

Методы и модели системного анализа

Вопросы системного анализа средств пассивного дистанционного зондирования атмосферных газов

Х.Г. Асадов, Н.Ш. Абилова

Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Республика
Азербайджан

Аннотация. Рассмотрены вопросы системного анализа и синтеза систем пассивного дистанционного зондирования атмосферных газов. Показана возможность применения решения задачи Эйлера в области вариационного исчисления для оптимизации пассивного дистанционного зондирования атмосферных газов. Составлен функционал цели, названный функционалом Эйлера-Бугера и проанализированы условия оптимизации трех режимов измерения атмосферных газов: без производного спектра, с основным и производным спектром, только с использованием производного спектра. Рассмотрен подход формирования требований к основному и производному сигналу проводимых пассивных атмосферных измерений в оптимальном режиме по квадратичному интегральному критерию в виде суммы основного и производного сигнала.

Ключевые слова: *оптическая толщина, внеатмосферное излучение, дистанционное зондирование, атмосферные газы, системный анализ.*

DOI: 10.14357/20790279240205 **EDN:** JZK0VC

Введение

Можно с уверенностью сказать, что существует определенные пробелы в области системного анализа пассивных систем дистанционного зондирования (ДЗ) с применением метода производной спектроскопии. Анализ существующих работ по применению производных методов спектроскопии в дистанционном зондировании [1-5] показал, что применение суммы основного и производного спектра осуществляется применительно к выявлению спектральных признаков наличия отдельно взятых компонент, представляющих определенный интерес для исследователя. Однако если рассматривать аналогичную задачу в более широком плане, а именно ставить цель выявления

спектральных признаков ранее не предполагаемых компонентов в исследуемой среде, то приходим к решению задачи повышения потенциальной общей информативности систем дистанционного зондирования в широком интервале длин волн. Данная задача достижения экстремума информативности неявным образом решается с применением метода вариационной оптимизации предложенного функционала Эйлера-Бугера.

Хорошо известно, что пассивные системы дистанционного зондирования не требуют дополнительного излучения исследуемого объекта и используют естественные природные излучения, такие как Солнце, Луна, атмосферы или собственное излучение различных исследуемых объектов,

включая излучение Земли [6-8]. Пассивные системы дистанционного зондирования используются в основном для измерения концентрации атмосферных газов [8-11], для измерения собственной температуры отдельных предметов, для исследования химического состава веществ, для определения оптических характеристик предметов и т.д. Основным здесь является уравнение Бугера-Бера, согласно которому

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-m\tau(\lambda)], \quad (1)$$

где $I_0(\lambda)$ -поток исходного оптического излучения естественно происхождения, т.е. природное излучение, дополнительно не вносимое для проведения измерений; $I(\lambda)$ -поток излучения на входе измерительного устройства; m -оптическая масса, характеризующая наклон прямого луча излучателя относительно перпендикуляра к поверхности плоскости в которой размещен измеритель, т.е. зенитный угол излучателя; $\tau(\lambda)$ -оптическая толщина исследуемого объекта, в случае измерения атмосферных газов.

Например, при измерении общего количества озона оптическая толщина может быть определена как [12]:

$$\tau(\lambda) = \alpha(\lambda)CL, \quad (2)$$

где $\alpha(\lambda)$ -коэффициент ослабления (поглощения) озона; C -концентрация озона в атмосфере; L -толщина атмосферного слоя, в котором размещен озон.

Схема проведения наземных озоновых измерений приведена на рис. 1.

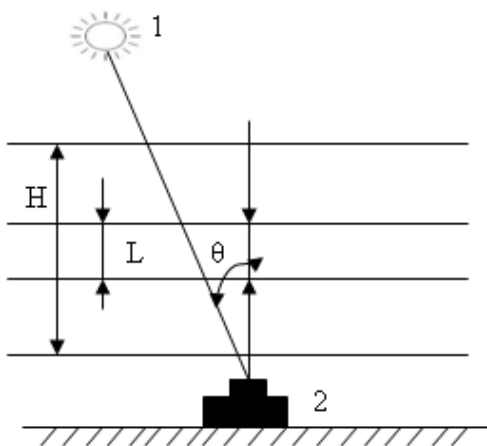


Рис. 1. Схематическое представление наземных озоновых измерений: 1-Солнце; 2-измеритель; H-толщина атмосферного слоя; L-толщина эквивалентного озонового слоя; θ -зенитный угол Солнца

В общем случае, принципы системного анализа в достаточной степени известны и одним из них является синтез оптимальной модели рассматриваемого объекта путем создания математической модели, оптимизация этой модели с учетом выбранного критерия оптимизации и синтез оптимальной модели [13-15]. Что касается спектральных измерений, то в этой области практикуются такие методы совместных измерений как:

- исследование основного спектра (поглощения и отражения) [16];
- исследование суммы основного и производного спектров [17];
- исследование только производных спектров [18].

Например, применительно к наземным измерениям атмосферного озона представляют интерес не только исследование основного спектра, но также и производного спектра. Такие измерения проводятся как в области ультрафиолетового излучения, так и в видимой области спектра.

Вместе с тем, задача оптимизации проведения совместных основных и производных спектральных измерений с точки зрения системного подхода еще не решена. Данная задача часто решается на экспериментальной основе в плане подбора весовых коэффициентов их сложения. Целью настоящей статьи является разработка метода оптимизации совместных спектральных измерений (на примере D3 атмосферных газов) с учетом принципов системного анализа.

1. Материалы и методы

Для решения задачи оптимизации совместных спектральных измерений, в которых используется сумма основного и производного спектра (возможно взвешенная сумма) в первую очередь следует определить критерий такой оптимизации. Как нам представляется, наиболее пригодным для решения указанной задачи является функционал Эйлера, рассматриваемая в теории вариационного исчисления. Согласно [19] этот функционал имеет вид:

$$F_0 = \int_a^b F_0[y(x); y'(x); x] dx. \quad (3)$$

В теории вариационного исчисления суть задачи Эйлера заключается в нахождении такой функции $y(x)$ при которой F_0 достиг бы максимума. Решение указанной задачи определяется уравнением Эйлера [19]

$$\frac{\partial F_0}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial F_0}{\partial y'} \right] = 0 \quad (4)$$

Из условия (4) вытекают два частных случая:

- Если F_0 явно не зависит от y' то получаем [19]:

$$\frac{\partial F_0}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

2) Если F_0 явно не зависит от y , то:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial F_0}{\partial y'} \right] = 0. \quad (6)$$

Из условия (6) получаем

$$\frac{\partial F_0}{\partial y'} = \text{const}. \quad (7)$$

Также возможен случай

$$\frac{\partial F_0}{\partial y'} = 0. \quad (8)$$

Рассмотрим возможность совместного использования задачи Эйлера (3) и уравнения Бугера-Бера (1).

С учетом (1) и (3) составим функционал цели для оптимизации совместных атмосферных спектральных измерений, которую назовем функционалом Эйлера-Бугера:

$$F_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0[I(\lambda); I'(\lambda); \lambda] d\lambda, \quad (9)$$

где λ -длина волны проводимых измерений.

Блок-схема предлагаемого измерителя F_1 , где

$$F_0 = [I(\lambda) + I'(\lambda)]^2, \quad (10)$$

показана на рис. 2.

Аналогично (4) для функционала (9) напишем условие решения:

$$\frac{\partial F_0}{\partial I(\lambda)} - \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{\partial F_0}{\partial I'(\lambda)} \right] = 0. \quad (11)$$

Рассмотрим условия (10) применительно к вышеотмеченным режимам спектральных измерений:

1. Использование только основного спектра, т.е. F_0 не содержит $I'(\lambda)$. В этом случае оптимизация спектральных измерений осуществляется по условию:

$$\frac{\partial F_0}{\partial I(\lambda)} = 0. \quad (12)$$

2. Совместное использование $I(\lambda)$ и $I'(\lambda)$. В этом случае оптимизация осуществляется по условию (10).

3. Использование только $I'(\lambda)$, т.е. производная спектроскопия. В этом случае используется выражение:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{\partial F_0}{\partial I'(\lambda)} \right] = 0. \quad (13)$$

В качестве конкретного примера предлагаемого метода второй из вышеотмеченных режимов оптимизации, где целевой функционал оптимизации Эйлера-Бугера с учетом выражений (9) и (10) принимает следующий вид:

$$F_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I(\lambda) + I'(\lambda)]^2 d\lambda. \quad (14)$$

Для вычисления оптимального режима измерений применим условие (10) к функционалу (12), переходя от частных производных к обычным.

Имеем:

$$\frac{dF_0}{dI'(\lambda)} = 2[I(\lambda) + I'(\lambda)]; \quad (15)$$

$$\frac{dF_0}{dI(\lambda)} = 2[I(\lambda) + I'(\lambda)]; \quad (16)$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left[\frac{dF_0}{dI'(\lambda)} \right] = 2[I'(\lambda) + I''(\lambda)]. \quad (17)$$

С учетом (15)-(17) получим:

$$2[I(\lambda) + I'(\lambda)] - 2[I'(\lambda) + I''(\lambda)] = 0. \quad (18)$$

Примем обозначение:

$$z(\lambda) = I(\lambda) + I'(\lambda). \quad (19)$$

В этом случае с учетом (18) и (19) получаем следующее дифференциальное уравнение:

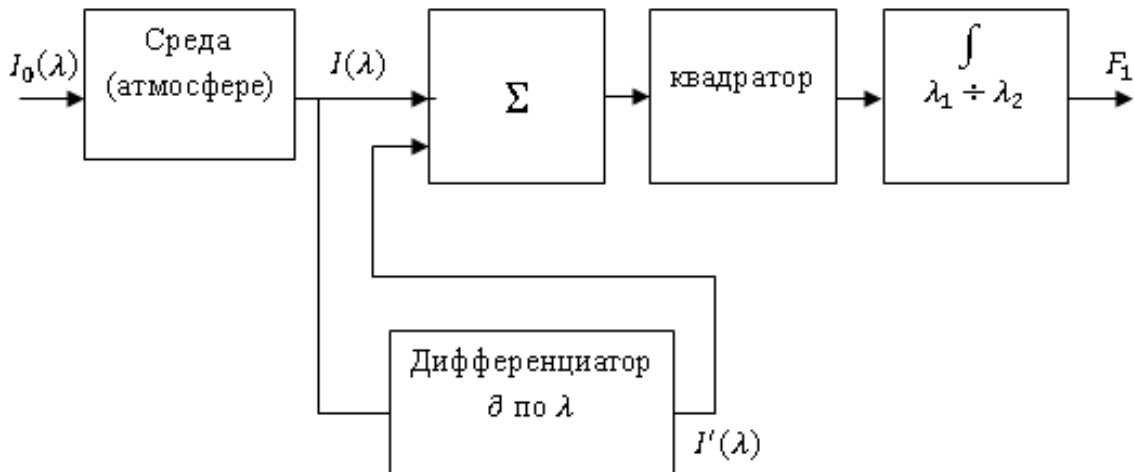


Рис. 2. Блок-схема измерителя F_1

$$z - \frac{dz}{d\lambda} = 0. \quad (20)$$

Уравнение (20) приведем к виду:

$$\frac{dz}{z} = \lambda. \quad (21)$$

Интегрируя (21) получим:

$$\ln z = \lambda + c \quad (22)$$

или

$$z = \exp(\lambda + c), \quad (23)$$

где c – постоянная интегрирования.

С учетом (17) и (21) получим:

$$I(\lambda) + I'(\lambda) = \exp(\lambda + c). \quad (24)$$

Из выражения (22) можно заключить следующие правила выбора функции $I(\lambda)$ для реализации оптимального режима измерений:

- 1) Если в диапазоне длин волн $\lambda_1 + c - \lambda_2 + c$ имеет место неравенство

$$I(\lambda) > \exp(\lambda + c), \quad (25)$$

то функция $I(\lambda)$ в указанном диапазоне должна удовлетворить условию

$$I'(\lambda) < 0; I'(\lambda) = \exp(\lambda + c) - I(\lambda). \quad (26)$$

- 2) Если в диапазоне длин волн $\lambda_1 + c - \lambda_2 + c$ имеет место неравенство

$$I(\lambda) < \exp(\lambda + c), \quad (27)$$

то функция $I(\lambda)$ в указанном диапазоне должна удовлетворить условию:

$$I'(\lambda) > 0; I'(\lambda) = \exp(\lambda + c) - I(\lambda). \quad (28)$$

Условия (25)-(26) иллюстрированы на рис. 3.

На рис. 4 приведена условная графическая интерпретация условий (27) и (28).

2. Обсуждение

Таким образом рассмотрен вопрос о применении условий уравнения Эйлера для оптимизации трех режимов пассивного дистанционного зондирования атмосферных газов. Обсуждены режимы использования только основного сигнала спектрометра, совместной суммы основного и производного сигнала, только производного сигнала. В качестве примера рассмотрен квадратичный функционал оптимизации, составленный из квадрата суммы основного измерительного сигнала пассивного зондирования атмосферы и его производной по длине волны. Определены основные требования к указанным функциям в оптимальном режиме измерения на выбранном интервале длин волн.

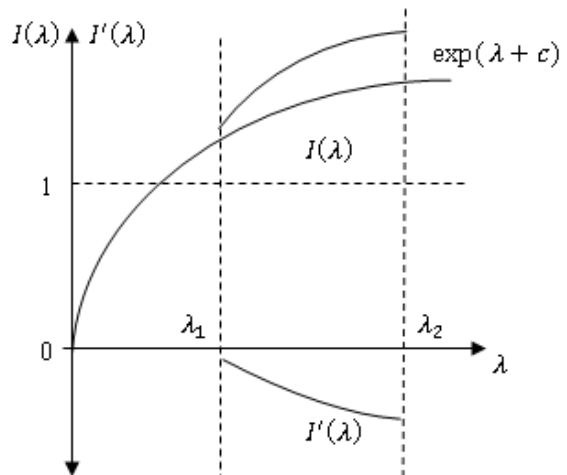


Рис. 3. Условная графическая интерпретация условий (25) и (26) для выбора оптимальной функции $I(\lambda)$

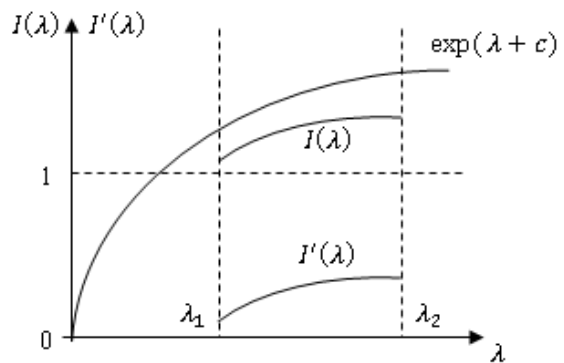


Рис. 4. Условная графическая интерпретация условий (27) и (28) для выбора оптимальной функции $I(\lambda)$

Заключение

Предложено применение решения задачи Эйлера в области вариационного исчисления для оптимизации пассивного дистанционного зондирования атмосферных газов. Составлен функционал цели, названный функционалом Эйлера-Бугера и проанализированы условия оптимизации трех режимов измерения атмосферных газов: без производного спектра, с основным и производным спектром, только с использованием производного спектра.

Литература

1. Ortiz J.D., Avouris D.M., Schiller S.J., Luvall J.C., Lekki J.D. Evaluating visible derivative

- spectroscopy by varimax-rotated, principal component analysis of aerial hyperspectral images from the western basin of lake Erie// *Journal of great lakes research*. 45(3). 2019. P. 522-535. <http://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.03.005>.
2. *Bostater C.R.* High order derivative spectroscopy for selecting spectral regions&channels for remote sensing algorithm development// Part of the EUROPTO Conference on remote Sensing for earth science applications. Florence, Italy. September 1999.
 3. *Shafique N.A., Fulk F., Cornier S.M., Autrey B.C.* Coupling hyperspectral remote sensing with field spectrometer to monitor inland water quality parameters.
 4. *Hong Y., Chen Y., Yu L., Liu Y., Zhang Y., Liu Y., Cheng H.* Combining fractional order derivative and spectral variable selection for organic matter estimation of homogeneous soil samples by VIS-NIR spectroscopy// *Remote Sens*. 2018. P. 479.
 5. *Louchard E.M., Reid R.P., Stephens C.F., Davis C.O., Leathers R.A., Downes T.V.* Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments// *Optics express*. Vol. 10. No. 26. 2002.
 6. *Girona T., Realmuto V., Lundgren P.* Large-scale thermal unrest of volcanoes for years prior to eruption// *Nature Geoscience* 14. 2021. P. 238-241.
 7. *Chuvieco E., Mouillot F., Werf G. R., San Miguel J., Tanase M., Koutsias N. et al.* Historical background and current developments for mapping burned area from satellite observation// *Remote Sens. Environ*. 225. 2021. P. 45-64.
 8. *Klapp I., Yafin P., Oz N., Brand O., Bahat I., Goldshtein E, et al.* Computational end-to-end and super-resolution methods to improve thermal infrared sensing for agriculture// *Precision agriculture* 22. 2021. P. 452-474.
 9. *Klanner L., Hoveler K., Khordakova D., Perfahl M., Rolf C., et al.* A powerful lidar system capable of 1 h measurements of water vapour in the troposphere and the lower stratosphere as well as the temperature in the upper stratosphere and mesosphere// *Atmos. Meas. Tech*. 14. 2021. P. 531-555.
 10. *Kuhn J., Bobrowski N., Lubcke P., Vogel L., Platt U.* A fabry-perot interferometer-based camera for two-dimensional mapping of SO₂ distributions// *Atmos. Meas. Tech*. 7. 2014. <https://doi.org/10.5194/amt-7-3705-2014>.
 11. *Kuhn J., Bobrowski N., Platt U., Wagner T.* Towards imaging of atmospheric trace gases using Fabry-Perot interferometer correlation spectroscopy in the UV and visible spectral range// *Atmos. Meas. Tech*. 12. 2019. <https://doi.org/10.5194/amt-12-735-2019>.
 12. *Гуцин Г.П., Виноградова И.Н.* Суммарный озон в атмосфере// Гидрометеоздат. 1983. С. 121.
 13. *Горбунов К.Ю., Любецкий В.А.* Линейный алгоритм кратчайшей перестройки графов при разных ценах операций// *Информаций. Процессы*. 2016. Т. 16. № 2. С. 223-236.
 14. *Lyubetsky V.A., Gershgorin R.A., Seliverstov A.V., Gorbunov K.Yu.* Algorithms for reconstruction of chromosomal structures// *BMC Bioinformatics*. 2016. Vol. 17. P. 40.1-40.23.
 15. *Braga M.D.V., Stoye J.* Sorting linear genomes with rearrangements and indels// *IEEE/ACM trans. On computational biology and bioinformatics*. 2015. Vol. 12. No. 3. P. 1-13.
 16. *Poberovskii A.V., Makarova M.V., Rakitin A.V. et al.* Variability of total column amounts of climate influencing gases obtained from ground based high resolution spectroscopy measurements// *Dokl. Akad. Nauk* 432 (2). 2010. P. 257-259.
 17. *Ельчищева Ю.Б.* Спектрофотометрические методы анализа: учебное пособие// Пермский государственный национальный исследовательский университет. 2023. С. 188.
 18. *Абрамов В.М., Егоров А.Д., Потанова И.А.* Методологические основы оптической спектрометрии атмосферного аэрозоля для геоинформационного обеспечения поддержки решений при рациональном природопользовании// *Спецлит*. 2016. С. 103.
 19. *Михайлов А.В.* Методы оптимизации а примерах и задачах// М. Издательский комплекс МГУПП. 2009. С. 93.

Асадов Хикмет Гамид оглы. НИИ Аэрокосмической информатики Национального Аэрокосмического Агентства, г. Баку, Республика Азербайджан. Начальник отдела. Доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, системный анализ, дистанционное зондирование, экология. E-mail: asadzade@rambler.ru (ответственный за переписку)

Абилова Наргиз Шамил гызы. НИИ Аэрокосмической информатики Национального Аэрокосмического Агентства, г. Баку, Республика Азербайджан. Зам. начальника отдела. Докторант (аспирант). Область научных интересов: информационно-измерительные системы, системный анализ, дистанционное зондирование, экология. E-mail: nergiz.ebilova36@gmail.com

Issues of system analysis of passive remote sensing of atmospheric gases

H.H. Asadov, N.S. Abilova

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract. The issues of system analysis and synthesis of passive remote sensing systems for atmospheric gases are considered. The possibility of applying the solution of the Euler problem in the field of calculus of variations to optimize passive remote sensing of atmospheric gases is considered. The objective functional, called the Euler-Booger functional, is compiled and the optimization conditions for three atmospheric gas measurement modes are analyzed: (a) without a derivative spectrum; (b) with a basic and derivative spectrum; (c) using the derived spectrum only. Equations are obtained for the formation of an optimal relationship between the optical thickness of the atmosphere and the extra-atmospheric solar radiation flux at which the target functional called the Euler-Booger functional reaches a maximum.

Keywords: optical thickness, extra-atmospheric radiation, remote sensing, atmospheric gases, system analysis

DOI: 10.14357/20790279240205 **EDN:** JZKOBC

References

1. Ortiz J.D., Avouris D.M., Schiller S.J., Luvall J.C., Lekki J.D. Evaluating visible derivative spectroscopy by varimax-rotated, principal component analysis of aerial hyperspectral images from the western basin of lake Erie// *Journal of great lakes research*. 45(3). 2019. P. 522-535. <http://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.03.005>.
2. Bostater C.R. High order derivative spectroscopy for selecting spectral regions&channels for remote sensing algorithm development// Part of the EUROPTO Conference on remote Sensing for earth science applications. Florence, Italy. September 1999.
3. Shafique N.A., Fulk F., Cornier S.M., Autrey B.C. Coupling hyperspectral remote sensing with field spectrometer to monitor inland water quality parameters.
4. Hong Y., Chen Y., Yu L., Liu Y., Zhang Y., Liu Y., Cheng H. Combining fractional order derivative and spectral variable selection for organic matter estimation of homogeneous soil samples by VIS-NIR spectroscopy// *Remote Sens*. 2018. P. 479.
5. Louchard E.M., Reid R.P., Stephens C.F., Davis C.O., Leathers R.A., Downes T.V. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments// *Optics express*. Vol. 10. No. 26. 2002.
6. Girona T., Realmuto V., Lundgren P. Large-scale thermal unrest of volcanoes for years prior to eruption// *Nature Geoscience* 14. 2021. P. 238-241.
7. Chuvieco E., Mouillot F., Werf G. R., San Miguel J., Tanase M., Koutsias N. et al. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite observation// *Remote Sens. Environ*. 225. 2021. P. 45-64.
8. Klapp I., Yafin P., Oz N., Brand O., Bahat I., Goldshtein E, et al. Computational end-to-end and super-resolution methods to improve thermal infrared sensing for agriculture// *Precision agriculture* 22. 2021. P. 452-474.
9. Klanner L., Hoveler K., Khordakova D., Perfahl M., Rolf C., et al. A powerfull lidar system capable of 1 h measurments of water vapour in the troposphere and the lower stratosphere as well as the temperature in the upper stratosphere and mesosphere// *Atmos. Meas. Tech*. 14. 2021. P. 531-555.
10. Kuhn J., Bobrowski N., Lubcke P., Vogel L., Platt U. A fabry-perot interferometer-based camera for two-dimensional mapping of SO₂ distributions// *Atmos. Meas. Tech*. 7. 2014. <https://doi.org/10.5194/amt-7-3705-2014>.
11. Kuhn J., Bobrowski N., Platt U., Wagner T. Towards imaging of atmospheric trace gases using Fabry-Perot interferometer correlation spectroscopy in the UV and visible spectral range// *Atmos. Meas. Tech*. 12. 2019. <https://doi.org/10.5194/amt-12-735-2019>.
12. Gushchin G.P., Vinogradova I.N. Total ozone in the atmosphere// *Hydrometeorological data*. 1983. p. 121.(In Russ).
13. Gorbunov K.Yu., Lyubetsky V. A. Linear algorithm of the shortest graph rearrangement at different transaction prices// *Informatiy. Processes*. 2016. Vol. 16. No. 2. P. 223-236 (In Russ).
14. Lyubetsky V.A., Gershgorin R.A., Seliverstov A.V., Gorbunov K.Yu. Algorithms for reconstruction of chromosomal structures// *BMC Bioinformatics*. 2016. V. 17. P. 40.1-40.23.
15. Braga M.D.V., Stoye J. Sorting linear genomes with rearrangements and indels// *IEEE/ACM trans. On computational biology and bioinformatics*. 2015. Vol. 12. No. 3. P. 1-13.
16. Poberovskii A.V., Makarova M.V., Rakitin A.V. et al. Variability of total column amounts of climate

- influencing gases obtained from ground based high resolution spectroscopy measurements// Dokl. Akad. Nauk 432 (2). 2010. P. 257-259.
17. *Yelchishcheva Yu.B.* Spectrophotometric methods of analysis: textbook// Perm State National Research University. 2023. P. 188 (In Russ).
18. *Abramov V.M., Egorov A.D., Potapova I.A.* Methodological foundations of optical spectrometry of atmospheric aerosol for geoinformation support of decision support in rational environmental management// Special edition. 2016. P. 103 (In Russ).
19. *Mikhailov A.V.* Optimization methods in examples and tasks// M. Publishing complex MGUPP. 2009. P. 93 (In Russ).

Asadov Hikmet Hamid oglu. Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. The head of the department. Doctor of Technical Sciences, Professor. Research interests: information and measurement systems, system analysis, remote sensing, ecology.
E-mail: asadzade@rambler.ru (responsible for correspondence)

Abilova Nargiz Shamil gizi. Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerocosmic Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. Deputy. the head of the department. Doctoral student (post-graduate student). Research interests: information and measurement systems, system analysis, remote sensing, ecology.
E-mail: nergiz.ebilova36@gmail.com