber J. Application of high resolution spectroradiometry to vegetation // Photogram. Eng. And Remote Sens.—1984.—50, N 12.—P. 1725—1739.
 24. Boochs F., Kupfer G., Dockter K., Кьхбауш W. Shape of the red edge as vitality indicator for plants // Int. J. Remote Sens.—1990.—10.—P. 1741—1753.
 25. Buschmann C., Rinderle U., Lichtenthaler H. K. Detection of stress in coniferous forest trees with the VIRAF Spectrometer // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.—1991.—29, N 1.—P. 96—100.
 26. Vogelmann J. E., Rock B. N., Moss D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves // Int. J. Remote Sens.—1993.—14, N 8.—P. 1563—1575.
 27. Шадчина Т. М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. — Київ, Український фітосоціологічний центр, 2001.—219 с.
 28. 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.

Вирішення тематичних задач радіофізичними методами

Результаты мониторинга морской многочастотного неоднородностей поверхности радиолокационного волнения

М. В. Белоброва¹, А. Г. Боев², В. К. Иванов¹, И. А. Калмыков³,
А. Я. Матвеев³, В. Б. Разказовский³, В. Н. Цымбал³

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков

²Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков

³Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков

Дистанционные исследования неоднородностей морской поверхности решают задачи оперативного контроля экологии окружающей среды (обнаружение загрязнений на морской поверхности поверхностно-активными веществами), важны для обеспечения безопасности судоходства в акваториях мощных течений и в зонах проявления внутренних волн, необходимы для коррекции прогнозов погоды для близлежащих к течениям прибрежных районов и др. Для решения таких многопараметрических

задач все чаще используются многочастотные радиолокационные методы, как наиболее информативные и наименее подверженные влиянию погодных условий и условий освещенности. В данной работе исследования неоднородностей морской поверхности были выполнены с помощью комплекса МАРС [5], в состав которого входят два радиолокатора бокового обзора ($\lambda_1 \approx 0.8$ см, $\lambda_2 \approx 3$ см) с реальной апертурой РБО и два радиолокатора с синтезированной апертурой РСА ($\lambda_3 \approx 23$ см, $\lambda_4 \approx 180$ см).