

# ЭКОЛОГИЯ

УДК 581.52:581.526 **Ф.Э. Гулиева, Э.К. Ализаде, Р.Ю. Алекберова, К.Х. Исмаилов**  
**F.E. Guliyeva, E.K. Alizadeh, R.Yu. Alekberova, K.Kh. Ismailov**

## МЕТОД ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛЕСОВ ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ С ВАЛИДАЦИЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИКИ

### THE METHOD OF FLUORESCENT DIAGNOSTICS OF MOUNTAIN FORESTS WITH VALIDATION OF DIAGNOSTICS RESULTS

**Ключевые слова:** флуоресцентная диагностика, валидация, леса, аэрозоль, оптическая толщина, мутность.

Известен флуоресцентный метод диагностики участков лесов, подвергнувшихся геохимическому стрессу. Такой вид стресса растений, как низкая фотохимическая эффективность, может быть диагностирован с применением специальных диагностических отношений. Синхронно проводимые самолетные исследования максимума поглощения хлорофилла позволили определить смещение максимума поглощения хлорофилла в область коротких волн в участках леса, которые в наибольшей степени были подвергнуты воздействию антропогенного фактора. Представлено исследование условий проведения флуоресцентной диагностики лесов в горной местности, а также выработки методологии валидации результатов такой диагностики. Предложен способ валидации результатов проводимых измерений, заключающийся в проверке выполнения определенного условия в виде равенства. Выполнение этого условия подтверждает достоверность результатов проводимых измерений по флуоресцентной диа-

гностике состояния лесных массивов в горной местности.

**Keywords:** fluorescent diagnostics, validation, forests, aerosol, optical depth, opacity.

The fluorescent method used to diagnose forest zones affected by geochemical stress is well-known. Such type of plant stress as low photochemical effectiveness may be diagnosed by using special diagnostic criteria. Synchronously performed aerial surveys of maximum absorption of chlorophyll in short wavelengths band made it possible to determine the shift of maximum of chlorophyll absorption to zone of short wavelengths in the forest stands which were predominantly affected by anthropogenic factor. This study deals with the research of conditions for carrying out fluorescent diagnostics of forests in mountainous zones and development of methods to validate the results of such diagnostics. The proposed validation method requires verification in the form of equation. Meeting of this condition confirms the authenticity of the results of performed measurements on fluorescent diagnostics of the condition of forest zones in mountainous regions.

**Гулиева Фидан Эльхан гызы**, аспирант, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: fidash2013@mail.ru.

**Ализаде Эльбрус Керим оглы**, д.г.н., проф., Институт географии НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: asadzade@rambler.ru.

**Алекберова Рамида Юнис гызы**, к.б.н., доцент, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: fidash2013@mail.ru.

**Исмаилов Камал Хейраддин оглы**, д.т.н., проф., Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: fidash2013@mail.ru.

**Guliyeva Fidan Elkhan gyzy**, post-graduate student, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: fidash2013@mail.ru.

**Alizadeh Elbrus Kerim oglu**, Dr. Geo. Sci., Prof., Institute of Geography, Azerbaijan Natl. Acad. of Sci., Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: asadzade@rambler.ru.

**Alekberova Ramida Yunis gyzy**, Cand. Bio. Sci., Assoc. Prof., National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: fidash2013@mail.ru.

**Ismailov Kamal Kheyreddin oglu**, Dr. Tech. Sci., Prof., National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: fidash2013@mail.ru.

Природная флуоресценция хлорофилла растений может наблюдаться в отражательном спектре, в зоне «края красной зоны» [1].

Согласно этой работе, экспериментальные исследования, проведенные в 1997-2000 гг. с применением гиперспектрометра CASI, а также флуориметра PAM-2000, показали, что изменения в отражательном спектре исследуемого растения соответствуют сигнатуре флуоресцентного излучения листьев растения.

Было обнаружено, что уменьшение относительного количества хлорофилла *a* и *b* приводит к смещению в сторону коротких длин волн точки перегиба в зоне «края красной зоны» [2]. Синхронно проводимые самолетные исследования максимума поглощения хлорофилла с применением флуоресцентного измерителя FLI позволили также определить смещение максимума поглощения хлорофилла в область коротких волн в участках леса, которые в наибольшей степени были подвергнуты воздействию антропогенного фактора. Как указывается в работе [2], параметры «края красной зоны» определяемые измерителем FLI, могут быть использованы для картирования поврежденных участков лесов, т.к. смещение в синюю зону является ранним индикатором наличия некоторых типов повреждений в лесу.

При значительном уменьшении интенсивности флуоресцентного излучения на линии Фраунгофера поглощение кислорода H<sub>α</sub> (656,3 нм) было отмечено над участками лесов, подвергнувшихся геохимическому стрессу [3]. Согласно [4], увеличение интенсивности флуоресцентного излучения на длине волны O<sub>2</sub>-В наблюдали над пальмами в тех участках, которые были заражены гербицидами. В работе [5] указывается, что такой вид стресса растений, как низкая фотохимическая эффективность, может быть диагностирован с применением диагностических отношений:

$$\gamma_1 = \frac{R750}{R710}; \gamma_2 = \frac{R685}{R655}; \gamma_3 = \frac{R685}{R630}; \gamma_4 = \frac{R680}{R630}.$$

Для изучения солнечного индуцированного флуоресцентного излучения растительности ESA организовал эксперимент FLEX, предназначенный для проведения глобальных гиперспектральных измерений в спектральном диапазоне 500-780 нм с высоким спектральным разрешением (0,3 нм) [6]. При этом для высокой достоверности результатов измерений индуцированного флуоресцентного излучения был организован тандемный полет FLEX и Sentinel-3 для

параллельного исследования состояния атмосферы в целях точной интерпретации данных FLEX.

Как отмечается в работе [7], при вычислении радиации на верхней границе атмосферы, необходимой для проведения атмосферной коррекции данных получаемых от FLEX, эта радиация была смоделирована двумя атмосферными компонентами: (1) аэрозоль; (2) водные пары. Согласно [7], если рассматривать растительную поверхность в виде Ламбертовского отражателя, то радиация на верхней границе атмосферы может быть вычислено по формуле:

$$L_{TOA} = L_0 + \frac{(E_{dir} \cdot \mu + E_{dif}) \cdot T \uparrow \rho}{\pi(1 - S_p)}, \quad (1)$$

где  $L_0$  – свечение пути;

$E_{dir}$  и  $E_{dif}$  – прямая и диффузная составляющая радиации Солнца на уровне растительности;

$\mu$  – косинус угла освещения, равный зенитному углу Солнца с учетом неровности поверхности земли;

$T \uparrow$  – общее пропускание атмосферы;

$S$  – сферическое альbedo;

$\rho$  – отражения поверхности.

Представлено исследование условий проведения флуоресцентной диагностики лесов в горной местности, а также выработки методологии валидации результатов такой диагностики.

Хорошо известно, что в горной местности, удаленной от промышленных и интенсивных сельскохозяйственных зон, аэрозольное загрязнение атмосферы весьма слабое, что позволяет при первом приближении принять следующие условия:

$$\frac{E_{dir}}{E_{dif}} \gg 1; \quad (2)$$

$$L_{TOA} \gg L_0; \quad (3)$$

$$T = e^{-\tau_a}, \quad (4)$$

где  $\tau_a$  – оптическая толщина атмосферного аэрозоля.

Хорошо известно, что при малых  $\tau_a$  выражение (4) аппроксимируется выражением

$$e^{-\tau_a} \approx 1 - \tau_a. \quad (5)$$

С учетом выражений (2)-(5) исходная формула (1) при компенсации свечения пути принимает следующий вид:

$$L_{TOA} = \frac{E_{dir} \cdot \mu \cdot \rho(1 - \tau_a)}{\pi(1 - S_p)}. \quad (6)$$

Выражение (6) запишем в следующем виде

$$L_{TOA} = A(\lambda)(1 - \tau_a), \quad (7)$$

где 
$$A(\lambda) = \frac{E_{dir} \cdot \mu \cdot \rho}{\pi(1 - S_p)}. \quad (8)$$

Таким образом, применительно к флуоресцентному излучению, приняв

$$\rho = \rho_1 + \frac{\pi F}{E}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – суммарное отражение;

$\rho_1$  – отражения при отсутствии флуоресцентного излучения;

$F$  – флуоресцентная радиация;

$E$  – суммарное переизлучение на верхней границе атмосферы[7], получим

$$A(\lambda) = \frac{E_{dir} \cdot \mu \cdot \left[ \rho_1 + \frac{\pi F}{E} \right]}{\pi(1 - S_p)}. \quad (10)$$

Следовательно, зная значения  $A(\lambda)$ ,  $E_{dir}$ ,  $\mu$ ,  $\rho_1$ ,  $E$ ,  $S_p$ , можно вычислить показатель  $F$  и охарактеризовать состояние лесов.

Рассмотрим предлагаемый способ проведения валидации проводимых измерений.

Из выражения (7) получим

$$\tau_a = 1 - \frac{L_{TOA}}{A(\lambda)}. \quad (11)$$

С учетом известной формулы Ангстрема

$$\tau_a = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}, \quad (12)$$

где  $\beta$  – Аэрозольная мутность атмосферы Ангстрема;

$\lambda$  – длина волны;

$\alpha$  – показатель Ангстрема, имеем

$$\beta \cdot \lambda^{-\alpha} = 1 - \frac{L_{TOA}}{A(\lambda)}. \quad (13)$$

Применение формулы (13) к диагностическому отношению  $\frac{R_{750}}{R_{710}}$  позволяет получить следующее уравнение

$$\left( \frac{\lambda_{750}}{\lambda_{710}} \right)^{-\alpha} = \frac{1 - L_{TOA}(750)/A(750)}{1 - L_{TOA}(710)/A(710)}. \quad (14)$$

Из выражения (14) окончательно получим

$$\alpha = \frac{\ln \left[ \frac{1 - L_{TOA}(750)/A(750)}{1 - L_{TOA}(710)/A(710)} \right]}{\ln \left( \frac{\lambda_{710}}{\lambda_{750}} \right)} = \phi(\gamma_1). \quad (15)$$

Таким образом, условие (15) является предлагаемым критерием валидации ре-

зультатов проведенной диагностики. Очевидно, что уравнение (15) справедливо для всех пар  $(\lambda_i; \lambda_j)$ , участвующих в диагностических отношениях  $\gamma_i; i = \overline{1,4}$ .

Предлагаемый способ валидации результатов проводимых измерений может быть изложен в виде равенства

$$\phi(\gamma_1) = \phi(\gamma_2) = \phi(\gamma_3) = \phi(\gamma_4) = \alpha \quad (16)$$

$$\text{или } \sum_{i=1}^4 \phi(\gamma_i) = 4\alpha. \quad (17)$$

Таким образом, выполнение условий (16) и (17) будет означать достоверность результатов проводимых измерений с применением всех вышеуказанных диагностических отношений по флуоресцентной диагностике состояния лесных массивов в горной местности.

### Библиографический список

1. Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Mohammed G.H., Noland T.L., Sampson P.H. Estimation of chlorophyll fluorescence under natural illumination from hyperspectral data. Second EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Enschede, 2000. [http://quantalab.ias.csic.es/pdf/paper\\_2ndEARSeL\\_ImgSpectr.pdf](http://quantalab.ias.csic.es/pdf/paper_2ndEARSeL_ImgSpectr.pdf).
2. Rock B.N., Hosnizaki T., Miller J.R. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline // Remote Sensing of Environment. – 1988. – Vol. 24. – P. 109-127.
3. Malenovsky Z., Mishra K., Zemek F., Rascher U., Nedbal L. Scientific and technical challenges in remote sensing of plant canopy reflectance and fluorescence // Journal of Experimental Botany. – 2009. – Vol. 60 (11). – P. 2987-3004.
4. Carter G.A., Jones J.H., Mitchell R.J., Brewer C.H. Detection of solar-excited chlorophyll a fluorescence and leaf photosynthetic capacity using a Fraunhofer line radiometer // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 55. – P. 89-92.
5. Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Mohammed G.H., Noland T.L., Sampson P.H. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: II. Laboratory and airborne canopy-level measurements with hyperspectral data // Remote Sensing of Environment. – 2000. – Vol. 74 (3). – P. 596-608.
6. Vicent J., Sabater N., Tenjo C., Ramon J.A., Manzano M., et al. FLEX end-to-end mission performance simulator. IEEE transactions on geosciences and remote sens-

ing. [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/index.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html).

7. Sabater N., Rivera J.P., Tenjo C., Vicent J., Alonso L. Verrelst J., Moreno J. The scientific modules of Flex end-to-end simulator: The science generator and the level-2 retrieval modules. 5th International workshop on remote sensing of vegetation fluorescence, 22-24 April 2014, Paris (France) [http://esaconferencebureau.com/Custom/14C04/Papers/Oral%20Presentations/S2\\_1630\\_Vicent.pdf](http://esaconferencebureau.com/Custom/14C04/Papers/Oral%20Presentations/S2_1630_Vicent.pdf)

8. Li J., Yin Y., Li P., Li Zh., Li R., Cribb M., Dong Z., Zhang F., Li J., Ren G., Jin L., Li Y. Aircraft measurements of the vertical distribution and activation property of aerosol particles over the Loess Plateau in China // Atmospheric Research. – 2015. – Vol. 155. – P. 73-86.

### References

1. Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Mohammed G.H., Noland T.L., Sampson P.H. Estimation of chlorophyll fluorescence under natural illumination from hyperspectral data. Second EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Enschede, 2000. [http://quantalab.ias.csic.es/pdf/paper\\_2ndEARSeL\\_ImgSpectr.pdf](http://quantalab.ias.csic.es/pdf/paper_2ndEARSeL_ImgSpectr.pdf).

2. Rock B.N., Hosnizaki T., Miller J.R. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline // Remote Sensing of Environment. – 1988. – Vol. 24. – P. 109-127.

3. Malenovsky Z., Mishra K., Zemek F., Rascher U., Nedbal L. Scientific and technical challenges in remote sensing of plant canopy reflectance and fluorescence // Journal of

Experimental Botany. – 2009. – Vol. 60 (11). – P. 2987-3004.

4. Carter G.A., Jones J.H., Mitchell R.J., Brewer C.H. Detection of solar-excited chlorophyll a fluorescence and leaf photosynthetic capacity using a Fraunhofer line radiometer // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 55. – P. 89-92.

5. Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Mohammed G.H., Noland T.L., Sampson P.H. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: II. Laboratory and airborne canopy-level measurements with hyperspectral data // Remote Sensing of Environment. – 2000. – Vol. 74 (3). – P. 596-608.

6. Vicent J., Sabater N., Tenjo C., Ramon J.A., Manzano M., et al. FLEX end-to-end mission performance simulator. IEEE transactions on geosciences and remote sensing. [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/index.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html).

7. Sabater N., Rivera J.P., Tenjo C., Vicent J., Alonso L. Verrelst J., Moreno J. The scientific modules of Flex end-to-end simulator: The science generator and the level-2 retrieval modules. 5th International workshop on remote sensing of vegetation fluorescence, 22-24 April 2014, Paris (France) [http://esaconferencebureau.com/Custom/14C04/Papers/Oral%20Presentations/S2\\_1630\\_Vicent.pdf](http://esaconferencebureau.com/Custom/14C04/Papers/Oral%20Presentations/S2_1630_Vicent.pdf)

8. Li J., Yin Y., Li P., Li Zh., Li R., Cribb M., Dong Z., Zhang F., Li J., Ren G., Jin L., Li Y. Aircraft measurements of the vertical distribution and activation property of aerosol particles over the Loess Plateau in China // Atmospheric Research. – 2015. – Vol. 155. – P. 73-86.



УДК 528.88;502.37

**Р.М. Керимов, Ф.Г. Агаев, Р.Ю. Алекберова, К.Х. Исмаилов**  
**R.M. Kerimov, F.G. Agayev, R.Yu. Alekberova, K.Kh. Ismailov**

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ АЗОТА В РАСТЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ УЗКОСПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ**

### **INFORMATION ERROR ESTIMATION OF PLANT NITROGEN CONCENTRATION BY MEANS OF NARROW SPECTRAL VEGETATION INDICES**

**Ключевые слова:** вегетационные индексы, концентрация азота, информационная оценка, оптимизация, погрешность.

Известно, что точное определение содержания азота в растениях позволяет оптимизировать процесс использования азотного удобрения в агро-

номии. При недостатке азота в растениях уменьшается концентрация хлорофилла, что указывает на неоптимальные условия для фотосинтеза. Показано, что оценка разности измеренных и спрогнозированных величин концентрации азота в виде остаточной информации в серии многоточечных пространственных измерений может иметь мак-