

УДК 656.7.025

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ СИГНАТУРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРОНТА ОГНЯ ПРИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*И.Э. Мамедов*

**Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика**

*Проанализирована возможность использования новой спектральной сигнатуры для определения фронта огня при лесных пожарах с использованием беспилотных летательных аппаратов. Одним из важных вопросов использования беспилотных летательных средств (БПЛА) для контроля возгорания лесов является правильный выбор спектрального диапазона спектрометрической камеры, установленной на беспилотном аппарате. Отмечено, что использование беспилотных летательных средств для контроля горящего участка лесов позволяет исключить участие человека в оценке фронта огня и повысить эффективность организации пожаротушения.*

*Целью настоящей статьи является исследование возможности использования новой предлагаемой спектральной сигнатуры для дистанционного обнаружения горящей лесной биомассы. Предложен новый спектральный сигнатурный признак, пригодный для определения фронта огня при лесных пожарах. Отмечено, что для обнаружения сгорания биомассы могут быть использованы спектральные измерители, чувствительные к поглощению кислорода и излучению ионизированного газа калия на длинах волн 760 нм (для O<sub>2</sub>) и 767÷770 для калия. Разработан новый спектральный сигнатурный признак базирующийся на факте наличия эмиссионной линии Калия на длине волны 768 – 770 нм, а также абсорбционной линии O<sub>2</sub> на длине волны 770 нм. Показан экстремальный характер предложенной спектральной сигнатуры горящей биомассы в лесу. Проанализированы условия измерения предложенной новой сигнатуры с максимальным отношением сигнал / шум. Получена формула для вычисления промежутка времени, при котором отношение сигнал / шум при измерении предложенной спектральной сигнатуры достигает максимального значения.*

**Ключевые слова:** БПЛА, спектральная сигнатура, биомасса, фронт пожара, пожаротушение.

## ON FEASIBILITY OF UTILIZATION OF NEW SPECTRAL SIGNATURE FOR DETERMINATION OF FIRE FRONT UPON FORES FIRES USING UAV

*I.E. Mamedov*

**National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic**

*The feasibility of utilization of the suggested new spectral signature for determination of fire front upon forest fires using unmanned aerial vehicles. One of major questions on utilization of unmanned aerial vehicles for remote control of forest fires is proper selection of spectral band of spectrometric instrument installed on the UAV. It is noted that utilization of unmanned aerial vehicles for control of firing forest areas make it possible to remove the participation of human in estimation of fire front and to increase the effectiveness of organization of fire extinguishing. The aim of the paper is to study the feasibility of utilization of newly suggested spectral signature for remote detection of firing forest biomass. The new spectral signature usable for deter-*

*mination of fire front upon forest fires is suggested. It is noted that to detect the firing biomass the spectral measuring instruments sensing absorption of oxygen and emission of ionized potassium gas at wavelengths 760 nm (for O<sub>2</sub>) and 767-770 (for potassium) can be used. The new spectral signature based on the fact on presence of emission line of Potassium at the wavelength 768-770 nm and absorption line of O<sub>2</sub> at wavelength 770 nm is developed. The extremum property of suggested spectral signature of firing forest biomass is shown. Conditions for measuring of suggested new signature with maximal value of signal/noise ratio are analyzed. The formula for calculation of time interval upon which the signal/ noise ratio reaches the maximal value is derived.*

**Ключевые слова:** UAV; spectral signature; biomass, fire front; fire extinguishing .

Как указывается в работе [1], при лесных пожарах основной задачей пожарников является определение «фронта пожара», чтобы предугадать развитие пожара и территорию наибольшего риска распространения огня. Отсутствие информации о фронте огня может привести к многочисленным несчастным случаям.

Использование беспилотных летательных средств [БПЛА] для контроля горящей территории позволяет исключить участие человека в оценке фронта огня и повысить эффективность организации пожаротушения.

Согласно работе [2], задачу определения фронта огня целесообразно решать с использованием группы БПЛА. Это позволяет оперативно осуществить такие этапы проведения операции определения фронта огня, как поиск, подтверждение и наблюдение за огнем. Как отмечается в работе [3], указанная работа наиболее эффективно может быть выполнена, с применением группового полета БПЛА, снабженных программным средством, состоящим из модулей обнаружения огня, модуля локации пожара, модуля прогноза масштаба и модуля выработки отчета. Использование такого программного средства позволяет улучшить эффективность работы системы и надежность обнаружения огня.

Согласно работе [4], существует система COMETS, состоящая из двух типов БПЛА. В первом из них устанавливается тепловая камера, работающая в диапазоне длин волн 7÷14 мкм. На втором БПЛА устанавливается камера, работающая в ультрафиолетовом диапазоне (185 нм, 260 нм). Принцип работы системы заключается в следующем: при обнаружении инфракрасной камерой источника огня соответствующие координаты передаются в центр обработки и оттуда на БПЛА, где установлена ультрафиолетовая камера.

В случае подтверждения вторым летательным аппаратом факта наличия огня в указанной местности выносится решение об обнаружении источника возгорания леса. Как указывается в работе [5], БПЛА снабженный инфракрасной камерой, GPS и инерциальной системой наведения позволял определить координаты огня с точностью 1 метр, что вполне приемлемо для летательных аппаратов с GPS системой навигации.

Одним из важных вопросов использования БПЛА для контроля возгорания лесов является правильный выбор спектрального диапазона спектрометрической камеры, установленной на беспилотном аппарате. Согласно работе [6], для обнаружения сгорания биомассы могут быть использованы спектральные измерители, чувствительные к поглощению кислорода и излучению ионизированного газа калия на длинах волн 760 нм (для O<sub>2</sub>) и 767 ÷ 770 для калия. Как указывается в работе [7], сухой вес биомассы состоит на 50% из углерода, 44% кислорода и 5% водорода. При полном сжигании биомассы половина сухой массы превращается в CO<sub>2</sub>, а другая половина в воду. Эмиссионный спектр горящей биомассы содержит: 1) Планковскую кривую; 2) излучение калия на длине волны 0,76 ÷ 0,77 мкм; 3) излучение натрия на длине волны 0,59 мкм (рис. 1).

В инфракрасном диапазоне для обнаружения пожара используются спектральные сигнатуры поглощения в диапазонах 2 ÷ 5 мкм и 8 – 14 мкм.

Вопросы использования эмиссионной линии К более подробно рассмотрены в работе [8]. Спектр поглощения и эмиссии биомассы дерева показан на рис. 1, где линия поглощения попадает на длину волны 592 нм, а линия эмиссии К попадает на длину волны 779 нм. На рис. 1 цифрами указаны: 1 – спектральная линия, полученная при отсутствии влияния дыма; 2 – спектральная линия, полученная при воздействии дыма.

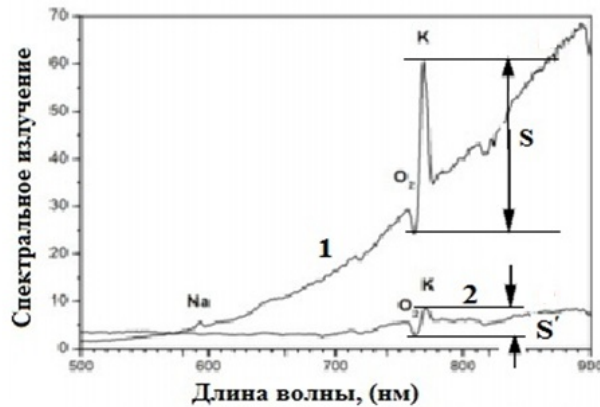


Рис. 1. Спектр поглощения N и эмиссии К, а также поглощения O<sub>2</sub>, зарегистрированный при пожаре лесов 14 августа 2006-го года в местечке Манзиария, Италия [8]

Как видно из спектральных кривых, показанных на рис. 1 наличие дымового покрова над горящей биомассой значительно ослабляет спектральную сигнатуру, пригодную для идентификации возгорания леса. Целью настоящей статьи является исследование возможности использования новой предлагаемой спектральной сигнатуры S показанной на рис. 1. Как видно из приведенных на рис. 1 кривых спектральная сигнатура S при наличии дымового покрова сильно ослабляется, однако и в этом случае является достаточно информативной. Далее рассматриваются условия измерения сигнатуры S с максимальным отношением сигнал шум. Суммарный световой поток  $I_{E_1}$ , регистрируемый на длине волны  $\lambda_1 = 767 - 770$  Нм определим как

$$I_{E_1} = (I_k(\lambda_1) + I_0(\lambda_1))e^{-\tau_a(\lambda_1)} \quad (1)$$

где:  $I_k(\lambda_1)$  - исходный световой поток, исходящий от ионизированного калия на длине волны  $\lambda_1$ ,  $I_0$  - исходный световой поток, исходящий от горящей биомассы на длине волны  $\lambda_1$ ;  $\tau_a(\lambda_1)$  - оптическая толщина аэрозольных частиц в составе дыма на длине волны  $\lambda_1$ .

Суммарный световой поток  $I_{E_2}$ , регистрируемый на длине волны  $\lambda_2 = 760$  Нм определим как

$$I_{E_2} = I_0(\lambda_2)e^{-[\tau_{O_2}(\lambda_2) + \tau_a(\lambda_2)]} \quad (2)$$

где:  $I_0(\lambda_2)$  - исходный световой поток, исходящий от горящей биомассы на длине волны  $\lambda_2$ ;  $\tau_a(\lambda_2)$  - оптическая толщина аэрозольных частиц в составе дыма на длине волны  $\lambda_2$ .

С учетом выражений (1) и (2) спектральную сигнатуру  $S$  возгорания определим как

$$S = (I_k(\lambda_1) + I_0(\lambda_1))e^{-\tau_a(\lambda_1)} - I_0(\lambda_2)e^{-[\tau_{0_2}(\lambda_2) + \tau_a(\lambda_2)]} \quad (3)$$

В первом приближении можно принять следующие равенства:

$$I_0(\lambda_1) = I_0(\lambda_2) = I_0(\lambda) \quad (4)$$

$$\tau_a(\lambda_1) = \tau_a(\lambda_2) = \tau_a(\lambda) \quad (5)$$

С учетом равенств (4), (5) выражение (3) принимает следующий вид

$$S = I_0(\lambda)e^{-\tau_a(\lambda)}[1 - e^{-\tau_{0_2}(\lambda_2)}] + I_k \cdot e^{-\tau_a(\lambda)} = e^{-\tau_a(\lambda)}[I_0(\lambda)[1 - e^{-\tau_{0_2}(\lambda_2)}] + I_k] \quad (6)$$

Отношение сигнал/шум  $\psi$  измерения  $S$  определим как

$$\psi = \frac{S}{e^{-\tau_a(\lambda)}} = I_0(\lambda)[1 - e^{-\tau_{0_2}(\lambda_2)}] + I_k \quad (7)$$

Предположим, что рассматривается начальная фаза пожара, когда  $I_0(\lambda)$  является растущей функцией времени  $T$ , а  $\tau_{0_2}(\lambda_2)$  является убывающей функцией. Очевидно, что в этом случае функция  $1 - e^{-\tau_{0_2}(\lambda_2)}$  также будет убывающей функцией времени. В первом приближении функции  $I_0(\lambda)$  и  $[1 - e^{-\tau_{0_2}(\lambda_2)}]$  представим в виде линейных функций

$$I_0 = a_1 + k_1T \quad (8)$$

$$1 - e^{-\tau_{0_2}(\lambda_2)} = a_2 - k_2T \quad (9)$$

где:

$$a_1 = I_0(\lambda), \text{ при } T = 0 \quad (10)$$

$$a_2 = [1 - e^{-\tau_{0_2}(\lambda_2)}], \text{ при } T = 0 \quad (11)$$

$$k_1 = \left. \frac{dI_0}{dT} \right|_{T=0} \quad (12)$$

$$k_2 = \left. \frac{d[1 - e^{-\tau_{0_2}(\lambda_2)}]}{dT} \right|_{T=0} \quad (13)$$

С учетом выражений (8) и (9) отношение сигнал/шум представим в виде

$$\psi = (a_1 + k_1 T)(a_2 - k_2 T) + I_k \quad (14)$$

Исследуем выражение (14) на экстремум. Имеем:

$$\frac{d\psi}{dT} = -a_1 k_2 + k_1 a_2 - 2T k_1 k_2 \quad (15)$$

Из выражения (15) получаем, что при

$$T = \frac{k_1 a_2 - a_1 k_2}{2k_1 k_2} \quad (16)$$

$\psi$  достигает экстремальной величины.

Для определения типа экстремума вычислим  $\frac{d^2\psi}{dT^2}$ . Имеем:

$$\frac{d^2\psi}{dT^2} = -2T k_1 k_2 \quad (17)$$

Следовательно, при выборе времени измерения  $S$  в момент  $T$ , определяемом как (16) возможно наиболее достоверное измерение величины  $S$ , т.к. в этом случае обеспечивается максимальная величина отношения сигнал/шум.

Таким образом, показано, что для решения задачи определения фронта огня наиболее перспективным средством являются беспилотные летательные аппараты. Предложен новый спектральный сигнатурный признак базирующийся на факте наличия эмиссионной линии Калия на длине волны 768 – 770 нм, а также абсорбционной линии  $O_2$  на длине волны 770 нм.

Показано, что в фазе повышения интенсивности огня, т. е. в начальной стадии лесных пожаров отношение сигнал/шум определения предложенной спектральной сигнатуры имеет максимум.

Получена формула для вычисления времени  $T$  при котором отношение сигнал/шум при измерении сигнатуры достигает максимальной величины.

## Литература

1. Huy Xuan Pham, Hung Manh La, David Feil-Seifer and Matthew C. Deans. A Distributed Control Framework of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Dynamic Wildfire Tracking. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems. March 2018. DOI: 10.1109/TSMC. - 2018.2815988.
2. Khaled A. Ghamry, Youmin Zhang. Cooperative control of multiple UAVs for forest fire monitoring and detection. DOI: 10.1109/MESA. - 2016.7587184
3. P.Hema, M.Priyanga, A.Jagadeesh, S.Murugaraj, M.Malarvizhi. Controlling of Forest Fire using Unmanned Aerial Vehicle. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. - 2017. Vol. 6, Issue 3, pp. 1672 – 1677.
4. A. Ollero, J. R. Martínez-de-Dios, L Merino. Unmanned Aerial Vehicles as tools for forest-fire fighting. Forest Ecology and Management. - 2006. 234(1) DOI: 10.1016/j.foreco. - 2006.08.292
5. Eni Dwi Wardihani, Magfur Ramdhani, Amin Suharjono, Thomas Agung Setuawan, Sidiq Syamsul Hidayat, Helmy, Sarono Widodo, Eddy Triyono, Firdanis Saifullah. REAL-TIME FOREST

FIRE MONITORING SYSTEM USING UNMANNED AERIAL VEHICLE. Journal of Engineering Science and Technology. - 2018. Vol. 13, No. 6.pp. 1587 - 1594

6. Artur Krukowski, Emmanouela Vogiatzaki, UAV-based photogrammetric 3D modelling and surveillance of forest wildfires. "UAV & SAR: using drones in rescue operations" Rome, 29th March. - 2017.

7. Martin J. Wooster, Gareth Roberts, Alistair M. S. Smith, Joshua Johnston, Patrick Freeborn, Stefania Amici, Andrew T. Hudak. Thermal Remote Sensing of Active Vegetation Fires and Biomass Burning Events. Kuenzer C., Dech S. (eds) Thermal Infrared Remote Sensing. Remote Sensing and Digital Image Processing, vol 17. doi.org/10.1007/978-94-007-6639-6\_18.

8. Stefania Amici. New Hyper - Spectral Analysis Methods For Wild Fire Investigation and characterization. <http://www.oecd.org/tad/crp/AMICI.pdf>

### Сведения об авторе

*Мамедов Илькин Эльбрус оглы*, аспирант Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, автор более 15 научных трудов. Область научных интересов - экология, дистанционное зондирование. безопасность жизнедеятельности. E-mail: [i.mamedov09@gmail.com](mailto:i.mamedov09@gmail.com), тел. +994500556055009