

Декомпозиция спектральных смесей почва – растительность

Р. Кынчева, Д. Борисова, Г. Георгиев

*Институт космических и солнечно-земных исследований БАН
1113 София, Акад. Г. Бончев бл.3
E-mails: rumik@abv.bg, dborisova@stil.bas.bg, ggeorgie@stil.bas.bg*

Одно из важнейших применений дистанционных исследований земной поверхности, имеющих существенное практическое значение – мониторинг растительности. Различные вопросы оценки сельскохозяйственных посевов методами дистанционного зондирования связаны с наблюдением вегетационного развития культур, обнаружением стрессовых состояний, прогнозированием урожая. Основной задачей дистанционного мониторинга, особенно в отношении условий и хода роста сельскохозяйственных культур, является оценка состояния посевов в различных периодах их развития. Целесообразность проводимых исследований зависит от их точности и надежности. Повышению последних способствуют наземные эксперименты, предназначенные для создания и валидации применяемых алгоритмов. В работе рассматриваются два метода определения такого важного агропараметра, каким является проективное покрытие растительности. Один из методов основан на использовании спектральных преобразований (вегетационных индексов), а второй заключается в проведении колориметрического анализа измеряемых спектральных отражательных характеристик. Обращено внимание на специфику спектральных характеристик системы почва-растительность как динамического объекта и как спектральной смеси двух классов объектов. Цель работы – проиллюстрировать и сравнить оба подхода для определения проективного покрытия растительности по многоспектральным данным.

Ключевые слова: спектральные отражательные характеристики, система почва-растительность, проективное покрытие, вегетационные индексы, колориметрический анализ.

Введение

Своевременная оценка состояния сельскохозяйственных угодий и посевов представляет особый практический интерес, так как имеет важное значение для управления аграрных систем, прогнозирования их развития и урожая. Аэрокосмическая информация дает возможность дистанционного мониторинга, проводимого для оценки состояния растительного покрова. Ее достоверная интерпретация в значительной степени зависит от наличия спектрально-биофизических моделей, связывающих многоспектральные данные с различными характеристиками и агропоказателями растительности. Для этого широко используется спектральное отражение почвенно-растительного покрова в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Основным подходом является разработка и применение разнообразных вегетационных индексов, представляющих собой главным образом различной сложности отношения коэффициентов отражения для двух или более длин волн [1, 2, 5]. На основе экспериментальных данных создаются статистические модели, которые служат для определения ряда растительных биопоказателей [1, 3-6]. Колориметрический анализ редко применяется по отношению к растительности, но представляет определенные возможности, на что указывают результаты наших исследований [7-10].

Цель данной работы – провести сравнение этих двух методов для определения проективного покрытия растительности, которое выбрано в качестве обобщенного параметра, отражающего структурные различия и изменения посевов, и, следовательно, наиболее общим образом характеризующего их состояние. В работе показаны особенности применения вегетационных индексов и цветовых характеристик объектов, интерпретация которых проводи-

лась с точки зрения выявления доли зеленой растительности. Отличительной особенностью проведенных исследований является учет почвенного типа и фенологической фазы растений.

Материалы и методы

Проективное покрытие растительности является параметром, зависящим от общей архитектоники посева. Отражая морфологические особенности культур, оно связано с густотой посева, биомассой, листовым индексом и пр. и, являясь таким образом показателем вегетационного развития и роста, может считаться комплексным индикатором состояния растительного покрова. С другой стороны, проективное покрытие – основной фактор спектрального отражения системы почва – растительность, так как спектральная отражательная характеристика смешанного класса почва – растительность $r_{sv}(\lambda_i)$ формируется в зависимости как от отражательных свойств почвы $r_s(\lambda_i)$ и растительности $r_v(\lambda_i)$, так и от соотношения участвующих в спектральной смеси классов, т.е. от относительной доли растительности cv и почвы cs ($cs=1-cv$), а именно [11]:

$$r_{sv}(\lambda_i) = c_v(r_v(\lambda_i) - r_s(\lambda_i)) + r_s(\lambda_i) \quad (1)$$

Выше упомянутые две обстоятельства позволяют считать проективное покрытие связывающим звеном между измеряемыми спектральными характеристиками и состоянием растительного покрова. Это как раз и обуславливает интерес к его определению по многоспектральным данным. Проводимые наземные эксперименты служат для создания и валидации соответствующих моделей. Задача связана также с одной из основных проблем дистанционного зондирования – проблемой декомпозиции смешанных классов, которая касается большинства вопросов обработки и интерпретации данных [12-14]. Речь идет о разделении спектральных смесей, что в нашем случае относится к определению доли растительности и является предметом данной работы.

Разрабатываемые на протяжении двадцати с лишним лет, вегетационные индексы не потеряли свою актуальность и широкое применение. Ряд задач дистанционного зондирования растительного покрова, начиная с классификации и картирования и заканчивая слежением за фенологическим ходом развития посевов и прогнозированием урожая сельскохозяйственных культур, решаются на основе определения вегетационных индексов по спектральным данным и аэрокосмическим изображениям. В данной работе исследовано множество отношений, контрастов и нормированных разниц, главным образом в отличительных для растительности спектральных областях – синей (B–450 нм), зеленой (G–550 нм), красной (R–670 нм), ближней инфракрасной (NIR–820 нм) и на крутом участке красного смещения спектральной кривой (650-750 нм). Для количественного описания связи между долей растительности и спектральным отражением системы почва – растительность выведены эмпирические регрессионные модели.

Колориметрический анализ многоспектральных данных проведен в соответствии с стандартными CIE методами [15] в диапазоне 400-700 нм для стандартного источника D65. Использованные стандартные цветовые функции основных цветов показаны на рис. 3а. Для каждой спектральной отражательной характеристики вычислены цветовые координаты X, Y, Z, координаты цветности x, y, z и доминирующая длина волны λ_d . Согласно аддитивной теории смешанных классов, цветовые координаты системы почва – растительность [16] связаны с растительным покрытием аналогичной (1) формулой:

$$X_{sv} = c_v(X_v - X_s) + X_s, \quad (2)$$

а координаты цветности соответственно:

$$x_{sv} = [c_v(X_v - X_s) + X_s] / [c_v(W_v - W_s) + W_s], \quad (3)$$

где $W=X+Y+Z$ – сумма цветовых координат.

Результаты и обсуждение

Исследования включали наземные измерения многоканальной аппаратурой в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (400-820 нм), проводимых во время основных фенологических фаз вегетационного развития культур (озимой пшеницы, ялового ячменя, гороха, люцерны). Одновременно определялось проективное покрытие посевов, равно как и другие биопараметры растительности (надземная биомасса, хлорофильное содержание и пр.) Отметим, что при спектрально-биофизическом моделировании учет фазы вегетационного развития позволяет определять наиболее подходящие периоды времени для растительного мониторинга, повышает точность прогностических моделей и обеспечивает раннюю диагностику состояния посевов [5-11]. Почвенный покров был представлен черноземом, аллювиально-луговой и серой лесной почвами. Целью исследования является количественная оценка влияния почвенного типа на спектральные характеристики системы почва – растительность в зависимости от типа почвы. Для этого соответствующие спектрально-биофизические модели, предназначенные для определения растительного покрытия, созданы для каждого почвенного типа в отдельности. Спектрометрические и биометрические данные обработаны статистическим путем. При корреляционном и регрессионном анализе использованы спектральные преобразования (вегетационные индексы) в виде различных отношений измеряемых спектральных коэффициентов отражения, а также цветовые характеристики объектов – цветовые координаты, координаты цветности и доминирующая длина волны. Выведены соотношения, связывающие проективное покрытие растительности с этими спектральными признаками.

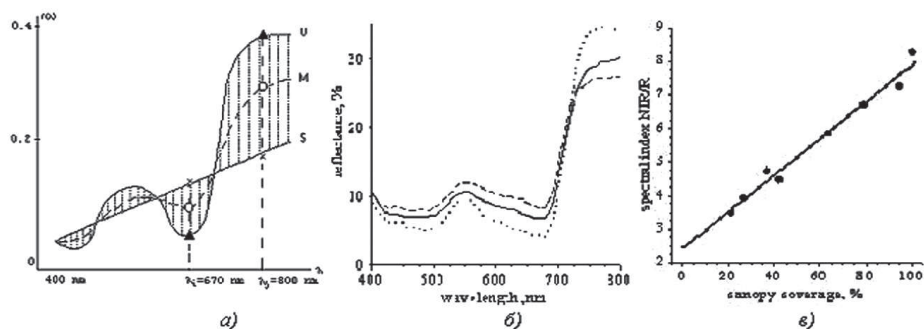


Рис. 1. Спектральные отражательные характеристики почвы $S(x)$, сомкнутого растительного покрова $V(\blacktriangle)$ и смешанного класса почва-растительность $M(\circ)$ – (а); спектральные характеристики посевов ялового ячменя с различным проективным покрытием – (б); зависимость вегетационного индекса NIR/R от растительного покрытия ячменя на лесном сероземе – (в)

Формирование спектральных отражательных характеристик смешанного класса почва – растительность иллюстрируется на рис. 1а, где они показаны для голой почвы $c_v=0$, полностью сомкнутого растительного покрова $c_v=1$ и смешанного класса $0 < c_v < 1$. Влияние

различного растительного покрытия на характеристики спектрального отражения показано также на рис. 1б для ячменя на лесном сероземе. На рис. 1в представлена зависимость индекса NIR/R от проективного покрытия растительности для того же случая.

В Таблице 1 приведены данные корреляционного анализа некоторых вегетационных индексов с проективным покрытием озимой пшеницы на черноземе в фазах колошения и молочной спелости. Большая часть исследованных индексов в значительной степени коррелируют с растительным покрытием, будучи в то же время зависимыми от фенологической фазы растений. Наиболее сильная связь наблюдается во время активного вегетационного развития до восковой спелости у зерновых и для индексов с участием NIR. Для количественного описания выведены эмпирические регрессионные соотношения между проективным растительным покрытием и спектральным отражением система почва – растительность. На рис. 2а показаны зависимости индекса $R/(G+R+NIR)$ от проективного покрытия посевов ячменя для двух типов почв – серой лесной (1) и чернозема (2). Использование обобщенной модели двух почвенных типов приводит к систематическому завышению величин определяемого проективного покрытия при темном черноземе и их понижению при светлом сероземе. Ошибка может быть значительной, особенно в случаях малого растительного покрытия. Учет типа почвы, спектральные характеристики которой варьируют в широких пределах (рис. 2б), значительно повышает прогностическую точность.

Таблица 1 Коэффициенты корреляции между вегетационными индексами (VI) и проективным покрытием посевов озимой пшеницы и чернозема фазы колошения (1) и молочной спелости (2)

VI	1	2	VI	1	2
$(NIR-R)/(NIR+R)$	0.86	0.94	$NIR/(G+R)$	0.97	0.95
NIR/R	0.97	0.96	$R/(NIR+G)$	-0.83	-0.93
$(NIR-G)/(NIR+G)$	0.88	0.88	G/R	0.89	0.86
NIR/G	0.97	0.86	$NIR/(G \cdot R)$	0.90	0.77
$(NIR-R)/NIR$	0.79	0.94	$G/(G+R+NIR)$	-0.94	-0.70
$(NIR-G)/NIR$	0.83	0.81	$NIR/(G+R+NIR)$	0.91	0.95

Таблица 2 Коэффициенты корреляция между покрытием гороха, вегетационными индексами и доминирующей длиной волны для темной, светлой и обеих почв

индекс / почва	темная	светлая	обе
$(NIR-R)/(NIR+R)$	0.95	0.93	0.92
NIR/R	0.91	0.88	0.87
$(NIR-R)/R$	0.91	0.88	0.87
G/R	0.88	0.85	0.86
$(G-R)/R$	0.88	0.85	0.86
$\Sigma G+R /\Sigma(B \div NIR)$	0.85	0.81	0.82
$(G-R)/(G+R)$	0.93	0.92	0.92
$G+NIR-2R$	0.94	0.94	0.94
λ_d	-0.94	-0.91	-0.88

То же наблюдение относится и к фенологической фазе развития, т.е. когда соответствующие зависимости устанавливаются на отдельных этапах развития растений. На рис. 2в показано изменение индекса NIR/R в зависимости от проективного покрытия гороха в двух фазах развития растений. Фенологическое разделение моделей уменьшает дополнительные погрешности, связанные с влиянием других растительных показателей, как например изменяющегося в ходе вегетации и влияющего на спектральные характеристики хлорофилльного содержания. Высокая степень корреляции (в зависимости от вида вегетационных индексов и длин волн) и точность подобных моделей позволяют надежное определение растительного покрытия по спектральным данным.

В качестве другого подхода для оценки зеленого покрытия в работе рассматривается применение цветовых характеристик системы почва – растительность. Их преимущество состоит в комплексном использовании отражательной характеристики и в ее нормировании на спектральное распределение падающей радиации. Колориметрическому анализу подвержены данные наземных спектрометрических измерений посевов ярового ячменя, выращенного на черноземе и серой лесной почвах, и гороха, выращенного на темной каштановой и

светлой аллювиально-луговой почвах. Изменение проективного покрытия растений варьирует от нуля (голая почва) до единицы (сомкнутый растительный покров).

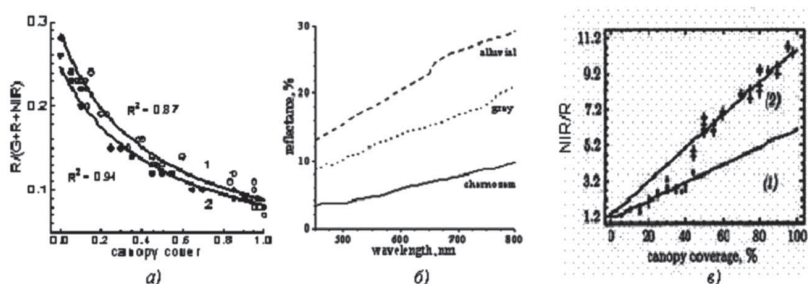


Рис. 2. Зависимости вегетационного индекса $R/(G+R+NIR)$ (а) от растительного покрытия ярового ячменя на сероземе (1) и черноземе (2) и вегетационного индекса NIR/R (в) гороха в двух фенофазах на аллювиально-луговой почве; спектральные отражательные характеристики различных типов почв (б)

На рис. 3а показаны стандартные цветовые функции, используемые при вычислении цветовых характеристик. Для полученной суммы цветовых координат $X+Y+Z$ объектов выведены статистически значимые зависимости от растительного проективного покрытия. Для ячменя на сероземе в периоде кушение – выход в трубку эта зависимость показана на рис. 3б. Ее коэффициент определенности $R^2=0.79$. В отдельных фенофазах корреляция (R^2) выше и составляет соответственно 0.88 и 0.84.

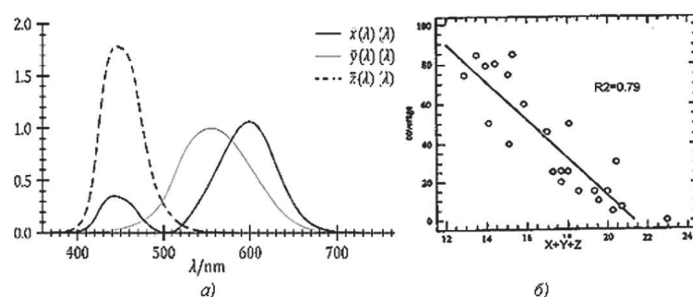


Рис. 3. Стандартные CIE цветовые функции (а) и связь между суммой цветовых координат ячменя на серой лесной почве и проективным покрытием растений в периоде кушение-выход в трубку (б)

В цветовом пространстве цветность объектов выражается в виде точки, определяемой координатами цветности (x, y). Они определяют положение анализируемого объекта на цветовом локусе и, как это видно из формулы (3), зависят от величины растительного покрытия. По данным измерений спектральных характеристик вычислены координаты цветности системы почва – растительность и нанесены на цветовой локус. Кроме того, координатами цветности объекта определяется другая важная цветовая характеристика, а именно доминирующая длина волны λ_d , лежащая в точке пересечения прямой между координатами источника (D65) и объекта с линией спектральной цветности.

На рис. 4а показана часть цветового локуса и расположение в нем координат цветности гороха с покрытием 0; 0,25; 0,5; 0,75 и 1. Учет типа почвы (каштановая лесная и аллювиально-луговая) привел к различным результатам. Доминирующая длина волны плотного растительного покрова одна и та же в обоих случаях, но различается как для двух почв, так и для смешанных классов. Регрессионные зависимости доминирующей длины волны от проективного покрытия растительности показаны на рис. 4б. Установлена высокая корреляция, которая при неучете почвенного типа уменьшается (Табл. 2). Как и в случае вегетационных индексов, лучшая прогностическая точность отмечается у моделей для темных почв.

Использование обобщенной модели приводит к завышенным величинам растительного покрытия в случае светлой почвы и систематически заниженным при темной. Как и у вегетационных индексов, меньшая ошибка наблюдается в случае темной почвы. В этом случае, однако, применение почвенно-обобщенной модели вызывает обратную ситуацию – величины определяемого покрытия выше при темной и ниже при светлой почве (рис. 2а), что дает возможность сравнения и верификации результатов применения рассматриваемых двух методов. Проведенные модельные расчеты проективного покрытия по (1), (2) и (3) показали хорошее соответствие экспериментальным данным.

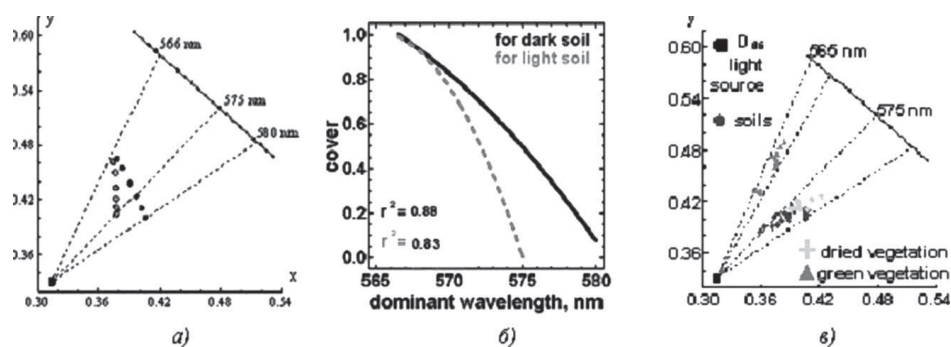


Рис. 4. Координаты цветности гороха с различным проективным покрытием в случаях темной ● и светлой ○ почв (а), регрессионные зависимости между проективным покрытием гороха и доминирующей длиной волны смешанного класса в случаях темной ---- и светлой - - - почв (б), цветовая область сомкнутых растительных покровов и голых почв (в)

На рис. 4в построены цветовые области, иллюстрирующие диапазон изменения доминирующей длины волны различных типов почв и видов плотного растительного покрова. Видно, что этот диапазон гораздо шире у почв, вследствие их больших цветовых различий, тогда как у растительности изменения значительно меньше. Следует отметить, что по результатам проведенного нами анализа увядшая и пожелтевшая растительность (в том числе стерня) попадает в цветовой конус почв. Это означает, что при обработке данных наличие такой растительности интерпретируется как почвенное покрытие, а искомое растительное покрытие относится к зеленой растительной компоненте. В Таблице 2 показаны результаты корреляционного анализа растительного покрытия гороха, доминирующей длины волны и некоторых вегетационных индексов для двух почв. В большинстве случаев связь ослабевает при неучете типа почвы, что заметнее всего для доминирующей длины волны. Результаты проведенного исследования указывают на эффективность обоих подходов, особенно их совместного применения с использованием многофакторных моделей.

Литература

1. Glenn E., A. Huete, P. Nagler and S. Nelson. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape // *Sensors*, 8, pp.2136-2160, 2008.
2. Qi, J., Huete, A.R., Moran, M.S., Chehbouni, A., and Jackson, R.D., Interpretation of Vegetation Indices Derived from Multi-Temporal SPOT Images // *Remote Sens. Environ.* 44: 89-101. 1993.
3. Jiang Z.; A. Huete, J. Chen, Y. Chen; J. Li, G. Yan and X. Zhang. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction // *Remote Sensing of Environment*, 101, pp. 366-378, 2006.

4. *Carlson, T. and D. Ripley.* On the relationship between fractional vegetation cover, leaf area index, and NDVI // *Remote Sensing of Environment*, 62, pp.241-252, 1997.
5. *Kancheva R.* State assessment of the soil-vegetation system using spectrometric data // PhD thesis, (in Bulgarian), pp.142, 1999.
6. *Kancheva R. and D. Borisova.* Ground-based models for remotely sensed data interpretation // *Proceedings of 2nd International Conference "Recent advances in space technologies, Istanbul, Turkey*, pp.79-82, 2005.
7. *Kancheva R. and D. Mishev.* Colorimetric characteristics for detection of plant chlorophyll variations // *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 53 (4), pp.43-46, 2000.
8. *Kancheva R., D. Borisova and D. Mishev.* Plant canopy coverage and colour features // *Compt. Rend. Acad. bulg. Sci.*, 55 (4), pp.55-58, 2002.
9. *Kancheva R. and D. Borisova.* Plant senescence and soil background impact on vegetation reflectance and color features // *Compt. Rend. Acad. bulg. Sci.*, 57 (7), pp.53-58, 2004.
10. *Kancheva R. and D. Borisova.* Colorimetric analysis in vegetation state assessment // *Proceedings of 28th EARSeL Symposium and Workshops "Remote Sensing for a Changing Europe, Istanbul, Turkey, 2-5 June 2008*, pp.151-156, 2009.
11. *Mishev D. and T. Yanev.* A mixed class of natural formations and the compositions of its spectral reflectance characteristic // *Compt. Rend. Acad. bulg. Sci.*, 46 (11), pp. 33-35, 1993.
12. *Мишев Д., Р. Кънчева.* Определение относительной площади, занимаемой посевам, по данным спектрометрических измерений // *Исследование Земли из космоса*, 5, стр.71-75, 1988.
13. *Borisova D. and R. Kancheva.* Rock, soil and vegetation reflectance data analysis for spectral mixture decomposition // *Proceedings of Scientific Conference with International Participation SES'2005, Book I, Publishing House of Technical University, Sofia*, pp.215-220, 2005.
14. *Kancheva R. and D. Borisova.* Spectral unmixing for information extraction // *Proceedings of ISPRS Mid-term Symposium 2006 Remote Sensing: From Pixels to Processes, Enschede, the Netherlands*, http://www.itc.nl/isprsc7/symposium/proceedings/PS01_4.pdf.
15. *Джад Д., Г. Выхецкий,* Цвет в науке и технике // Москва, Мир, 1978.
16. *Mishev D.* Colour coordinates of a mixed class // *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 45 (3), pp.51-54, 1992.

Endmember decomposition techniques from soil-vegetation mixture reflectance

R. Kancheva, D. Borisova, G. Georgiev

*Space and Solar-Terrestrial Research Institute - Bulgarian Academy of Sciences
Acad.G.Bonchev sr., bl.3, 1113 Sofia, Bulgaria*

The problem of mixed classes is essential in remote sensing and concerns most aspects of data processing and interpretation. It is associated with the decomposition of present in a multispectral scene endmembers. The determination of the endmember fractions from a spectral mixture is an essential issue in various applications of remotely sensed data. Soil-vegetation land covers are typical examples and most common case of mixed classes and spectral mixtures. Canopy coverage (vegetation fraction) defines, on the one hand, the reflectance of a soil-vegetation mixture and, on the other, it is an important bioindicator of agricultural crop state and growth. As such plant remote sensing monitoring is closely related to the vegetation amount estimation. The actual usefulness of the applied methods depends on their accuracy and prediction reliability. Two methods that provide means for green canopy fraction evaluation are presented in the paper: reflectance spectra transformations techniques and colorimetric analysis. The objective is to present and compare these techniques for decomposition of soil-vegetation mixture reflectance aiming at green vegetation fraction estimation from multispectral data.

Keywords: spectral reflectance, vegetation indices, colorimetric analysis, soil-vegetation mixture, green canopy fraction, spectral mixture decomposition.