

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

М. В. ПОСТРЫБАЙЛО, Т. М. ТАТАРНИКОВА*

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Санкт-Петербург, Россия

**tm-tatarn@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрена задача проектирования системы мониторинга грозовой активности на основе датчиков, оценивающих параметры молниевых разрядов путем приема электромагнитного излучения, формируемого при движении электрического заряда по каналу молнии. Показано, что для обеспечения основных характеристик проектируемых систем мониторинга грозовой активности, таких как вероятность обнаружения, точность определения координат и тока молниевых разрядов для выбранной рабочей зоны, может быть использовано математическое моделирование. Предложена модель, позволяющая спроектировать конфигурацию системы, способной обеспечить заданные характеристики посредством получения модельных оценок и их последующего анализа. Созданная модель системы мониторинга грозовой активности применена для оценивания вероятности обнаружения молниевых разрядов экспериментальной сетью, развернутой в Санкт-Петербурге.

Ключевые слова: грозовая активность, молниевый разряд, система мониторинга, чувствительность датчика, напряженность электрического поля, расстояние до молниевых разрядов, вероятность обнаружения

Ссылка для цитирования: Пострыбайло М. В., Татарникова Т. М. Модельные оценки параметров пассивных радиотехнических систем мониторинга грозовой активности // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 4. С. 368—374. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-368-374.

MODEL ESTIMATES OF PARAMETERS OF PASSIVE RADIO SYSTEMS FOR MONITORING LIGHTNING ACTIVITY

M. V. Postrybaylo, T. M. Tatarnikova*

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

**tm-tatarn@yandex.ru*

Abstract. The problem of designing a system for monitoring lightning activity is considered. The designed system is based on sensors that evaluate lightning discharge parameters by receiving electromagnetic radiation generated when an electric charge moves along the lightning channel. It is shown that mathematical modeling can be used to ensure the basic characteristics of the designed systems for monitoring lightning activity, such as the probability of detection, the accuracy of determining the coordinates and current of a lightning discharge for a selected working area. A model is proposed that makes it possible to design a system configuration capable of providing specified characteristics by obtaining model estimates and their subsequent analysis. The created model of a lightning activity monitoring system is used to estimate the probability of detecting a lightning discharge by an experimental network deployed in St. Petersburg.

Keywords: thunderstorm activity, lightning discharge, monitoring system, sensor sensitivity, electric field strength, distance to lightning discharge, detection probability

For citation: Postrybaylo M. V., Tatarnikova T. M. Model estimates of parameters of passive radio systems for monitoring lightning activity. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 4. P. 368—374 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-368-374.

Введение. Гроза представляет собой распространенное природное явление, способное подвергнуть опасности жизни людей, нанести ущерб объектам инфраструктуры, стать причиной возникновения пожаров [1, 2]. Особую опасность грозы представляют для электроники и энергетических систем. От 40 до 70 % аварийных отключений воздушных линий электропередач связано с грозовой активностью [3]. Удары молнии могут повлиять на движение лета-

тельных аппаратов или нарушить их функционирование [4]. Также грозы могут сопровождать другие природные явления, такие как шторм, сильный ливневый дождь, град и др. [5, 6].

Оперативная и достоверная информация о грозовой активности, получаемая с помощью систем мониторинга грозовой активности, позволяет формировать прогнозы погоды, исследовать климат, проектировать системы грозозащиты различных объектов [1, 7, 8].

В настоящее время пассивные системы мониторинга грозовой активности могут состоять либо из автономных датчиков, способных получать оценку параметров молниевых разрядов (МР) из одной точки, или из датчиков, работающих в составе сетей, использующих триангуляционный либо разностно-дальномерный методы. Существуют также спутниковые системы, способные оценивать координаты МР за счет приема излучения в ближнем инфракрасном диапазоне [9, 10]. Настоящая статья посвящена пассивным системам мониторинга грозовой активности, использующим угломерный и разностно-дальномерный методы определения координат МР.

Очевидно, что основными характеристиками систем, важными для конечного пользователя, являются вероятность обнаружения, точность определения координат и параметров тока МР для выбранной рабочей зоны. Для получения заданных характеристик нужно выбрать тип датчика, метод определения координат МР, порог чувствительности и число датчиков. При решении этой задачи можно воспользоваться математическим моделированием. Модель позволяет выбрать методы, подходящие для получения данных о разрядах датчиками молний, а также спроектировать конфигурацию системы, способную обеспечить заданные характеристики посредством получения модельных оценок и их последующего анализа [11, 12].

В настоящей работе представлены модель системы мониторинга грозовой активности, позволяющей оценить вероятность обнаружения МР, и результаты оценивания для реальной экспериментальной сети, развернутой в Санкт-Петербурге [13].

Оценка вероятности обнаружения МР. Из литературы [14] известно, что амплитуды обратных ударов МР подчинены логнормальному распределению. При наличии данных о распределении амплитуд сигналов $p_R(x)$, принятых датчиком на расстоянии R , и чувствительности датчика E вероятность обнаружения МР можно найти по формуле:

$$P = \int_E^{+\infty} p_R(x) dx. \quad (1)$$

В диссертации [15] приведены параметры вероятностного распределения амплитуд напряженности электрического поля $p(x)$ для расстояния 100 км. Для решения задачи оценивания вероятности обнаружения МР можно пересчитать это распределение на заданное расстояние R либо использовать известное распределение амплитуд сигналов для расстояния 100 км и рассчитать пороговое значение $E_{\text{пор}}$ по формуле [16]:

$$E_{\text{пор}}(E, R) = E \left(\frac{R}{100} \right)^{\frac{R-100}{1000}}. \quad (2)$$

Таким образом, вероятность обнаружения МР датчиком на расстоянии R с известной функцией плотности распределения вероятности (ФПРВ) амплитуд напряженности электрического поля составит:

$$P = \int_{E_{\text{пор}}(E, R)}^{+\infty} p(x) dx. \quad (3)$$

Для сети из N датчиков вероятность обнаружения МР рассчитывается по формуле:

$$P = \prod_{i=1}^N P_i, \quad (4)$$

где P_i — вероятность обнаружения молнии i -м датчиком.

Таким образом, на вход предлагаемой модели передаются ФПРВ приведенных оценок напряженности электрического поля, чувствительность датчиков и расстояние до молниевых разрядов. Результатом работы модели является оценка вероятности обнаружения МР для заданной сети.

В качестве исходных данных использованы параметры ФПРВ, оценки которых приведены в [15] для экспериментально полученных значений. На рис. 1 представлена ФПРВ бимодального логнормального распределения (вертикальный пунктир — нормированное значение порога напряженности поля $E_{\text{пор}}$, оранжевый пунктир — ФПРВ с параметрами $\sigma = 0,35$, $\mu = 1,6$, зеленый пунктир — ФПРВ с $\sigma = 0,15$, $\mu = 2,28$).

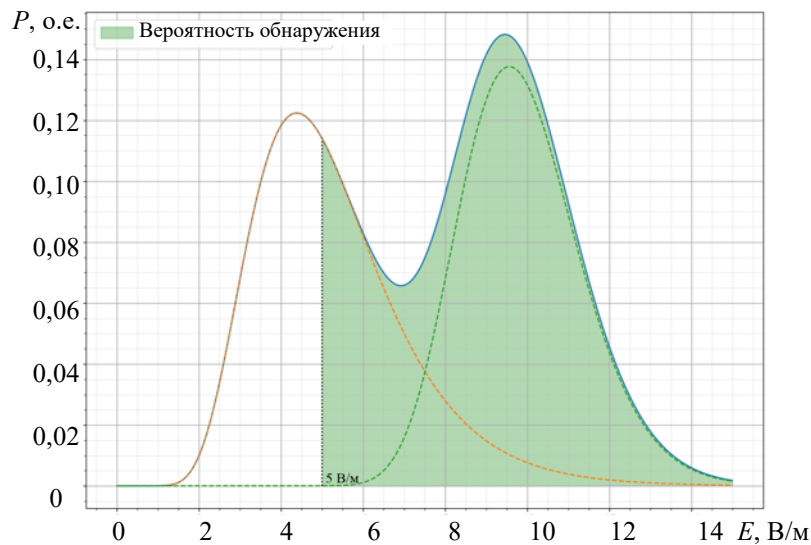


Рис. 1

В настоящей работе модель реализована с помощью среды технических расчетов MatLab. На первом этапе задаются входные параметры модели, координаты используемых в системе датчиков. Далее ограничивается зона потенциальных положений молниевых разрядов, для каждой точки внутри зоны рассчитывается расстояние от приемника, и на основе имеющихся данных оценивается вероятность обнаружения МР для конкретной точки.

Результаты моделирования. Моделирование проводилось для системы, состоящей из пяти универсальных датчиков молний, реализующих угломерный и разностно-дальномерный методы определения координат МР [13]. Используемые сетью приемники расположены в местах:

- 1) НОЦ ВКА им. А.Ф. Можайского (59.95631, 30.28847);
- 2) кафедра радиофизики СПбГУ, Петергоф, (59.88134, 29.82509);
- 3) Центр детско-юношеского технического творчества и информационных технологий, Пушкинский район Ленинградской области (59.715553, 30.412581);
- 4) деревня Вартемяги Всеволожского района Ленинградской области (60.1708, 30.31895);
- 5) поселок Воейково Всеволожского района Ленинградской области (59.95014, 30.70945).

Для угломерного метода определения координат минимально-избыточное число датчиков равно трем, что позволяет минимизировать ошибку местоопределения при наличии МР

на одной оси с базой системы. На рис. 2 представлены оценки вероятности обнаружения молниевых разряда угломерным методом для трех датчиков сети.

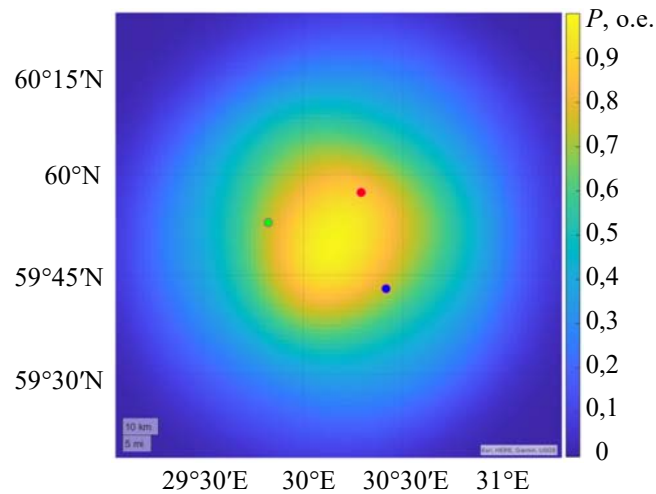


Рис. 2

Для разностно-дальномерного метода определения координат использование четырех датчиков является минимально-избыточным, что позволяет однозначно определить координаты МР [17]. На рис. 3 представлены оценки вероятности обнаружения молниевых разряда разностно-дальномерным методом определения координат для четырех датчиков сети.

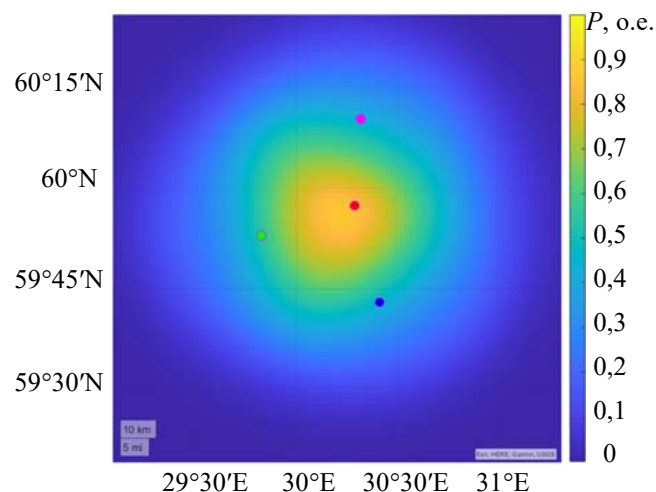


Рис. 3

Сравнив рис. 2 и 3, можно увидеть снижение значений оценок вероятности обнаружения МР с увеличением числа используемых датчиков, что соответствует результатам расчетов по формуле (4), а также, согласно (2) — с увеличением расстояния от центра сети до МР.

В настоящей работе с помощью модели оценена вероятность обнаружения МР для каждой возможной конфигурации из трех и четырех датчиков, использующихся в экспериментальной сети [13]. На рис. 4 и 5 изображены оценки вероятности обнаружения среди возможных конфигураций датчиков для угломерного (три датчика) и разностно-дальномерного методов (четыре датчика) соответственно.

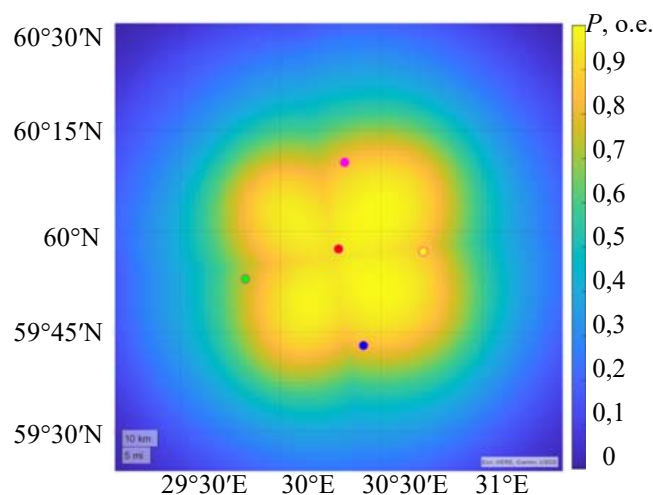


Рис. 4

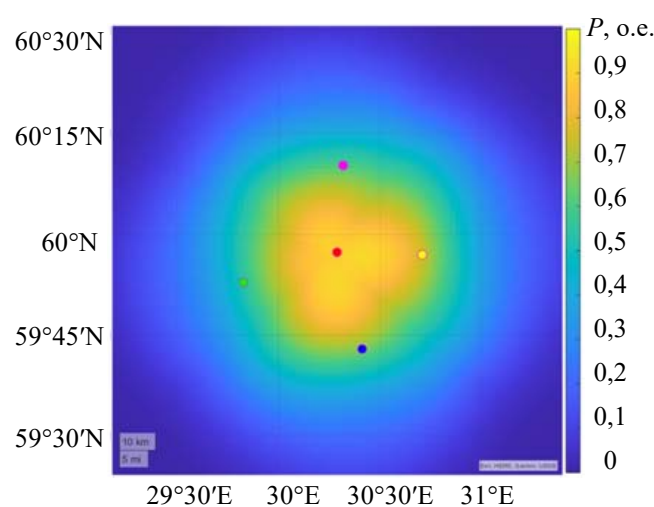


Рис. 5

На рис. 2—5 разноцветными точками представлены места расположения датчиков, используемых при оценке эффективности обнаружения, на вспомогательной цветной полосе справа градиент от светло-желтого к темно-синему цвету соответствует значениям оценки вероятности обнаружения.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что при равной чувствительности датчиков можно добиться различных значений вероятности обнаружения в зависимости от числа датчиков. По сравнению с разностно-дальномерным методом, при использовании угломерного метода оценка вероятности обнаружения выше, а площадь зон с равной оценкой эффективности обнаружения больше.

Вне зависимости от используемого метода определения координат возможным решением задачи обеспечения большей вероятности обнаружения является повышение чувствительности датчиков и уменьшение расстояния между ними.

Заключение. Использование предлагаемой модели при мониторинге грозовой активности позволит оценить вероятность обнаружения молниевых разрядов. Также модель может быть использована для определения конфигурации системы мониторинга с учетом положения датчиков и их чувствительности, а также метода определения координат молниевых разрядов.

Совместный учет зон равной точности и вероятности обнаружения МР с использованием предложенной модели позволит на качественно новом уровне анализировать возможности как существующих, так и перспективных систем мониторинга грозовой активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарёв Е. И. Оценка рисков возникновения лесных пожаров в результате гроз на основе гис-ориентированной технологии // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 150—154.
2. Бабилова Н. Н., Котелина Н. О., Тентюков Ф. Н. Анализ данных о лесных пожарах в республике Коми с помощью excel и python // Вестн. Сыктывкарского университета. Сер. 1. Математика. Механика. Информатика. 2023. № 4(49). С. 29—46.
3. Гайворонский А. Актуальные проблемы молниезащиты ВЛ110-500 кВ // Новости электротехники. 2019. № 1(115). С. 18—23.
4. Сагитов Д. И., Драгова Т. А., Булдакова И. А., Алимов А. В. Противодействие грозовым разрядам на фюзеляже воздушных судов // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов. Сборник материалов XXV Международной научно-практической конференции. М., 2023. С. 191—193.
5. Малкин Е. И., Чернева В. И., Махлай Д. О., Чернева Н. В., Акбашев Р. Р., Санников Д. В. Дистанционные методы наблюдений за извержениями вулканов Шивелуч и Безымянный // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2023. Т. 43, № 2. С. 141—165.
6. Хегай В. В., Карелин А. В. О связи интенсивности тропических ураганов с грозовой активностью. Взгляд из космоса // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2021. Т. 180, № 1. С. 26—32.
7. Аджиева А. А., Шаповалов В. А. Совершенствование прогнозирования и контроля развития опасных явлений погоды с использованием радиолокационных и грозопеленгационных методов на примере отдельного грозового очага // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки. 2017. № 1(193). С. 80—88.
8. Аджиева А. А., Кокоева М. Н. Динамический мониторинг данных параметров токов молний на территории юга европейской части России // Инженерный вестник Дона. 2019. № 5(56). С. 3.
9. Денисенков Д. А., Коровин Е. А. Универсальный датчик системы мониторинга грозовой активности // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. № 653. С. 164—168.
10. Миклуш В. А., Татарникова Т. М., Палкин И. И. Решение задачи экологического мониторинга акватории порта с помощью распределенной системы датчиков // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 404—411.
11. Татарникова Т. М., Богданов П. Ю., Миклуш В. А. Алгоритм размещения датчиков системы экологического мониторинга // Телекоммуникации. 2022. № 3. С. 2—9.
12. Миклуш В. А., Татарникова Т. М. Решение задачи расположения датчиков различной физической природы при организации беспроводной сенсорной сети с топологией mesh // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76, № 12. С. 15—20.
13. Готюр И. А., Коровин Е. А., Чернышев С. В., Шукин Г. Г., Юсупов И. Е. Экспериментальная сеть датчиков мониторинга грозовой активности // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 66—74.
14. Rakov V. A., Uman M. A. Lightning Physics and Effects. Cambridge University Press, 2014.
15. Юсупов И. Е. Исследование импульсного электромагнитного излучения грозового процесса в приложении к мониторингу грозовой активности: Дис. ... канд. физ. мат. наук. СПб, 2018. 202 с.
16. Снегуров А. В., Снегуров В. С. К экспериментальной оценке токов молний // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2021. № 603. С. 79—129.
17. Поздняков Е. К., Ткаченко В. Н., Коротков В. В. Увеличение точности определения координат пассивными трехпозиционными комплексами в условиях избыточности // Радиотехника и информатика. 2013. № 3(62). С. 3—6.

Сведения об авторах

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Макар Витальевич Пострыбайло | — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной информатики; E-mail: m.postrybaylo@yandex.ru |
| Татьяна Михайловна Татарникова | — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной информатики; профессор; E-mail: tm-tatarn@yandex.ru |

Поступила в редакцию 04.12.23; одобрена после рецензирования 07.12.23; принята к публикации 08.02.24.

REFERENCES

1. Ponomarev E.I. *Geografiya i prirodnyye resursy* (Geography and Natural Resources), 2011, no. 1, pp. 150–154. (in Russ.)
2. Babikova N.N., Kotelina N.O., Tentyukov F.N. *Vestnik Syktyvkar'skogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika. Informatika* (Bulletin of Syktyvkar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Computer science), 2023, no. 4(49), pp. 29–46. (in Russ.)
3. Gayvoronskiy A. *Novosti elektrotekhniki*, 2019, no. 1(115), pp. 18–23. (in Russ.)
4. Sagitov D.I., Dragova T.A., Buldakova I.A., Alimov A.V. *Aktual'nyye problemy nauki i obrazovaniya v usloviyakh sovremennykh vyzovov* (Current Problems of Science and Education in the Context of Modern Challenges), Collection of materials of the XXV International Scientific and Practical Conference, Moscow, 2023, pp. 191–193. (in Russ.)
5. Malkin E.I., Cherneva V.I., Makhlai D.O., Cherneva N.V., Akbashev R.R., Sannikov D.V. *Vestnik KRAUNTS. Fiziko-matematicheskiye nauki* (Vestnik KRAUNTS. Physical and Mathematical Sciences), 2023, no. 2(43), pp. 141–165. (in Russ.)
6. Khagai V.V., Karelin A.V. *Electromechanical matters. VNIIE studies*, 2021, no. 1(180), pp. 26–32. (in Russ.)
7. Adjieva A.A., Shapovalov V.A. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*, 2017, no. 1(193), pp. 80–88. (in Russ.)
8. Adzhieva A.A., Kokoeva M.N. *Engineering Journal of Don*, 2019, no. 5(56), pp. 3. (in Russ.)
9. Denisenkov D.A., Korovin E.A. *Proceedings of the A.F. Mozhaisky Military Space Academy*, 2016, no. 653, pp. 164–168. (in Russ.)
10. Miklush V.A., Tatarnikova T.M., Palkin I.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 5(64), pp. 404–411. (in Russ.)
11. Tatarnikova T.M., Bogdanov P.Yu., Miklush V.A. *Telecommunications*, 2022, no. 3, pp. 2–9. (in Russ.)
12. Miklush V.A., Tatarnikova T.M. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 2022, no. 12(76), pp. 15–20. (in Russ.)
13. Gotyur I.A., Korovin E.A., Chernyshev S.V., Shchukin G.G., Yusupov I.E. *Proceedings of the A.F. Mozhaisky Military Space Academy*, 2022, no. S685, pp. 66–74. (in Russ.)
14. Rakov V.A., Uman M.A. *Lightning Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2014.
15. Yusupov I.E. *Issledovaniye impul'snogo elektromagnitnogo izlucheniya grozovogo protsessa v prilozhenii k monitoringu grozovoy aktivnosti* (Study of Pulsed Electromagnetic Radiation of a Thunderstorm Process as Applied to Monitoring of Lightning Activity), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2018, 202 p. (in Russ.)
16. Snegurov A.V., Snegurov V.S. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*, 2021, no. 603, pp. 79–129. (in Russ.)
17. Pozdnyakov E.K., Tkachenko V.N., Korotkov V.V. *Radiotekhnika i informatika*, 2013, no. 3(62), pp. 3–6. (in Russ.)

Data on authors

Makar V. Postrybaylo	—	Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Informatics; E-mail: m.postrybaylo@yandex.ru
Tatyana M. Tatarnikova	—	Dr. Sci., Professor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Informatics; Professor; E-mail: tm-tatarn@yandex.ru

Received 04.12.23; approved after reviewing 07.12.23; accepted for publication 08.02.24.