

УДК 681.865

**ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С БОРТОВОЙ  
ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ФОРМИРОВАНИЯ  
ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ МОРСКИХ ВОД  
В УСЛОВИЯХ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИВОДНОГО  
СЛОЯ АТМОСФЕРЫ**

**OPTIMIZATION OF THE FLIGHT ALTITUDE OF UNMANNED  
AIRCRAFT WITH ON-BOARD HYPERSPECTRAL SYSTEM  
FOR FORMATION OF COLOR IMAGES OF THE SEA WATER  
SURFACE UNDER AEROSOL POLLUTION OF THE ATMOSPHERE  
DRIVE LAYER**

**М.М. Исмаилов**

**Азербайджанский научно-исследовательский институт водных  
проблем, г. Баку, Азербайджанская Республика**

**Р.А. Эминов**

**Азербайджанский государственный университет нефти  
и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика**

**А.Б. Асланова**

**Институт космических исследований природных ресурсов,  
г. Баку, Азербайджанская Республика**

**Maharram M. Ismailov**

**Azerbaijan Scientific Research Institute of Water Problems,  
Baku, Republic of Azerbaijan**

**Ramiz A. Eminov**

**Azerbaijan State University of Oil and Industry,**

**Baku, Republic of Azerbaijan**

**Ayten B. Aslanova**

**Natural Resources Space Research Institute, Baku, Azerbaijan Republic**

**e-mail: maharram.ismailov@mail.ru**

**Аннотация.** Статья посвящена решению вопросов оптимизации высоты полета беспилотных летательных аппаратов с бортовой гиперспектральной системой формирования цветных изображений поверхности морских вод в зонах платформенной нефтедобычи в условиях двухслойного аэрозольного загрязнения приводного слоя атмосферы. В статье изложены результаты, верные для множества слоев аэрозольных загрязнений, встречаемых в период функционирования бортовой изображающей системы, а также определен оптимальный режим изменения высоты полета при формировании цветных изображений морской поверхности, покрытой элементами указанного множества.

**Abstract.** The article is devoted to the optimization of the flight altitude of unmanned aerial vehicles with an onboard hyperspectral system for the formation of color images of the surface of sea waters in the zones of platform oil production under conditions of two-layer aerosol pollution of the near-air layer of the atmosphere. The article presents the results that are true for many layers of aerosol contaminants encountered during the operation of the onboard imaging system, and also determines the optimal mode of changing the flight altitude when forming color images of the sea surface covered with elements of this set.

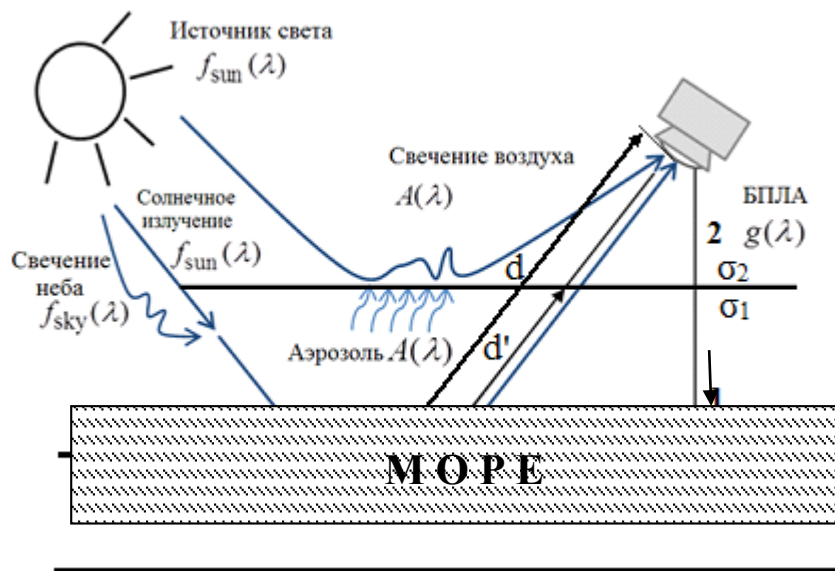
**Ключевые слова:** атмосфера; аэрозоль; беспилотный летательный аппарат; оптимизация; нефтедобыча

**Key words:** atmosphere; aerosol; unmanned aerial vehicle; optimization; oil production

Хорошо известно, что важнейшим фактором, определяющим достоверность гиперспектрального дистанционного зондирования Земли, является атмосфера, включая малые газовые составляющие, аэрозоль и водяные пары. Атмосферный аэрозоль в отличие от малых газов и водяных паров имеет непрерывный спектр поглощения и характеризуется динамически изменяемой структурой. Эти особенности аэрозоля ухудшают качества гиперспектральных изображений, получаемых бортовыми изображающими системами, осуществляющими мониторинг состояния поверхности морской акватории, загрязненной нефтепродуктами вблизи морских нефтедобывающих платформ. Аэрозольное облако способствует искажению цветности изображений морской поверхности, избирательно воздействуя на длины волн, проходящих через них оптических лучей. В конечном итоге, воздействие аэрозоля приводит не только к искажению цветности, но и к уменьшению отношения сигнал/шум на разных длинах волн, что эквивалентно уменьшению достоверности информации, получаемой бортовыми цветными изображающими системами.

Существуют различные методы для снижения степени воздействия аэрозольного фактора на бортовые цветные изображения. Например, в работе [1] предложено комбинирование сигнала «темного» канала и усиления локального контраста для удаления искажений цветности, вызванных влиянием атмосферного аэрозоля. В работах [2–4] искажения цветности частично устраняются путем фильтрации и учета сигнала «темного» канала, а в работе [5] предлагается улучшить качество изображений по критерию достижения максимальной видимости по трассе прохождения оптических лучей. Однако почти отсутствуют работы, посвященные реализации адаптивных режимов функционирования гиперспектральных изображающих систем, предназначенных для исследования цвета морской поверхности в условиях наличия сильной аэрозольной загрязненности в определенном слое приземной атмосферы.

Целью настоящей статьи является исследование оптимального режима полета беспилотного летательного аппарата с гиперспектральной изображающей системой, предназначенной для ведения съемок в зоне морской нефтедобычи, где в некотором приземном слое образовано двухслойное аэрозольное облако, состоящее из морского аэрозоля и аэрозоля, генерируемого факелом. Направления радиационных потоков в двухслойной приземной зоне показано на рисунке 1.



$f_{sun}(\lambda)$  – свечение солнца;

$f_{sky}(\lambda)$  – свечение неба;

$\lambda$  – длина волны;

$\sigma_1, \sigma_2$  – коэффициенты ослабления в зонах 1 и 2 соответственно

**Рисунок 1.** Направления радиационных потоков в двухслойной приводной зоне

В соответствии с работой [6], изображение морской поверхности, формируемое гиперспектральной изображающей системой с учетом двухслойной промежуточной аэрозольной среды, где в первом слое преобладает морской аэрозоль, а во втором – мелкодисперсный городской аэрозоль, может быть вычислено попиксельно на основе следующей математической модели:

$$I_0 = I_1(\lambda) \cdot e^{-\sigma_1(\lambda)d'} \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)(l-d')} + A(\lambda)[1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)l}], (1)$$

где  $I_1(\lambda) = f_{sun}(\lambda) + f_{sky}(\lambda)$  – исходное попиксельное изображение морской поверхности;

$A(\lambda)$  – свечение атмосферы;

$\lambda$  – длина волны.

Введем функцию

$$l = \varphi(\lambda) \quad (2)$$

и с учетом выражений (1), (2) сформируем следующий интегральный функционал:

$$I_{0.ин} = \int_0^{\lambda_{max}} I_0 d\sigma_1 = \int_0^{\lambda_{max}} I_1(\lambda) \cdot e^{-\sigma_1(\lambda)d'} \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)(l-d')} d\lambda + \\ + \int_0^{\lambda_{max}} A(\lambda) [1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)l}] d\lambda + \gamma \left[ \int_0^{\lambda_{max}} \varphi(\lambda) d\lambda - C_1 \right], \quad (3)$$

где  $\gamma$  – множитель Лагранжа;

$C_1 = const.$

Формула (3) является математическим выражением задачи безусловной вариационной оптимизации. При этом допускаем, что функция  $\varphi(\lambda)$  удовлетворяет следующему условию:

$$\int_0^{\lambda_{max}} \varphi(\lambda) d\lambda = C_1$$

Согласно уравнению Эйлера [7], оптимальная функция  $l = \varphi(\lambda)_{opt}$ , при которой функционал (3) достигает экстремального значения, должна удовлетворить условию:

$$\frac{d \{ I_1(\lambda) \cdot e^{-\sigma_1(\lambda)d'} \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)(l-d')} + A(\lambda) [1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d} - e^{-\sigma_2(\lambda)l(\lambda)}] + \gamma \cdot \varphi(\lambda) \}}{d\varphi(\lambda)} = 0 \quad (4)$$

Из выражения (4) получим:

$$-\sigma_2(\lambda) \cdot I_1(\lambda) \cdot e^{-[\sigma_1 d' + \sigma_2(l-d')]} + A(\lambda) \cdot \sigma_2(\lambda) \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)l} + \gamma = 0. \quad (5)$$

Из выражения (5) получим:

$$l(\lambda) = \frac{1}{\sigma_2(\lambda)} \cdot \ln \left[ \frac{\sigma_2(\lambda) \cdot [I_1(\lambda) \cdot e^{-d_1[(\sigma_2(\lambda) - \sigma_1(\lambda))]} - A(\lambda)]}{\chi} \right]. \quad (6)$$

Для вычисления значения множителя Лагранжа  $\chi$  достаточно воспользоваться формулами (4) и (6) с учетом  $l(\lambda) = \varphi(\lambda)$ .

Опустив математические подробности вычисления множителя Лагранжа, в дальнейших вычислениях обозначим вычисленное значение этого множителя знаком  $\chi_0$ .

Для определения характера экстремума функционала (3) при решении (6) вычислим вторую производную интегранта выражения (3).

Имеем:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \{ I_1(\lambda) e^{-\sigma_1(\lambda)d'} \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)(l-d')} + A(\lambda) [1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)l(\lambda)}] + \gamma \cdot \varphi(\lambda) \}}{d\varphi(\lambda)^2} = \\ = \sigma_2^2(\lambda) \cdot I_1(\lambda) e^{-[\sigma_1 d' + \sigma_2(l-d')]} - \sigma_2^2(\lambda) \cdot A(\lambda) e^{-\sigma_2(\lambda)l} = \\ = \sigma_2^2(\lambda) \cdot e^{-\sigma_2(\lambda)l} [I_1(\lambda) \cdot e^{-[\sigma_1 d' - \sigma_2 d']} - A(\lambda)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку в наиболее вероятном случае

$$I_1(\lambda) \cdot e^{-[\sigma_1 d' - \sigma_2 d']} > A(\lambda), \quad (8)$$

то функционал (3) при условии (8) достигает максимальной величины. Следовательно, оптимальный режим гиперспектральной изображающей системы организуется на основе следующих предположений.

1. Общую закономерность кривой изменения  $l(\lambda)$  согласно выражению (6) определяет обратная зависимость  $l(\lambda)$  от  $\sigma_2(\lambda)$ , стоящей в знаменателе.

2. Во избежание обратной зависимости между  $l(\lambda)$  и  $\sigma_2(\lambda)$ , согласно (6), приводящей к минимуму функционала цели, следует организовать

синфазное изменение  $I(\lambda)$  и  $\sigma_2(\lambda)$ , т.е. рост  $I$  должен сопровождаться ростом  $\sigma_2(\lambda)$ .

3. С учетом вышеуказанного прямая взаимосвязь между  $I(\lambda)$  и  $\sigma_2(\lambda)$  предлагается по следующей схеме: рост  $\lambda$  приводит к уменьшению  $\sigma_2(\lambda)$ , следовательно, при росте  $\lambda$  следует обеспечить уменьшение  $I(\lambda)$ , т.е. при принятых выше допущениях рост  $\lambda$  должна сопровождаться уменьшением высоты полета носителя гиперспектральной аппаратуры.

Такой характер изменения функции  $I(\lambda) = \varphi(\lambda)$  в неявном виде был предусмотрен во вводимом ограничении (4), которое исходно предполагало возможность как прямой, так и обратной зависимости  $I$  от  $\lambda$ . В соответствии с выражением (8) зависимость  $I$  от  $\sigma_2$  имеет достаточно сложный характер, однако доминирующей является обратная зависимость. Так как при этом целевой функционал достигает минимума, целесообразен такой режим, когда уменьшение  $\sigma_2$  должно привести к уменьшению  $I$ .

В заключение отметим, что полученные в настоящей статье результаты верны не для одного конкретного случая наличия слоя морского аэрозоля, а для множества слоев аэрозольных загрязнений  $\{\sigma_{1i}\}; i = \overline{1, n}$ , наблюдаемых в приводном слое в период функционирования бортовой изображающей системы, а выражение (6) определяет оптимальный режим изменения высоты полета при формировании цветных изображений морской поверхности, покрытой элементами указанного множества.

## Выводы

Изучен вопрос оптимизации высоты полета беспилотных летательных аппаратов с бортовой гиперспектральной системой формирования цветных изображений поверхности морских вод в зонах платформенной нефтедобычи в условиях двухслойного аэрозольного загрязнения приводного слоя атмосферы.

Представлены результаты, верные для множества слоев аэрозольных загрязнений, встречаемых в период функционирования бортовой изображающей системы.

Определен оптимальный режим изменения высоты полета при формировании цветных изображений морской поверхности, покрытой элементами указанного множества.

### Список используемых источников

1. Yeh C., Kang L., Lee M., Lin C. Haze Effect Removal from Image Via Haze Density Estimation in Optical Model // Optics Express. 2013. Vol. 21. Issue 22. P. 27127-27141. DOI: 10.1364/OE.21.027127.

2. He R., Wang Z., Fan Y., Feng D. Multiple Scattering Model Based Single Image Dehazing // Industrial Electronics and Applications (ICIEA): Materials of IEEE Conference. Melbourne, Australia. 2013. P. 733-737. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566464.

3. Shi Z., Long J., Tang W., Zhang C. Single Image Dehazing in Inhomogeneous Atmosphere // Optik. 2014. Vol. 125. Issue 15. P. 3868-3875. DOI: 10.1016/j.ijleo.2014.01.170.

4. Yoon I., Jeong S., Jeong J., Seo D., Paik J. Wavelength-Adaptive Dehazing Using Histogram Merging-Based Classification for UAV Images // Sensors. 2015. Vol. 15. Issue 3. P. 6633-6651. DOI: 10.3390/s150306633.

5. Gao R., Fan X., Zhang J., Luo Z. Haze Filtering with Aerial Perspective // Image Processing: Materials of IEEE 19 International Conference. Orland, USA. 2012. P. 989-992. DOI: 10.1109/ICIP.2012.6467028.

6. Yuqing H., Wenrui D., Hongguang L. Haze Removal for UAV Reconnaissance Images Using Layered Scattering Model // Chinese Journal of Aeronautics. Vol. 29. Issue 2. P. 502-511. DOI: 10.1016/j.cja.2016.01.012.

7. Эльсгольц Л.П. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.



## References

1. Yeh C., Kang L., Lee M., Lin C. Haze Effect Removal from Image via Haze Density Estimation in Optical Model. *Optics Express*, 2013, Vol. 21, Issue 22, pp. 27127-27141. DOI: 10.1364/OE.21.027127.
2. He R., Wang Z., Fan Y., Feng D. Multiple Scattering Model Based Single Image Dehazing. *Materials of IEEE Conference «Industrial Electronics and Applications (ICIEA)»*. Melbourne, Australia, 2013, pp. 733-737. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566464.
3. Shi Z., Long J., Tang W., Zhang C. Single Image Dehazing in Inhomogeneous Atmosphere. *Optik*, 2014, Vol. 125, Issue 15, pp. 3868-3875. DOI: 10.1016/j.ijleo.2014.01.170.
4. Yoon I., Jeong S., Jeong J., Seo D., Paik J. Wavelength-Adaptive Dehazing Using Histogram Merging-Based Classification for UAV Images. *Sensors*, 2015, Vol. 15, Issue 3, pp. 6633-6651. DOI: 10.3390/s150306633.
5. Gao R., Fan X., Zhang J., Luo Z. Haze Filtering with Aerial Perspective. *Materials of IEEE 19 International Conference «Image Processing»*. Orland, USA, 2012, pp. 989-992. DOI: 10.1109/ICIP.2012.6467028.
6. Yuqing H., Wenrui D., Hongguang L. Haze Removal for UAV Reconnaissance Images Using Layered Scattering Model. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 29, Issue 2, pp. 502-511. DOI: 10.1016/j.cja.2016.01.012.
7. Elsgolts L.P. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* [Differential Equations and Calculus of Variations]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 432 p. [in Russian].

## Сведения об авторах

### About the authors

Исмаилов Магеррам Магомед оглы, докторант Азербайджанского научно-исследовательского института водных проблем, г. Баку, Азербайджанская Республика

Maharram M. Ismailov, Doctorant of Azerbaijan Scientific Research Institute of Water Problems, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: maharram.ismailov@mail.ru

Эминов Рамиз Ахмед оглы, канд. техн. наук, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, доцент кафедры «Поиск и разведка месторождений нефти и газа», г. Баку, Азербайджанская Республика

Ramiz A. Eminov, Candidate of Engineering Sciences, Azerbaijan State Oil and Industry, University Assistant Professor of Search and Survey of Oil and Gas Deposits Department, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: eminovramiz@mail.ru

Асланова Айтген Баба гызы, старший научный сотрудник Института космических исследований природных ресурсов, г. Баку, Азербайджанская Республика

Ayten B. Aslanova, Senior Researcher of Natural Resources Space Research Institute, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: aslanova1989@mail.ru