

Научная статья
УДК 504:6
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.20.27.023

Модель аэродинамического контроля радиоактивного загрязнения территорий

*Иван Юрьевич Сергеев*¹
*Николай Прохорович Валуев*²
*Сергей Александрович Гузенков*²

¹*Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия*

²*Академия гражданской защиты МЧС России, Москва, Россия*

Аннотация. Описана математическая модель аэродинамического мониторинга радиоактивного загрязнения территории. Уравнение регрессии модели содержит составляющие высотной зависимости мощности дозы радиоактивного загрязнения территории и уровня космического фона. Модель позволяет определить не только общую мощность дозы излучения на высоте летательного аппарата, косвенно зависящую от уровня радиоактивного загрязнения, а осуществить дистанционное измерение мощности дозы непосредственно на поверхности территории.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение территорий, модель радиационного аэродинамического контроля, погрешность измерения мощности дозы поверхности

Для цитирования: Сергеев И.Ю., Валуев Н.П., Гузенков С.А. Модель аэродинамического контроля радиоактивного загрязнения территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 2 (25). С. 116-123.

MODEL OF AERODYNAMIC CONTROL OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF TERRITORIES

*Ivan Y. Sergeev*¹
*Nikolai P. Valuev*²
*Sergey A. Guzenkov*²

¹*Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia*

²*Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Moscow, Russia*

Abstract. A mathematical model of aerodynamic monitoring of radioactive contamination of the territory is described. The regression equation of the model contains the components of the altitude dependence of the dose rate of radioactive contamination of the territory and the level of the cosmic background. The model makes it possible to determine not only the total radiation dose rate at the height of the aircraft, which indirectly depends on the level of radioactive contamination, but to carry out remote measurement of the dose rate directly on the surface of the territory.

Keywords: radioactive contamination of territories, model of radiation aerodynamic control, error in measuring the dose rate of the surface

For citation: Sergeev I.Y., Valuev N.P., Guzenkov S.A. Model of aerodynamic control of radioactive contamination of territories // Siberian Fire and Rescue Bulletin 2022. № 2 (25). С. 116-123.

Обеспечению радиационной безопасности в Российской Федерации уделяется постоянное внимание [1-4]. Основным элементом подсистемы обеспечения радиационной безопасности является система мониторинга радиационной обстановки на территории [5]. Для выявления участков радиоактивного загрязнения на больших территориях, в особенности, в труднодоступных местах перспективно применение аэродинамических систем, содержащих высокочувствительный детектор гамма-излучения с регистрирующей аппаратурой, установленных на летательном аппарате [6].

Развитие систем аэродинамического контроля и их широкое применение сдерживается отсутствием теоретических основ построения таких систем и определения их основных параметров. Данная работа посвящена построению математической модели аэродинамических систем и расчету погрешности определения мощности дозы излучения на поверхности обследуемой территории при различной высоте летательного аппарата с детектором γ -излучения. Основой модели являются экспериментальные данные зависимости мощности дозы γ -излучения от высоты расположения детектора дозиметрической системы относительно поверхности территории. В качестве дозиметрической системы использовалась система дозиметрического контроля СИММЕТ [6], среднеквадратическая погрешность измерения которой при времени измерения 1 с не превышает 1 нЗв/ч в диапазоне 0.01 – 0,1 мкЗв/ч. Такие параметры необходимы для реализации динамического мониторинга с высокой скоростью.

Для построения графиков и регрессионного анализа использовалась платформа Desmos. Ресурс является бесплатным и находится в открытом доступе. Мы применили инструмент «графический калькулятор» для обработки полученных результатов. Кроме построения графика по экспериментальным точкам, инструментарий позволяет применить методы регрессионного анализа и подобрать параметры уравнения, график которого максимально близко располагается к экспериментальной кривой. Для расчета применяется метод наименьших квадратов и метод конечных элементов. Задается диапазон вариации коэффициентов уравнения, затем методом подбора выбираются оптимальные. График аппроксимирующей функции можно также изобразить вместе с экспериментальным, при этом система покажет рассчитанные среднеквадратичные отклонения для каждой точки, сведя в таблицу невязки. Величины отклонений для функции находятся вблизи 1, что говорит о достоверности выбранной нами функции корреляции, представленной выражениями (1, 2):

$$P_{\Sigma}(h) = P(h) + P_{\kappa}(h) \quad (1)$$

$$P_{\Sigma}(h) = P_0 \cdot e^{-kh} + P_{\kappa 0} + ah \quad (2)$$

В указанных выражениях $P_{\Sigma}(h)$ обозначает зависимость мощности дозы регистрируемого излучения от высоты (h); $P(h)$ - зависимость от высоты мощности дозы излучения радиоактивного загрязнения поверхности обследуемой территории ($P_0 \cdot e^{-kh}$); $P_{\kappa}(h)$ - зависимость от высоты мощности дозы излучения космического фона ($P_{\kappa 0} + ah$); P_0 - величина мощности дозы излучения радиоактивного загрязнения поверхности обследуемой территории при $h=0$; $P_{\kappa 0}$ - то же для космического фона; $P_{\Sigma 0}$ - то же для суммарной мощности дозы; $k=0,0109\text{м}^{-1}$ - коэффициент ослабления мощности дозы излучения радиоактивного загрязнения при увеличении высоты h , $a=0,05\frac{\text{нЗв/ч}}{\text{м}}$ - коэффициент в зависимости мощности дозы излучения космического фона от высоты.

На рис. 1 представлены экспериментальная зависимость мощности дозы от высоты (кривая с точками, обозначенными крестиками), уравнение регрессии (выражение 2) и функция невязок (нижняя кривая).

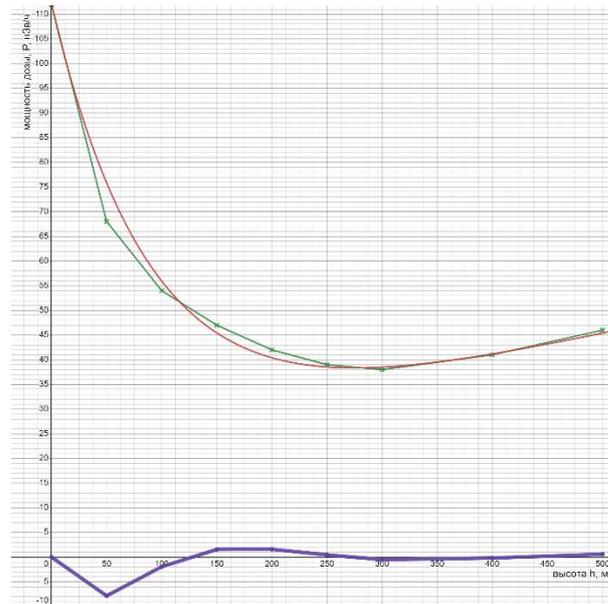


Рис. 1 Экспериментальная ($x \times x \times x$) и расчетная зависимости мощности дозы регистрируемого излучения от высоты расположения детектора дозиметрической системы относительно поверхности обследуемой территории и функция невязок

Видно, что зависимость мощности дозы регистрируемого излучения от высоты расположения детектора дозиметрической системы относительно поверхности местности имеет спадающий характер до высоты около 300 м и слабый возрастающий характер при больших значениях высоты. Это указывает на наличие двух составляющих в функции $P_{\Sigma}(h)$, определяемых уравнением (2). Первая составляющая связана с излучением радиоактивности (природной и/или техногенной) поверхностного слоя обследуемой территории; вторая – с излучением космического фона, причем мощность дозы излучения радиоактивности поверхности экспоненциально убывает с увеличением высоты летательного аппарата, а вторая – практически линейно возрастает с увеличением высоты (в пределах до 500 м). Спад мощности дозы обусловлен ослаблением излучения радиоактивности с удалением детектора от излучающей поверхности и его поглощением в воздухе. Возрастание мощности дозы космического фона связано с уменьшением толщины слоя атмосферы, поглощающей космическое излучение. Величину мощности дозы космического излучения при $h = 0$ можно экспериментально определить на поверхности водоема, расположенного в данной местности. Вода, обладая чрезвычайно низкой радиоактивностью (0,1 Бк/л и менее) экранирует излучение природного фона, создаваемого слоем грунта. В связи с этим на поверхности водоема фиксируется только излучение космического фона. Кроме того, эту величину можно найти путем анализа уравнения регрессии (2), интерполируя линейный нарастающий участок функции $P_{\Sigma}(h)$ на ось ординат. Соответственно определяется и мощность дозы излучения радиоактивности поверхностного слоя при $h = 0$, как разность суммарной мощности дозы $P_{\Sigma 0}$ и мощности дозы космического фона $P_{к0}$. Сама величина $P_{\Sigma 0}$ определяется как

$$P_{\Sigma 0} = P_0 + P_{к0} \quad (3)$$

На рис. 2 представлены высотные зависимости суммарной мощности дозы регистрируемого излучения $P_{\Sigma}(h)$ и ее составляющие $P(h)$, $P_{к}(h)$. Анализ представленных данных показывает, что для определения мощности дозы излучения поверхностного слоя обследуемой территории недостаточно использовать только величину мощности дозы

регистрируемого излучения, т.к. в ее состав входит и космический фон, также зависящий от высоты. Функция $P(h)$ имеет резкий (экспоненциальный) характер. Величина мощности дозы излучения поверхности быстро падает с увеличением высоты расположения летательного аппарата с дозиметрической системой. На высоте 100 м мощность дозы уменьшается в 3 раза, на высоте 200 м – в 9 раз, на высоте 300 м – в 37 раз. Мощность дозы регистрируемого излучения снижается значительно в меньшей степени: соответственно, 100 м - в 2 раза, 200 м - 2,6 раза и 300 м - 2,8 раза. Это указывает на необходимость учета уровня космического фона на данной высоте летательного аппарата при определении мощности дозы радиоактивного загрязнения обследуемой территории.

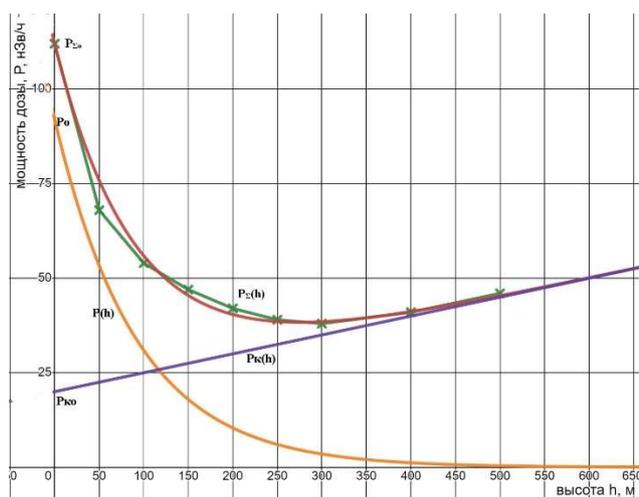


Рис. 2 Зависимость от высоты мощности дозы регистрируемого излучения $P_{\Sigma}(h)$, мощности дозы излучения поверхности обследуемой территории $P(h)$, и мощности дозы космического фона $P_k(h)$.

В процессе обследования территории необходимо определять величину мощности дозы излучения радиоактивности поверхностного слоя при $h = 0$, т.е. значение P_0 (рис. 2). Это значение равно произведению разности величин мощности дозы регистрируемого излучения и уровня космического фона на высоте h на величину ослабления мощности дозы на данной высоте, т.е.

$$P_0 = [P_{\Sigma}(h) - P_k(h)] \cdot e^{kh} \quad (4)$$

Таким образом, в процессе аэродинамического мониторинга мощности дозы радиоактивного загрязнения поверхностного слоя территории необходимо измерение мощности дозы регистрируемого на высоте h излучения, вычитание из полученного значения мощности дозы космического фона на этой высоте ($P_{к0} + ah$) и умножение указанной разности на величину ослабления излучения поверхности e^{kh} .

Для нахождения рационального значения высоты летательного аппарата в работе рассмотрена зависимость среднеквадратической погрешности определения уровня мощности дозы излучения поверхности от высоты. Величина мощности дозы в дозиметрической системе определяется как

$$P = \frac{n}{K_p} \quad (5)$$

где n – скорость счета (частота) импульсов детектора, имп/с;

K_p – коэффициент чувствительности детектора, $\frac{\text{имп/с}}{\text{нЗв/ч}}$.

Абсолютная среднеквадратическая погрешность равна

$$\sigma P = \frac{\sigma_n}{K_p} = \frac{1}{K_p} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot K_p}{\Delta t}} \quad (6)$$

где Δt – длительность интервала накопления импульсов детектора, с.

С учетом того, что абсолютная среднеквадратическая погрешность измерения скорости счета детектора равна

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{n}{\Delta t}} \quad (7)$$

Величину абсолютной среднеквадратической погрешности измерения мощности дозы регистрируемого излучения можно определить, как

$$\sigma_{p_{\Sigma}}(h) = \frac{1}{K_p} \sqrt{\frac{[P_0 \cdot e^{-kh} + P_{k0} + ah] \cdot K_p}{\Delta t}} \quad (8)$$

Относительная погрешность измерения мощности дозы излучения радиоактивности на поверхности обследуемой территории определяется как отношение величины абсолютной среднеквадратической погрешности измерения мощности дозы регистрируемого излучения к значению мощности дозы поверхностного слоя на высоте h :

$$\delta_{P_0} = \frac{\sigma_{p_{\Sigma}}(h)}{P_0 \cdot e^{-kh}} \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что относительная погрешность измерения мощности дозы излучения на поверхности обследуемой территории возрастает с увеличением абсолютной погрешности измерения мощности дозы регистрируемого излучения, коэффициента ослабления мощности дозы излучения поверхности, высоты летательного аппарата над обследуемой территорией и уменьшается с ростом мощности дозы излучения радиоактивности поверхностного слоя. Учитывая, что мощность дозы регистрируемого излучения представляет собой сумму значений мощности дозы излучения радиоактивности поверхности и космического фона (1), можно заключить, что относительная погрешность возрастает также с увеличением уровня космического фона. На рис. 3 представлена зависимость относительной погрешности от высоты для случаев, когда мощность дозы излучения на поверхности территории составляет 92 нЗв/ч и 370 нЗв/ч.

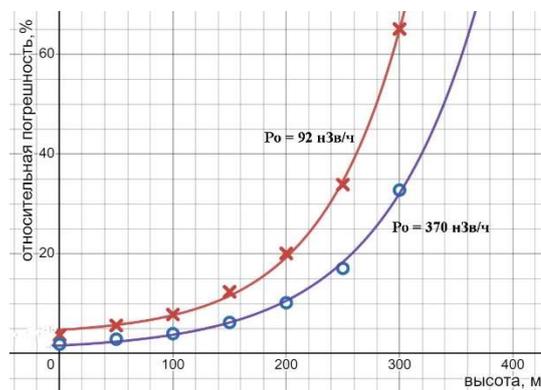


Рис. 3 Зависимость относительной погрешности измерения мощности дозы излучения на поверхности от высоты летательного аппарата над поверхностью обследуемой территории

Полученные данные соответствуют следующим значениям входящих в выражения (8,9)

величин: $P_0=92$ и 370 нЗв/ч; $P_{к0}=20$ нЗв/ч; $P_{\Sigma 0} = 112$ и $390 \frac{\text{нЗв}}{\text{ч}}$; $k=0,0109\text{м}^{-1}$ $a=0,05 \frac{\text{нЗв}}{\text{м}}$; $K_p = 10 \frac{\text{имп/с}}{\text{нЗв/ч}}$; $\Delta t=1$ с. Из рис.3 следует, что увеличение высоты летательного аппарата в пределах от 0 до 150 м приводит к увеличению погрешности при $P_0=92$ нЗв/ч от 4 до 12%. Для $P_0=370$ нЗв/ч значение погрешности приблизительно в 2 раза ниже. При больших значениях высоты погрешность резко возрастает, поэтому аэродинамический контроль на высотах более 150 м нецелесообразен.

В процессе контроля требуется выявить участки радиоактивного загрязнения, мощность дозы на поверхности которых превышает на 100 нЗв/ч уровень природного фона без космической составляющей. Значение природного фона находится в диапазоне 50 – 150 нЗв/ч. Для надежного выявления указанного превышения уровня природного фона погрешность не должна превышать 15-20%. Поэтому высота 200 м является предельной и контроль на больших высотах не дает возможности проводить надежное обнаружение радиоактивного загрязнения территорий аэродинамическим способом.

Процедура контроля должна предусматривать проведение перед началом аэродинамического мониторинга измерений уровня космического фона над поверхностью водоема данной местности и уровня природного радиационного фона поверхности путем вычитания из показаний дозиметрической системы величины космического фона. В дальнейшем летательный аппарат с детектором дозиметрической системы поднимается на высоту, не превышающую 200 м (предпочтительно 100-150 м). В дальнейшем аппарат по заданной траектории движется относительно обследуемой местности. Одновременно осуществляется запись показаний дозиметрической системы за вычетом уровня космического фона, соответствующего высоте движения детектора относительно поверхности. Участки записи с превышением уровня радиационного природного фона на 100 нЗв/ч и более соответствуют радиоактивному загрязнению территории. С помощью навигатора фиксируются координаты и размеры зоны загрязнения. Летательный аппарат осуществляет построчное сканирование местности с шагом в зависимости от высоты 200 – 500 м.

В отличие от традиционно используемых методов аэро съемки местности, предусматривающих фиксирование мощности дозы регистрируемого на высоте летательного аппарата излучения без вычитания уровня космического фона, описанный в статье метод позволяет дистанционно определять мощность дозы излучения непосредственно на поверхности обследуемой территории. Поэтому отсутствует необходимость дополнительных измерений дозиметристами мощности дозы загрязненной территории на ее поверхности. В связи с этим описанный способ позволяет не только выявить радиоактивное загрязнение, но и оперативно оценить его радиационную опасность.

Учитывая, что мониторинг территорий планируется производить в сплошном режиме, невзирая на доступность подъезда по земле, способ его технической реализации диктует применение летательных аппаратов, в качестве которых предпочтительно использовать коптеры, размещая на них оборудование для детектирования гамма-излучения, что немаловажно, с технической и с экономической точек зрения. Управление коптером или их системой можно производить удаленно, более того, существующие на данный момент разработки в применении нейросетевых систем управления полетом могут позволить выполнить оптимизацию алгоритмов сбора и анализа данных без активного вмешательства внешнего оператора, с применением машинного обучения [7-9].

Выводы

1. Разработана математическая модель аэродинамического мониторинга радиоактивного загрязнения территорий. На основе анализа зависимости мощности дозы регистрируемого излучения от высоты установлено, что регистрируемый сигнал содержит две составляющие: мощность дозы излучения природной и техногенной радиоактивности поверхности территории, экспоненциально спадающей с увеличением высоты летательного аппарата с детектором излучения, и мощности дозы космического фона, уровень которого растет с увеличением высоты.

2. Использование разработанной модели позволяет дистанционно определять мощность дозы излучения радиоактивного загрязнения непосредственно на поверхности обследуемой территории, а не мощность дозы излучения на высоте летательного аппарата, косвенно зависящего от уровня загрязнения территории, как это осуществляется традиционными способами.

3. Получены аналитические выражения для определения погрешности измерения мощности дозы радиоактивного загрязнения территории. Показано, что погрешность растет с увеличением высоты летательного аппарата, и при высотах, превышающих 250 м, погрешность достигает неприемлемых значений. С увеличением уровня мощности дозы излучения радиоактивного загрязнения погрешность уменьшается.

4. При реализации аэродинамического мониторинга в качестве летательных аппаратов предпочтительно использовать коптеры, что немаловажно, с технической и с экономической точек зрения. Управление коптером или их системой можно производить с использованием нейросетевых систем управления без активного вмешательства внешнего оператора, используя машинное обучение.

Список источников

1. Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797/.

2. Методические рекомендации по ликвидации последствий радиационных и химических аварий / В.А. Владимиров, А.Г. Лукьянченков, К.Н. Павлов, В.А. Пучков, Р.Ф. Садиков, А.И. Ткачев под общей ред. доктора технических наук В.А. Владимирова. – М.: ЗАО «Рекламно-издательская фирма «МТП-ИНВЕСТ», заказ №280Л, 2005.

3. Общие инструкции оценки и реагирования на радиологические аварийные ситуации. Международное агентство по атомной энергии МАГАТЭ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1162r_web.pdf.

4. Решение коллегии МЧС России от 4 декабря 2019 г. № 8/П «Об утверждении актуализированной редакции Концепции радиационной, химической и биологической защиты населения» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://29.mchs.gov.ru/uploads/resource/2020-01-16/25af2d69368086e94629f54b22d54a89.pdf>.

5. Концепция комплексной системы обеспечения безопасности жизнедеятельности населения», утв. МЧС России 16.02.2010, МВД России 19.02.2010, ФСБ России 16.03.2010.

6. Способ аэродинамического контроля радиационной обстановки. Сергеев И.Ю., Пашинин В.А., Валуев Н.П., Косырев П.Н. Технологии гражданской безопасности. 2018. Т. 15. № 4 (58). С. 84-87.

7. Евгений А.А. Нейросетевой регулятор системы управления квадрокоптером. // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 148-149; URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=208> (дата обращения: 14.06.2022).

8. Савицкий А.В., Павловский В.Е. Модель квадрокоптера и нейросетевой алгоритм управления // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 77. 20 с. doi:10.20948/prepr-2017-77 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-77>(дата обращения: 14.06.2022).

9. Ющенко А.С., Лебедев К.Р., Забихафар С.Х. Система управления квадрокоптером на основе адаптивной нейронной сети Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 07. С. 262–277. DOI: 10.7463/0717.0001282 (дата обращения: 14.06.2022).

List of sources

1. Federal Law No. 3-FZ dated 09.01.1996 "On radiation safety of the population" [Electronic resource]. Access mode: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797/.

2. Methodological recommendations for the elimination of the consequences of radiation and chemical accidents / V.A. Vladimirov, A.G. Lukyanchenkov, K.N. Pavlov, V.A. Puchkov, R.F. Sadikov, A.I. Tkachev under the general editorship of Doctor of Technical Sciences V.A. Vladimirova. – М.: CJSC "Advertising and Publishing the company "MTP-INVEST", order No. 280L, 2005.

3. General instructions for assessing and responding to radiological emergencies. International Atomic Energy Agency IAEA. [electronic resource]. Access mode: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1162r_web.pdf.

4. Decision of the Board of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated December 4, 2019 No. 8/II "On approval of the updated version of the Concept of radiation, chemical and biological protection of the population" [Electronic resource]. Access mode: <https://29.mchs.gov.ru/uploads/resource/2020-01-16/25af2d69368086e94629f54b22d54a89.pdf>.

5. The concept of an integrated system for ensuring the safety of the population", approved by the Ministry of Emergency Situations of Russia on 16.02.2010, the Ministry of Internal Affairs of Russia on 19.02.2010, the FSB of Russia on 16.03.2010.

6. Method of aerodynamic control of the radiation situation. Sergeev I.Yu., Pashinin V.A., Valuev N.P., Kosyrev P.N. Technologies of civil security. 2018. Vol. 15. No. 4 (58). pp. 84-87.

7. Yevgenov A.A. Neural network controller of the quadrocopter control system. // Scientific Review. Technical sciences. – 2014. – No. 1. – PP. 148-149; URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=208> (accessed: 06/14/2022).

8. Savitsky A.V., Pavlovsky V.E. Quadrocopter model and neural network control algorithm // Preprints of IPM named after M.V.Keldysh. 2017. No. 77. 20 p. doi:10.20948/prepr-2017-77 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-77> (accessed: 06/14/2022).

9. Yushchenko A.S., Lebedev K.R., Zabihafar S.H. Quadrocopter control system based on adaptive neural network Science and Education. Bauman Moscow State Technical University. Electron. journal. 2017. No. 07. pp. 262-277. DOI: 10.7463/0717.0001282 (accessed: 06/14/2022).

Информация об авторах

Н.П. Валуев – доктор технических наук, доцент

И.Ю. Сергеев – кандидат технических наук

Information about the author

N.P. Valuev – Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Engineering Sciences,
Docent

I.Y. Sergeev – Ph.D. of Engineering Sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакция 28.05.2022; одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 30.06.2022.

The article was submitted 28.05.2022, approved after reviewing 20.06.2022, accepted for publication 30.06.2022.