

УДК 681.518.3

Касумов В.А., д.т.н.,
orcid.org/0000-0003-3192-4225,
Алиева К.Дж.,
orcid.org/0000-0003-3924-7951

ДОСТОВЕРНОСТЬ КОМПЛЕКСНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНО-ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ЛИСТЬЯХ РАСТЕНИЙ

Азербайджанский Технический Университет, Азербайджан

gasumov@yahoo.com
k_aliyeva_ba@mail.ru

Введение

В настоящее время в основном установлены состав и структура фотосинтетического аппарата растений, а также исследованы механизмы отдельных реакций фотосинтеза, начиная от поглощения света и кончая биохимическими реакциями синтеза углеводов. В последние годы для изучения структурной организации и аспектов функционирования фотосинтетического аппарата растений активно используются флуоресцентные методы. Среди них – метод, основанный на регистрации спектров флуоресценции листьев растений, а также метод импульсной флуориметрии. При этом взаимосвязи флуоресцентных параметров с физиологическими характеристиками растения остаются до конца не выясненными. Важной задачей является установление данных взаимосвязей, что поможет усовершенствовать не инвазивные методы экспресс-оценки физиологического состояния растений и увеличить точность интерпретации полученных данных.

Описание системы и постановка задачи

Хорошо известно [1-2], что флуоресцентные методы анализа позволяют оценить состояние здоровья растительности, и мало чувствительны к воздействию внешних факторов. Согласно [3], интенсивность флуоресцентного излучения хлорофилла растения хорошо отображает как фотосинтетическую активность растения,

так и концентрацию хлорофилла. Как указывается в работах [4-6] стрессовое состояние растительности может быть обнаружено с помощью флуоресцентного излучения хлорофилла в красной и синей областях спектра электромагнитного излучения Солнца.

Согласно [7] флуоресцентные индексы обычно выражаются в виде отношения излучений на двух разных длинах волн, где на первой длине волны интенсивность флуоресцентной эмиссии максимально зависит от степени стресса растения, а на второй длине волны практически такой зависимости нет. В качестве примера можно показать индекс RF/FRF (где RF – флуоресцентный сигнал в красной зоне; FRF – флуоресцентный сигнал в дальней красной зоне), который используется для оценки содержания хлорофилла в растении. При этом уменьшение стресса в растении приводит к повышению значения RF/FRF.

В работе [8] отмечается нелинейный характер зависимости индекса RF/FRF от содержания хлорофилла в растениях с характерной областью насыщения. Вместе с тем, стрессовое состояние растений также успешно изучается с помощью гиперспектральной техники [9-10]. Существует определенное количество гиперспектральных индексов, позволяющих количественно охарактеризовать состояние здоровья растительности.

Метод расчета

Очевидно, что все существующие вегетационные индексы, в том числе флуоресцентные и гиперспектральные индексы должны быть сравнены между собой для выбора наиболее информативных и удобных для использования индексов.

В работе [11] была сделана попытка определить наиболее информативных флуоресцентных и гиперспектральных индексов, с помощью которых наиболее достоверно можно было бы определить значение содержания хлорофилла в растениях. В [11] применение различных методов статистической обработки результатов измерений, в том числе метода «поддерживающей векторной машины» (SVM) привело к заключению о том, наиболее достоверным из флуоресцентных индексов следует считать $BFRR/UV$, а среди гиперспектральных индексов $OCAVI$. Дадим краткие сведения об этих индексах. Формально формула индекса $BFRR/UV$ имеет следующий вид [11]

$$BFRR/UV = \frac{BGF_{UV}}{RFR_{UV}} \quad (1)$$

Формула (1) означает, что для вычисления значения индекса $BFRR/UV$ следует осуществить излучение растительности ультрафиолетовой радиацией, затем измерить флуоресцентное излучение в синем диапазоне, далее в далеком красном диапазоне и вычислить отношение (1).

Гиперспектральный индекс $OCAVI$ согласно [11] определяется следующим образом

$$OCAVI = (1 + 0,16) \cdot \frac{(R_{800} - R_{670})}{(R_{800} + R_{670} + 0,16)} \quad (2)$$

где R_λ означает отраженный сигнал на длине волны λ , где $\lambda = (800нм; 670нм)$.

На рис.1 и 2 приведены модельные кривые зависимости индексов $BFRR/UV$ и $OCAVI$ от содержания хлорофилла в листьях растительности. Модельные кривые представленные на рис. 1 и 2 составлены на базе экспериментальных скатерограм, приведенных в [11]. Как видно из рис.1 и 2 кривые функций $f(x)$ и $\phi(x)$ имеют взаимно-инверсный характер.

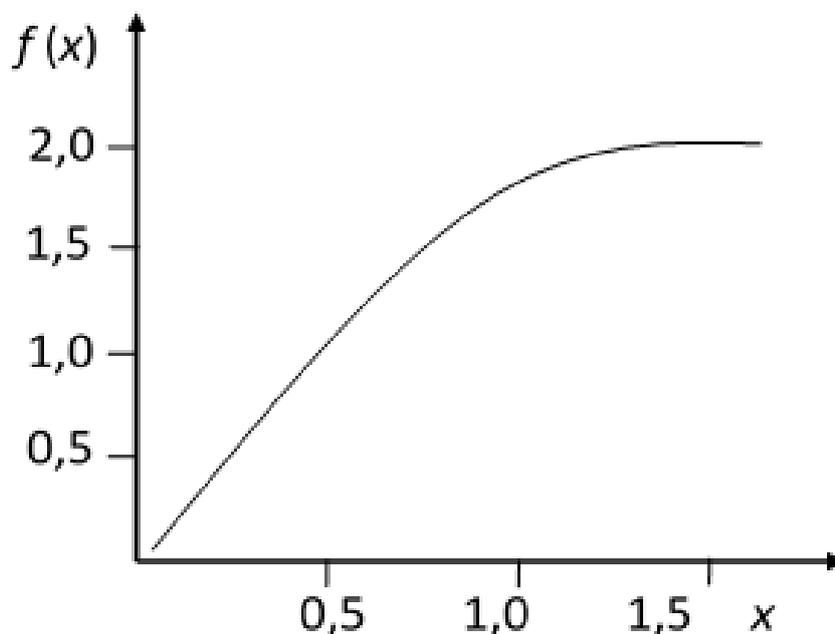


Рис. 1. Модельная кривая функции $y_1 = f(x)$

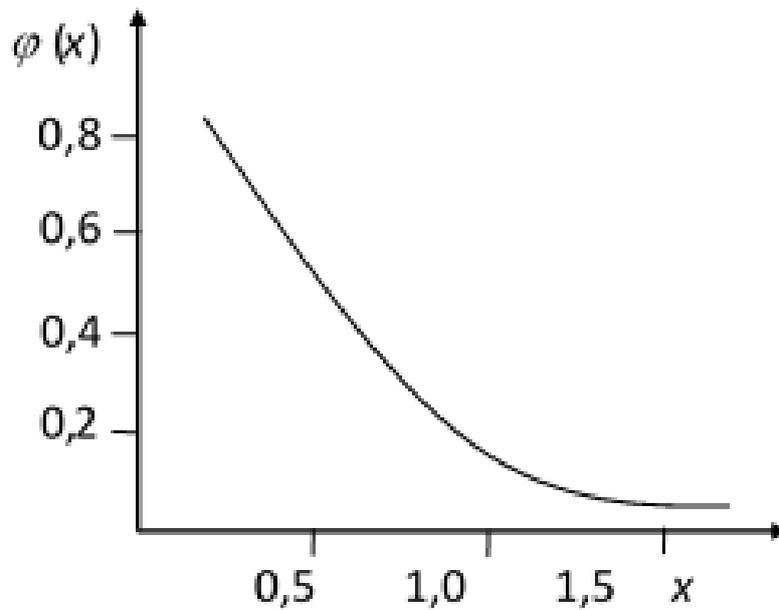


Рис. 2. Модельная кривая функции $y_2 = \phi(x)$

Далее, для упрощения математических выкладок считаем, что достоверности оценок $f(x)$ и $\phi(x)$ пропорциональны значениям этих индексов. Это условие базируется на предположении наличия одинаковых по величине шумов в двух измерительных системах, осуществляющих флуоресцентное и гиперспектральное измерения.

Покажем, что если для повышения достоверности полученных результатов количество хлорофилла в растениях должно быть исследовано методами как отражательной спектрометрии, так и флуоресцентной спектрометрии, то должно быть принято во внимание взаимно инверсный характер соответствующих характеристик [11].

С учетом важности результатов по обоим методам, могут быть использованы методы многокритериальной оптимизации. Сначала рассмотрим вопрос о взаимосвязи линейно-сверточных и мультипликативных критериев оптимизации применительно к случаю рассмотрения взаимно инверсных характеристик $y_1 = f(x)$ и $y_2 = \phi(x)$, где y_1 и y_2 – используемые взаимно-инверсные критерии, зависящие от аргумента x .

Модельные кривые функций $y_1 = f(x)$ и $y_2 = \phi(x)$ показаны на рис.1. Далее, считаем, что взаимно-инверсный характер $y_1 = f(x)$ и $y_2 = \phi(x)$ означает выполнение следующего условия

$$\alpha_1 \cdot f(x) + \alpha_2 \phi(x) = C_1, \quad (3)$$

где $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$; $C_1 = const$.

Условие (3) запишем как

$$[\alpha_1 \cdot f(x) + \alpha_2 \phi(x)]^2 = C_1^2 - C_2; \quad C_2 = const \quad (4)$$

Выражение (4) запишем как

$$\frac{\alpha_1^2}{2\alpha_1 \cdot \alpha_2} \cdot f^2(x) + f(x) \cdot \phi(x) + \frac{\alpha_2^2}{2\alpha_1 \cdot \alpha_2} \cdot \phi^2(x) = C_3, \quad (5)$$

где

$$C_3 = \frac{C_2}{2\alpha_1 \cdot \alpha_2}.$$

Покажем, что произведение $f(x) \cdot \phi(x)$ с учетом условия (3) достигает максимума в точке x_0 , где $f(x_0) = \phi(x_0)$. Из условия взаимной инверсности $f(x)$ и $\phi(x)$, а также нормированности суммы $f(x) + \phi(x)$ единицей имеем

$$f(x) = 1 - \phi(x).$$

В этом случае получим:

$$f(x) \cdot \phi(x) = \phi(x) \cdot [1 - \phi(x)] = \phi(x) - \phi^2(x).$$

Исследуем последнее выражение на максимум от $\phi(x)$. Имеем

$$\frac{d[f(x)\phi(x)]}{d\phi(x)} = 1 - 2\phi(x) = 0$$

или

$$\phi(x_0) = 0,5.$$

Следовательно,

$$f(x_0) = \phi(x_0) = 0,5.$$

Нетрудно проверить, что $\frac{d^2[f(x)\phi(x)]}{d\phi(x)^2}$ является отрицательной величиной, т.е. $f(x) \cdot \phi(x)$ в точке x_0 достигает максимума.

Из выражения (5) получим, что в точке x_0 выражение

$$y_1 = \frac{\alpha_1^2}{2\alpha_1 \cdot \alpha_2} \cdot f^2(x_0) + \frac{\alpha_2^2}{2\alpha_1 \cdot \alpha_2} \cdot \phi^2(x_0) \quad (6)$$

должна достигать минимума.

Выражение (6) перепишем как

$$y_1 = \left[\frac{\alpha_1 \cdot f(x_0)}{2\alpha_2} \right] f(x_0) + \left[\frac{\alpha_2 \cdot \phi(x_0)}{2\alpha_1} \right] \phi(x_0) \quad (7)$$

Однако, в силу линейно-сверточного представления многокритериальной задачи оптимизации должно быть удовлетворено условие

$$\frac{\alpha_1}{2\alpha_2} f(x_0) = \beta_1, \quad (8)$$

$$\frac{\alpha_2}{2\alpha_1} \phi(x_0) = \beta_2 = 1 - \beta_1, \quad (9)$$

Очевидно, что из-за взаимно инверсного характера $f(x)$ и $\phi(x)$ при нормировании максимального значения этих функций единицей получим

$$f(x_0) = \phi(x_0) = 0,5. \quad (10)$$

С учетом (8)-(10) имеем

$$\frac{\alpha_1}{4\alpha_2} = \beta_1, \quad (11)$$

$$\frac{\alpha_2}{4\alpha_1} = \beta_2 = 1 - \beta_1. \quad (12)$$

Из выражений (11) и (12) имеем

$$\frac{\alpha_1}{4\alpha_2} + \frac{\alpha_2}{4\alpha_1} = 1 \quad (13)$$

или

$$\frac{1}{4\alpha_2/\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{4\alpha_1} = 1. \quad (14)$$

Обозначим $\alpha_2/\alpha_1 = z$. Из (14) получаем следующее уравнение

$$\frac{1}{4z} + \frac{z}{4} = 1. \quad (15)$$

Выражение (15) перепишем как

$$0,25 + z^2 \cdot 0,25 - z = 0. \quad (16)$$

Решение квадратичного уравнения (16) обозначим d . Получаем систему уравнение относительно α_1 и α_2 .

$$\alpha_2 + \alpha_1 = 1,$$

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = d.$$

После вычисления α_1 и α_2 с учетом выражений (11) и (12) можно также вычислить значения β_1 и β_2 .

Таким образом, показано, что при взаимно-инверсном характере $f(x)$ и $\phi(x)$, с учетом условия (3) оценка содержания хлорофилла в растении может быть осуществлена по двум эквивалентным комплексным критериям, отображающих комплексную итоговую оценку достоверности результата проводимых измерений

$$F_1 = f(x) \cdot \phi(x), \quad (17)$$

$$F_2 = \beta_1 \cdot f(x) + \beta_2 \cdot \phi(x). \quad (18)$$

При этом в определенной точке x_0 F_1 достигает максимума, F_2 достигает минимума, а значение x_0 зависит от конкретного вида $f(x)$ и $\phi(x)$.

Вышеприведенный анализ позволяет сделать заключение о том, что при наличии взаимно-инверсных критериев и при необходимости осуществления многокритериальной оптимизации результирующей достоверность оценки могут быть использованы как линейно-сверточный, так и мультипликативный комплексный многокритериальный метод оптимизации. При этом оптимальная точка в этих двух комплексных критериях совпадает, однако линейно-сверточный критерий в оптимальной точке достигает максимума. Общий характер полученного результата позволяет применить критерий типа (17) и (18) для оптимизации совместного использования флуоресцентных и гиперспектральных индексов для определения стрессового состояния растительности с высокой достоверностью.

Выводы

В заключение сформулируем основные выводы и заключения проведенного исследования:

1. Сформулирована задача многокритериальной оценки стрессового состояния растительности с высокой достоверностью с использованием флуоресцентных и гиперспектральных индексов.

2. Показано, что при взаимно-инверсном характере используемых частных

критериев для решения задачи мультикритериальной оптимизации могут быть использованы как линейно-сверточные, так и мультипликативные индексы.

3. Показано, что в единой оптимальной точке мультипликативный комплексный индекс достигает максимума достоверности измерения, а линейно сверточный индекс достигает минимума.

Литература

1. Tremblay N., Wang Z., Cerovic Z.G. Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators // A review. – Agron. Sustain. Dev. 2012. – Vol. 32. – P. 451-464.

2. Chappelle E.W., Wood F.M., McMurtrey J.E.III, Newcomb W.W. Laser-induced fluorescence of green plants. 1: A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation // Appl. Opt. – 1984. – Vol. 23. – P. 134-138.

3. Chappelle E.W., Wood F.M., McMurtrey J.E.III, Newcomb W.W. Laser-induced fluorescence of green plants. 2: LIF caused by nutrient deficiencies in corn // Appl. Opt. – 1984. – Vol. 23. – P. 139-142.

4. Lichtenthaler H.K. Vegetation stress: An introduction to the stress concept in plants // J. Plant. Physiol. – 1996. – Vol. 148. – P. 4-14.

5. Lang M., Lichtenthaler H.K., Sowinska M., Heisel F., Miehe J.A. Fluorescence imaging of water and temperature stress in plant leaves // J. Plant. Physiol. – 1996. – Vol. 148. – P. 613-621.

6. Leufen G., Noga G., Hunsche M. Physiological response of sugar beet (*Beta vulgaris*) genotypes to a temporary water deficit, as evaluated with a multiparameter fluorescence sensor // Acta Physiol. Plant. – 2013. – Vol. 35. – P.1763-1774.

7. Buschmann C. Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves // Photosynth. Res. – 2007. – Vol.92. – P.261-271.

8. Gitelson A.A., Buschmann C., Lichtenthaler H.K. The chlorophyll fluorescence ratio F735/F700 as an accurate measure of the chlorophyll content in plants // Remote Sens. Environ, 1999. – Vol. 69. – P. 296-302.

9. Agati G., Foschi L., Guglieminetti L., Cerovic Z.G., Volterrani M. Fluorescence-based versus reflectance proximal sensing of nitrogen content in *Paspalum vaginatum* and *Zoysia matrella* turfgrasses // Eur. J. Agron, 2013. – Vol.45. – P.39-51.

10. Delalieux S., Auwerkerken A., Verstraeten W., Somers B., Valcke R., Lhermitte S., Keulemans J., Coppin P. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging to detect scab induced stress in apple leaves // Remote Sens, 2009. – №.1. – P. 858-874.

11. Yu K., Leufen G., Hunsche M., Noga G., Chen X., Bareth G. Investigation of leaf diseases and estimation of chlorophyll concentration in seven barley varieties using fluorescence and hyperspectral indices // Remote Sens, 2014. – №.6. – P.64-86.

Касумов В.А., Алиева К.Дж.

ДОСТОВЕРНОСТЬ КОМПЛЕКСНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНО-ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ЛИСТЯХ РАСТЕНИЙ

Анализ параметров флуоресценции хлорофилла представляет собой мощный инструмент изучения воздействия самых разнообразных экологических факторов на растительные организмы. Химические факторы и климатические условия, часто являясь ингибиторами и активаторами биоэнергетических процессов, протекающих в тилакоидах растительных клеток, способны оказывать выраженное влияние на параметры кинетики и спектральные особенности флуоресценции, а также на её стационарный уровень. Исследования кинетики флуоресценции могут дать важную информацию, касающуюся характера активности фактора внешней среды по воздействию на параметры фотосинтеза – применимую в целях экологического мониторинга, а также в целях оценки устойчивости растений.

Дифференциальные измерения параметров флуоресценции хлорофилла гораздо меньше зависят от реадсорбции красного света, если учитывается кинетика флуоресценции. Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Индексы этой группы отражают общее количество растительности и используются для оценки ее состояния при решении широкого круга задач. Они обобщают и отражают влияние таких факторов, как содержание хлорофилла, площадь поверхности листьев, плотность и структура растительности. Основной целью этих показателей является картирование растительного покрова, выявление территорий, покрытых и не покрытых растительностью, оценка и мониторинг состояния растительного покрова. Использование значений коэффициентов отражения в узких спектральных зонах позволяет использовать индексы для регистрации даже небольших изменений состояния растительности.

Gasimov V.A., Aliyeva K.J.

RELIABILITY OF COMPLEX INDEXES FOR FLUORESCENT-HYPERSPECTRAL METHOD FOR ASSESSING CHLOROPHYLL CONTENT IN PLANT LEAVES

Analysis of chlorophyll fluorescence parameters is a powerful tool for studying the effects of a wide variety of environmental factors on plant organisms. Chemical factors and climatic conditions, often being inhibitors and activators of bioenergetic processes occurring in the thylakoids of plant cells, are capable of exerting a pronounced effect on the kinetic parameters and spectral features of fluorescence, as well as on its stationary level. Studies of the kinetics of fluorescence can provide important information regarding the nature of the activity of the environmental factor to influence the parameters of photosynthesis – applicable for the purposes of environmental monitoring, as well as for assessing plant resistance.

Differential measurements of chlorophyll fluorescence parameters are much less dependent on red light reabsorption if the fluorescence kinetics is taken into account. The calculation of most of the vegetation indices is based on the two most stable (independent of other factors) sections of the spectral reflectance curve of plants. The red zone of the spectrum has the maximum absorption of solar radiation by chlorophyll, and the near infrared zone has the maximum reflection of energy by the cellular structure of the leaf. The indices of this group reflect the total amount of vegetation and are used to assess its condition in solving a wide range of problems. They summarize and reflect the influence of factors such as chlorophyll content, leaf surface area, density and structure of vegetation. The main purpose of these indicators is to map the vegetation cover, identify areas covered and not covered with vegetation, assess and monitor the state of the vegetation cover. The use of reflectance values in narrow spectral zones allows the use of indices to register even small changes in the state of vegetation.