

Новый метод определения общего содержания хлорофилла в кроне растений

© 2016. И. Г. Абдурахманова, нач. отд.,
Национальное аэрокосмическое агентство,
AZ 1115, Азербайджан, г. Баку, ул. Ахундова, стр. 1,
e-mail: irada.abdurrahmanova@mail.ru

В общем случае хлорофилл в листьях может быть определен с учётом спектра отражения, так как красный участок спектра сильно поглощается хлорофиллом. Однако изменения в красной области спектра отражения в расчёте на единицу измерения хлорофилла при увеличении содержания хлорофилла малы. Рост LAI приводит к увеличению содержания хлорофилла в кроне независимо от изменений среднего содержания хлорофилла в листьях. Хлорофилл *a* и *b* поглощают меньше радиации в зелёном спектральном диапазоне, а также в диапазоне «Red edge». Индексы «Chl-G» и «Chl-Re» являются более чувствительными к изменению значения содержания хлорофилла в листьях, так как в них используются зелёные и красные диапазоны. Триангулярный вегетационный индекс (TGI), вычисляемый по треугольнику с узловыми точками (λ_n, R_n) , (λ_r, R_r) и (λ_g, R_g) , где R_n является коэффициентом отражения в ближнем инфракрасном диапазоне; λ_n , λ_r и λ_g являются центральными длинами волн в ближнем инфракрасном, красном и зелёном диапазонах соответственно, имеет существенно различные зависимости от содержания хлорофилла *a+b* и от индекса листовой площади. В статье исследуется возможность определения временного максимума общего содержания хлорофилла в кроне растений с помощью триангулярного вегетационного индекса. Получена формула для определения суммарного количества хлорофилла в кроне применительно к моменту стыка вегетационного и репродуктивного циклов в фенологии растений. Показано, что произведение $Chl \times LAI$ имеет максимум от триангулярного вегетационного индекса TGI. При этом имеет место совпадение максимума $Chl \times LAI$ от индекса TGI с максимумом $Chl \times LAI$ от текущего времени фенологического цикла T_{fen} . Следовательно, экстремальное значение общего содержания хлорофилла в кроне растений в вегетационном цикле может быть определено с помощью индекса TGI. Показано, что при этом достигается существенное упрощение измерительных процедур, и достаточным в этих целях является измерение индекса TGI во временной последовательности вегетационного цикла или нормализованной разницы измеренных спектральных значений в двух диапазонах.

Ключевые слова: растительность, хлорофилл, спектр, вегетационный индекс, дистанционное зондирование, триангулярный индекс.

New method of determination of total amount of chlorophyll in the vegetation crown

I. H. Abdurrahmanova,
National Aerospace Agency,
1 Akhundov str., Baku, Azerbaijan, AZ1115,
e-mail: irada.abdurrahmanova@mail.ru

Commonly the amount of chlorophyll in leaves can be determined taking into account the reflection spectrum, because the red zone of spectrum is strongly absorbed by chlorophyll. But changes in the red zone of reflection spectrum are low if calculated per unit of chlorophyll measurement upon increase of chlorophyll content. The increase of LAI index leads to increase of content of chlorophyll in the vegetation crown independently from changes of the average amount of chlorophyll in leaves. Chlorophyll *a* and *b* absorb less radiation in green spectral zone, as well as in and the «red edge» band. The indices «Chl-G» and «Chl-Re» are more sensitive to changes of leaves chlorophyll content because these indices use green and red spectral zones. Triangular vegetation index (TGI), calculated using a triangle with node points (λ_n, R_n) , (λ_r, R_r) и (λ_g, R_g) , R_n is a reflectance coefficient in the near infrared band, λ_n , λ_r and λ_g are accordingly central wavelengths in near infrared, red and green bands, is characterized by a significantly different dependence on chlorophyll content *a+b* and on leaf area index. The paper studies the possibility of determination of temporal maximum of total amount of chlorophyll in the vegetation crown with the help of triangular vegetation index. The formula for determination

of total amount of chlorophyll in the crown in application to time point of juncture of vegetation and reproduction cycles in the vegetation phenology is derived. It is shown that product $Chl \times LAI$ has a maximum of the triangular vegetation index TGI. At the same time the maximums of $Chl \times LAI$ depending on TGI coincides with the maximum of $Chl \times LAI$ in dependence of current time of phenology cycle T_{fen} . Therefore, the extremum value of total content of chlorophyll in the vegetation crown during the vegetational cycle can be calculated using TGI index. It is shown that it can simplify significantly the measuring procedures and for that purpose it would be enough to measure the TGI index in the temporal sequence of vegetational cycle or normalized difference of measured spectral values in two spectral bands.

Keywords: vegetation, chlorophyll, spectrum, vegetation index, remote sensing, triangular index.

С развитием спутниковых систем дистанционного зондирования одним из приоритетных направлений исследования земного покрова стал дистанционный мониторинг состояния растительных массивов. С этой целью в настоящее время используется большое количество вегетационных индексов [1–8]. Одним из таких индексов является триангуляционный вегетационный индекс (TGI), широко используемый для исследования общего содержания хлорофилла ($a+b$) в листьях, а также индекса листовой площади (LAI).

В настоящей статье мы рассмотрим возможность определения с помощью индекса TGI экстремальной величины общего содержания хлорофилла в кроне растений в вегетационном цикле. Важность такого исследования заключается в том, что при этом достигается существенное упрощение измерительных процедур и взамен временных измерений LAI и содержания хлорофилла в листьях оказывается достаточным измерение индекса TGI во временной последовательности вегетационного цикла.

Как сообщается в работе [1], первый спутниковый относительный вегетационный индекс (RVI) и нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI) были предложены для ослабления влияния атмосферы при оценке состояния вегетации. В дальнейшем появилось множество других индексов, которые основывались на вычислении отношения или нормализованной разницы измеренных спектральных значений в двух диапазонах.

Следует отметить, что все используемые вегетационные индексы рассчитываются с учётом спектральных отражательных и поглощающих способностей растительности. При этом рассматриваются спектральные свойства как отдельных листьев, так и всей кроны растения.

На отражательную способность кроны растительности влияют LAI, ориентация листьев. При этом содержание хлорофилла в листьях может быть определено с учётом

спектра отражения листьев. Известно, что красный участок спектра сильно поглощается хлорофиллом. При увеличении содержания хлорофилла изменения в красной области спектра отражения в расчёте на единицу измерения хлорофилла достаточно малы. При росте LAI содержание хлорофилла в кроне увеличивается независимо от изменений среднего содержания хлорофилла в листьях [1]. Согласно [2], NDVI хорошо коррелирует с содержанием хлорофилла в значении LAI. Хлорофиллы a и b поглощают меньше радиации в зелёном спектральном диапазоне, а также в диапазоне «Red edge» (край красного перехода). По этой причине чувствительность индексов, использующих зелёные или красные диапазоны, таких как хлорофильные индексы «Chl-G» и «Chl-Re», являются более чувствительными к изменению значения содержания хлорофилла в листьях [3].

Следует отметить, что в технике спутникового дистанционного зондирования достаточно широко применяется такой показатель, как общее количество хлорофилла в кроне растений.

Как отмечается в работе [4], общее количество хлорофилла в кроне растений увеличивается в течение вегетационного периода роста растений и, достигнув максимума, начинает убывать в периоды репродуктивности и увядания (senescence) (рис. 1).

Согласно работе [5], общее количество хлорофилла в кроне растений определяется по формуле:

$$Chl_c = Chl_v \times green LAI \quad (1),$$

где Chl_v – содержание хлорофилла в верхних листьях кроны; $green LAI$ – индекс LAI для кроны, содержащей зелёные листья. Согласно рисунку 1, максимум содержания хлорофилла в кроне соответствует к моменту стыка вегетационных и репродуктивных периодов, когда все листья кроны с большой вероятностью являются зелёными. С учётом вышесказанного формула (1) может быть записана как:

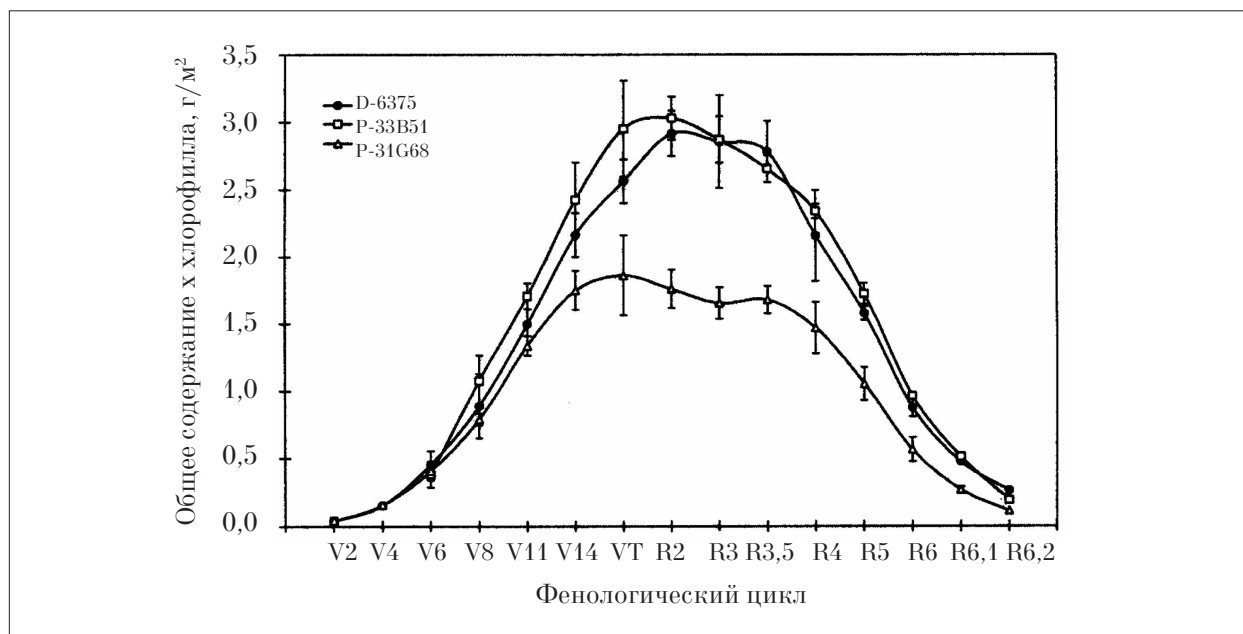


Рис. 1. Кривые изменения общего содержания хлорофилла в кроне растений (в расчете на единицу площади на земле) для трёх видов кукурузы (D-6375; P-33B51; P-31G68) [4]

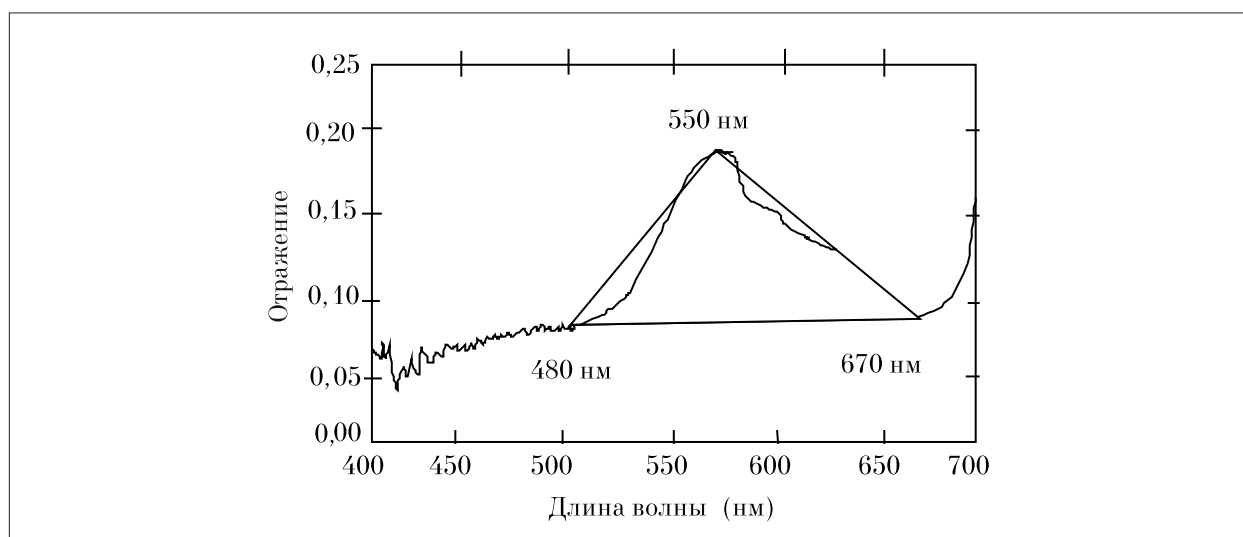


Рис. 2. Графическое определение треугольного вегетационного индекса [1]

$$Chl_c = Chl_v \times LAI \quad (2)$$

Следует отметить, что с точки зрения применения средств дистанционного зондирования для изучения состояния вегетации переход на временную точку максимума Chl_c вполне оправдан, так как в этом случае достигается максимальное отношение «сигнал/шум».

Далее мы рассмотрим возможность определения Chl_c косвенным путём, без измерения Chl_v и LAI , путём оценки по величине треугольного вегетационного индекса.

Отметим, что в работе [6] был предложен треугольный вегетационный индекс (TGI),

который основывается на треугольнике с узловыми точками (λ_n, R_n) , (λ_r, R_r) и (λ_g, R_g) , где R_n является коэффициентом отражения в ближнем инфракрасном диапазоне; λ_n , λ_r и λ_g являются центральными длинами волн в ближнем инфракрасном, красном и зелёном диапазонах соответственно (рис. 2).

Согласно работе [1] треугольный индекс определяется следующим образом:

$$TGI = -0,5 [(\lambda_{670} - \lambda_{480})(R_{670} - R_{550}) - (\lambda_{670} - \lambda_{550})(R_{670} - R_{480})], \quad (3)$$

где использованы следующие узловые точки соответствующего треугольника $(\lambda_r,$

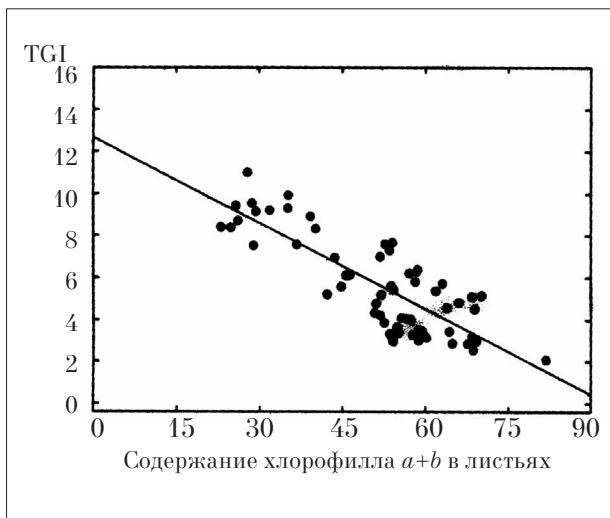


Рис. 3 А. Графическая интерпретация зависимости индекса TGI от содержания хлорофилла *a* и *b* в листьях [1]

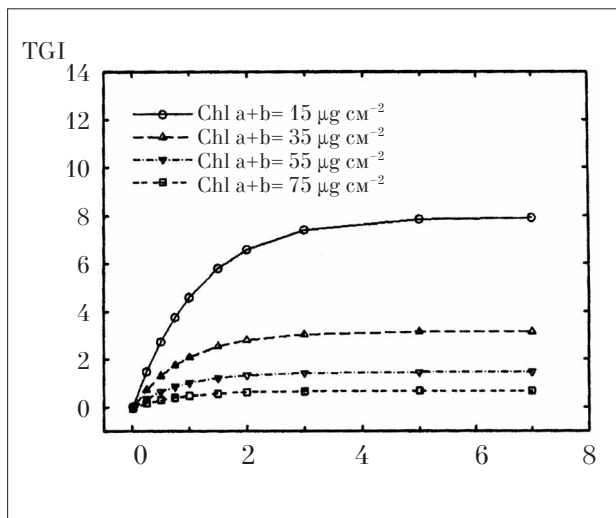


Рис. 3 Б. Зависимость TGI от индекса площади листьев [1]

R_r), (λ_g, R_g) , (λ_b, R_b) , где R_b является коэффициентом отражения, λ_b – центральной длиной волны в синем диапазоне.

Как показано в работе [1], зависимость TGI от содержания хлорофилла *a* + *b* в листьях TGI и зависимость TGI от индекса листовой площади (LAI) существенно различны (рис. 3 А и рис. 3 Б).

Зависимость индекса TGI от LAI [1] вычислена на основе модели SAIL (модель листьев с произвольным наклоном). Парафазное изменение LAI и $Chl(a+b)$ также отмечается в работе [7], что показано на рисунке 4.

Покажем, что произведение $Chl(a+b) \cdot LAI$ имеет максимум от TGI и при линейной зависимости TGI от текущего времени в течение вегетационного цикла этот максимум совпадает с максимумом общего содержания хлорофилла в кроне.

Зависимость $LChl(a+b)$ от TGI, согласно графику, представленному на рисунке 3 А, будет аппроксимироваться прямой линией, т. е.:

$$LChl(a+b) = A - b \cdot TGI, \tag{4}$$

где $A, b = const$.

Зависимость индекса TGI от LAI будем аппроксимировать следующей функцией:

$$TGI = e^{LAI} - 1 \tag{5}$$

Из выражения (5) получим:

$$LAI = \ln(TGI+1) \tag{6}$$

Рассмотрим произведение $Chl(a+b) \cdot LAI$.

Имеем:

$$\gamma = Chl(a+b) \cdot LAI = (A - b \cdot TGI) \cdot \ln(TGI+1) \tag{7}$$

Исследуем γ на экстремум от TGI.

Имеем:

$$\frac{d\gamma}{d(TGI)} = -b \cdot \ln(TGI+1) + \frac{(A - b \cdot TGI)}{TGI+1} \tag{8}$$

Приравнивая правую сторону выражения (8) к нулю, получаем следующее трансцендентное уравнение:

$$\ln(TGI+1) = \frac{A/b - TGI}{TGI+1} \tag{9}$$

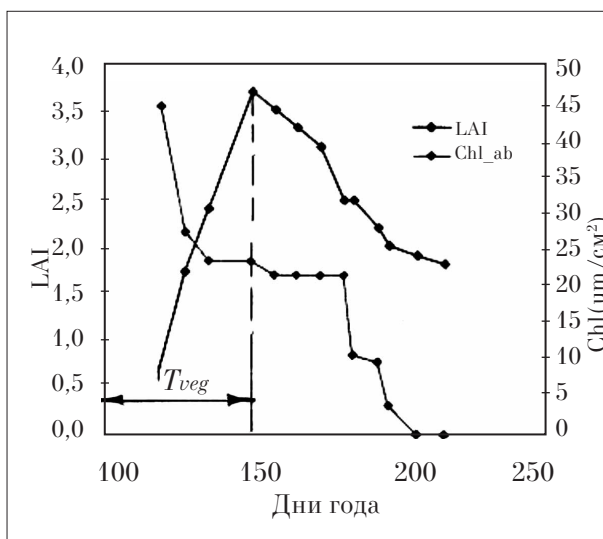


Рис. 4. Противофазное изменение LAI и $Chl(a+b)$ во времени в течение вегетационного цикла [7]

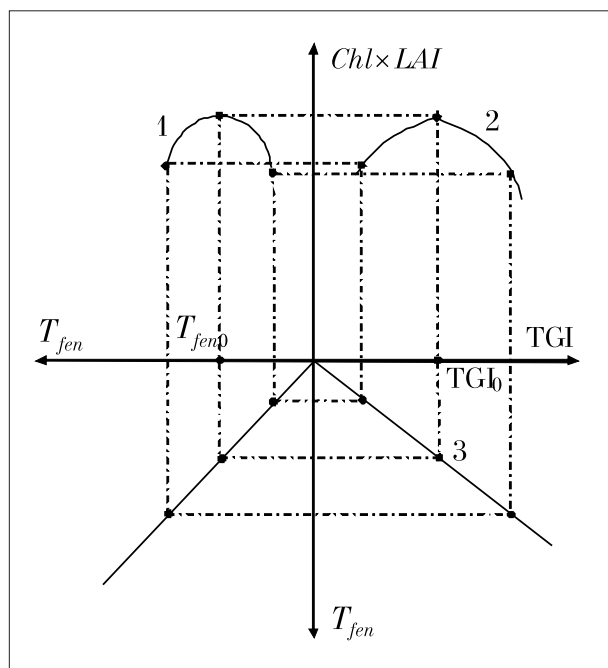


Рис. 5. Графическая иллюстрация совпадения максимумов произведения $Chl \times LAI$ от TGI и текущего времени фенологического цикла T_{fen} при наличии линейной связи TGI и T_{fen}

Для выяснения типа экстремума (минимум или максимум) вычислим $\frac{d^2\gamma}{d(TGI)^2}$.

Имеем:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\gamma}{d(TGI)^2} &= -\frac{b}{TGI+1} - \frac{(-b)(TGI+1) - (A-bTGI)}{(TGI+1)^2} = \\ &= -\frac{2b}{TGI+1} - \frac{A-bTGI}{(TGI+1)^2} \end{aligned} \quad (10).$$

Так как $A - bTGI$ в рассматриваемом контексте всегда является положительной величиной, то согласно (10) величина $\frac{d^2\gamma}{d(TGI)^2}$ всегда отрицательна, что указывает на наличие максимума γ от TGI .

Покажем, что при наличии линейной зависимости TGI от текущего времени, в течение вегетационного периода максимум показателя γ от TGI соответствует максимуму суммарного количества хлорофилла в кроне в зависимости от времени. Указанный факт графически иллюстрируется на рисунке 5. Следует отметить, что указанное совпадение максимумов сохраняет однозначность при наличии монотонной возрастающей зависимости между TGI и T_{fen} .

Таким образом, показана возможность использования треугольного вегетацион-

ного индекса для определения временного максимума общего содержания хлорофилла в кроне растений.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Предложена новая формула для определения суммарного количества хлорофилла в кроне применительно к моменту стыка вегетационного и репродуктивного циклов в фенологии растений.

2. Показано, что произведение $Chl \times LAI$ имеет максимум от треугольного вегетационного индекса TGI .

3. Показано совпадение максимума $Chl \times LAI$ от индекса TGI и максимума $Chl \times LAI$ от текущего времени фенологического цикла T_{fen} . Такое совпадение позволяет существенно сократить количество необходимых операций для вычисления $Chl \times LAI$.

References

- Hunt E.R., Daughtry C.S., Eitel J.U.H., Long D.S. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index // *Agronomy journal*. 2011. V. 103. Issue 4. P. 1090–1099.
- Daughtry C.S.T., Warthall C.I., Kim M.S., de Colstoun E.B., McMurtrey J.F. Estimating leaf chlorophyll concentration for leaf and canopy reflectance // *Remote Sens. Environ.* 2000. V. 74. P. 229–239.
- Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance algorithms for non-destructive chlorophyll in higher plants // *J. Plant Physiol.* 2003. V. 160. P. 271–282.
- Giganda V., et.al. Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content // *J. Plant Physiol.* 2009. V. 166 (2). P. 157–167.
- Gitelson A.A., Vina A., Rundquist D.C., Giganda V., Arkebauer T.J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops // *Geophys Res Lett.* 2005. V. 32. L08403.
- Broge N.H., Leblanc E. Comparing predictive power and stability of board band and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density // *Remote Sens. Environ.* 2001. V. 76. P. 156–172.
- Gonzales M.C., Toan T.L., Moreno J., Guanter L. Multi-temporal biophysical parameters from MERIS-FR Data in agricultural areas. MERIS-(A)ATSR Workshop, ESA-ESRIN, Frascati, September 2005. Proceeding of Workshop. P. 132–137.
- Gitelson A.A., Peng Y., Arkebauer T.J., Schepers J. Relationships between gross primary green LAI, and canopy chlorophyll content in maize: Implications for remote sensing of primary production // *Remote Sensing Environment*. 2014. V. 144. P. 65–72.