

УДК 621.396.98+614.8.084

## **АЛГОРИТМ КООРДИНАТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

**Дмитриев Сергей Александрович**

Акционерное общество «РТ-Пожарная безопасность» Государственной корпорации по содействию разработке, производству и экспорту высокотехнологичной промышленной продукции «Ростех», г. Москва, Россия

### **АННОТАЦИЯ**

Статья посвящена разработке математической модели для повышения точности координатного управления робототехническими комплексами в рамках пожарно-спасательных операций МЧС России. Применение разработанной модели позволит обеспечить точное и эффективное перемещение робототехнических комплексов даже в условиях ограниченной видимости или радиодоступности. Алгоритм управления включает сравнение фактических и запланированных траекторий движения, что позволяет своевременно корректировать отклонения и повышать точность соответствующих маневров. Предлагаемая модель основывается на распределении Рэлея для оценки вероятностных характеристик и корректировки погрешностей измерений. Это обеспечивает адаптивность управления и уменьшение риска при выполнении спасательных операций. Целью данного исследования является повышение точности координации при управлении робототехническими комплексами в рамках пожарно-спасательных операций. Практическая реализация предложенных методик направлена на поддержку управленческих решений, оптимизацию управления движения и снижение неблагоприятных воздействий внешней среды на результат работы роботов. Данные разработки важны для перехода от ручного управления к автономным системам, существенно улучшая качество выполнения аварийно-спасательных работ. Разработанная модель может быть применена в управлении существующими робототехническими комплексами, такими как РТС ЕЛЬ-4, МРУП-СП-Г-ТВ-У-40-17КС и другими отечественными разработками.

**Ключевые слова:** робототехнический комплекс, координатное управление, информационный ресурс управления, чрезвычайные ситуации, поддержка управленческих решений, точность управления, математическая модель

## **ALGORITHM OF COORDINATE CONTROL OF ROBOTIC COMPLEXES IN EMERGENCY SITUATIONS USING A MATHEMATICAL MODEL**

**Sergey A. Dmitriev**

Joint-Stock Company "RT-Fire Safety" of the State Corporation for assistance to the development, production and export of high-tech industrial products "Rostec", Moscow, Russian Federation

**ABSTRACT**

The article is devoted to the development of a mathematical model for increasing the accuracy of coordinate control of robotic complexes within the framework of fire and rescue operations of EMERCOM of Russia. The application of the developed model will ensure precise and efficient movement of robotic complexes, even in conditions of limited visibility or radio accessibility. The control algorithm includes a comparison of actual and planned movement trajectories, that allows for timely correction of deviations and increases the accuracy of the corresponding maneuvers. The proposed model is based on the Rayleigh distribution for assessing probabilistic characteristics and correcting measurement errors. This ensures adaptability of control and risk reduction during rescue operations. The aim of this study is to increase the accuracy of coordination in the control of robotic complexes in fire and rescue operations. The practical implementation of the proposed methods is aimed at supporting management decisions, optimizing motion control, and reducing the adverse environmental impacts on the result of robots' performance. These developments are important for the transition from manual control to autonomous systems, significantly improving the quality of emergency rescue operations. The developed model can be applied in the control of existing robotic complexes, such as the RTS EL-4, MRUP-SP-G-TV-U-40-17KS, and other domestic developments.

**Keywords:** robotic complex, coordinate control, control information resource, emergency situations, management decision support, control accuracy, mathematical model

**Введение**

Концепция развития робототехнических комплексов – (РТК) специального назначения в системе МЧС России до 2030 г. в настоящее время определяет необходимость проведения исследований, направленных на разработку систем управления группами робототехнических средств и переход от дистанционно управляемых к автономным комплексам [1].

Важность решения этих задач связана, с одной стороны, с развитием технологий создания РТК, прежде всего таких как: техническое зрение, малогабаритные источники энергии, MASH [2-6], с другой, – с новыми задачами, возлагаемыми на робототехнические подразделения МЧС России, которые прежде всего предполагают применение РТК вне зоны прямой видимости оператора, а в некоторых случаях – и вне зоны радиодоступности [7–9].

Одной из актуальных задач, необходимость решения которой определяется при переходе от ручного к автоматическому управлению, является разработка математической модели описания перемещения РТК в заданной системе координат. Необходимо отметить, что к настоящему времени опубликованы работы по управлению движением объектов [10–12]. Более того, в ряде национальных стандартов Российской Федерации содержатся положения, имеющие непосредственное отношение к рассматриваемой задаче [13–17]. В них определены и установлены:

- 1) перечень маневров, которые должно выполнять беспилотное воздушное судно;
- 2) системы координат для роботов, виды основных перемещений и их обозначения;
- 3) общие требования к беспилотным авиационным системам, используемым для пожаротушения, а также для прове-

дения аварийно-спасательных и других операций;

4) порядок согласования и стандартизированного подхода ко всем процедурам, связанным с гражданскими беспилотными авиационными системами;

5) понятийный аппарат в рассматриваемой области.

В общем случае управление РТК сводится к задаче придать им такое движение, какое необходимо в ходе проведения пожарно-спасательных работ, возникающих в чрезвычайных ситуациях. При этом процесс управления ими во многом сводится к сравнению действительного движения с навязываемым ему движением, а также к соответствующему реагированию корректировкой, если обнаруживается различие.

Исходя из этого, делается вывод, что математическая модель как информационный ресурс поддержки координатного управления движением РТК должна обладать следующими свойствами:

1) располагать информацией о заранее навязываемом движении РТК и информацией о действительном его движении;

2) сравнивать между собой эти движения для получения информации об их рассогласовании;

3) обрабатывать эту информацию для выработки воздействий на исполнительные механизмы РТК, чтобы устранять возникшее рассогласование.

Важной обобщенной характеристикой этого процесса можно считать точность управления. Алгоритм ее обоснования приведен, в частности, в [18], в предположении, что отклонение действительного расстояния РТК до центра заданной ограниченной круговой области, в которую он должен попасть при достижении заданной цели управления, распределено по усеченному справа распределению Рэя. Сравнение усеченной модели с классической моделью распределения показало преимущест-

во и целесообразность применения ее при обосновании требований к точности координатного управления РТК.

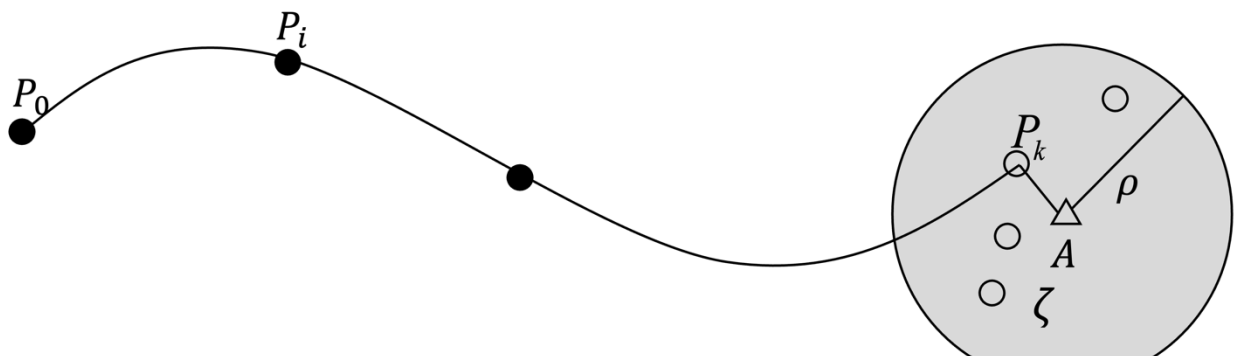
Однако, в исследовании [18], проведенном авторами Пицыком В.В. и Дмитриевым С.А., не изучено влияние погрешностей измерения фактического движения РТК на результаты координатного управления. Поэтому необходимо разработать усовершенствованную модель интеллектуальной поддержки координатного управления РТК, учитывающую влияние погрешности измерения фактического движения на результаты координатного управления, чтобы повысить точность управления РТК.

### Постановка задачи

Основные исходные данные, необходимые для разработки алгоритма координатного управления РТК, представлены в виде требований и ограничений  $\Omega$ , касающихся системы координатного управления РТК, включая спецификации по маневрам и характеристикам системы, а также описания характеристик погрешностей измерений координат, таких как ошибки позиционирования и временные задержки, которые влияют на точность управления.

Ограничение 1 ( $\Omega_1$ ). Главная цель координатного управления РТК состоит в том, чтобы направить его в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режиме управления из начального положения  $P_0$  в заданную область  $\zeta$  пространства  $E_m$ , в которой им будут проводиться специальные работы в составе пожарно-спасательных подразделений. Задача будет рассматриваться в общем и упрощенном виде. Рассматриваемая область описывается окружностью радиуса  $r$  с центром в точке  $A$  (рис. 1). При этом цель управления считается достигнутой, если в конце своего движения объект окажется в точке  $P_k \in \zeta$ , для которой выполняется следующее условие:

$$h_k = |AP_k| \leq \rho, \quad (1) \quad \text{где } h_k \text{ – расстояние до точки } k, \text{ м; } \rho \text{ – заданная положительная величина, м.}$$



**Рис. 1.** Траектория движения РТК: точки  $P_0, \dots, P_i, \dots, P_k$  обозначают фиксированное положение РТК на траектории; точка  $A$  – центр (для наглядности, круговой) области, в которую перемещается РТК;  $\rho$  – радиус круговой области  $\zeta$

**Fig. 1.** The trajectory of movement of the RTC: points  $P_0, \dots, P_i, \dots, P_k$  indicate the fixed position of the RTC on the trajectory; point  $A$  is the center (for clarity, circular) of the area to which the RTC moves;  $\rho$  is the radius of the circular area  $\zeta$

Предполагается, что это условие достижимо для используемых РТК, которые, согласно своей стратегии управления, могут двигаться, совершая маневры в пределах доступного радиуса кривизны траектории.

Ограничение 2 ( $\Omega_2$ ). Во многих случаях условие достижения цели управления может оказаться недостаточным, чтобы процесс управления протекал «наилучшим образом». А это значит, что условие (1) необходимо дополнить условием, характеризующим качество управления. Смысл такого условия можно пояснить, в частности, на примере применения РТК в ситуации, когда требуется доставить его к месту назначения настолько быстро, насколько позволяют обстоятельства. Или, когда потребуются проникнуть как можно быстрее внутрь заданной области. Или наконец, если ему необходимо оказаться как можно ближе к центру области (при прямолинейном равномерном движении РТК на конечном участке пути эти условия можно считать в известном смысле эквивалентными).

Управление и, следовательно, движение РТК завершаются, когда расстояние  $h_k$  не превысит заданной положительной величины  $h_0$ . Это требование, как условие достижения цели управления, эквивалентно выполнению цепочки отношений:

$$h_1 \geq \dots \geq h_i \geq \dots \geq h_k \leq h_0. \quad (2)$$

Ограничение 3 ( $\Omega_3$ ). Траектория движения РТК в силу различных причин может отличаться от заданной заранее или выбираемой в процессе его управления траектории. Это связано с тем, что информация о состоянии РТК, как объекта координатного управления, а также сведения о внешней среде и реакциях элементов системы управления на входные воздействия является неполной. И к тому же подверженными различного вида возмущающими воздействиями  $\vec{\xi} = \vec{\xi}(t)$ , включающими в себя также погрешности измерения собственного положения РТК для реализации выбранной стратегии управления его движением.

Поэтому справедливо предположить, что точка  $P_k$  случайным образом изменяет свое положение в пространстве

$E_m$ . И ее координаты можно рассматривать как независимые, нормально распределенные случайные величины, имеющие одинаковые средние квадратические отклонения  $\sigma$ , а радиус  $r$  точки  $P_k$  – как случайную величину, распределенную по закону Релея в координатной плоскости, перпендикулярной вектору движения РТК [19]:

$$f_R(r, \sigma) = \begin{cases} 0, & \text{если } r = 0, \\ \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, & \text{если } r > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Ограничение 4 ( $\Omega_4$ ). Предполагается, что требование к точности управления движением РТК количественно выражено заданным размером (радиусом  $R$ ) круговой области  $\zeta$  и заданной вероятностью  $P_0 = P(r < R, \sigma)$ , зависящей от параметра  $\sigma$  закона (3), с которой он должен достичь этой области по завершению процесса управления.

Ограничение 5 ( $\Omega_5$ ). При оценке параметров распределения случайных погрешностей измерения движения РТК будем считать, что результаты  $\tilde{R}_k$  косвенного измерения дальности  $R_k$ :

$$\tilde{R}_k = |AP_k| = R_k + \delta_R. \quad (4)$$

аддитивно связаны со случайными, не смещенными погрешностями измерения  $\delta_R$  и, следовательно, представляют собой случайные величины, которые, согласно закону больших чисел, распределены по нормальному закону с неизвестным заранее средним квадратическим отклонением  $\sigma_r$ :

$$\varphi(\delta_r; \sigma_r) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta_r^2}{2\sigma_r^2}}. \quad (5)$$

Ограничение 6 ( $\Omega_6$ ). Установим границы диапазона  $S$  для случайной величины  $r$ :  $\alpha < r < \beta$ , для оценки выполнения требований к управлению движением РТК с заданной вероятностью  $P_0$ :

$$P_0 = P(\alpha < r < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(r; \sigma) dr. \quad (6)$$

Для оценки работы системы координатного управления выполняется условие  $\alpha < \tilde{r} < \beta$ , т. к.  $r$  неизвестным  $\tilde{r}$ .

Вероятность  $\tilde{P}_0 = P(\alpha < \tilde{r} < \beta)$  будет отличаться от заданной вероятности  $P_0$  в зависимости от разницы между  $\tilde{r}$  и  $r$ , вызванной погрешностью  $\delta_r$ .

Такое различие можно рассматривать как допустимый риск управления. Задача формулируется следующим образом: необходимо установить зависимость  $\tilde{P}_0 = P(\alpha < \tilde{r} < \beta)$  от параметров  $\sigma$  и  $\sigma_r$ , а также найти значения  $\sigma_r$ , при которых вероятность достижения заранее установленного  $\tilde{P}_0$  будет подтверждена.

$$\tilde{P}_0 = P(\alpha < \tilde{r} < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} \omega_{RN}(\tilde{r}; \sigma, \sigma_r) d\tilde{r}, \quad (7)$$

где  $\omega_{RN}(\tilde{r}; \sigma, \sigma_r)$  – функция плотности распределения величины  $\tilde{r}$  – результата измерения случайного расстояния  $r$ , м;  $\sigma_r$  – параметр, характеризующий точность измерения, м.

Для решения задачи установим зависимость вероятности (7) от параметров  $\sigma$  и  $\sigma_r$  в рамках ограничений  $\Omega_1 - \Omega_6$ .

Это позволит определить значения  $\sigma_r$ , обеспечивающие достижение заданной вероятности  $\tilde{P}_0$  при фиксированных  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\sigma$ .

Таким образом, создание точной модели требует детального анализа параметров. Установление взаимосвязей между указанными величинами поможет сформировать надежную основу для управления движением РТК, учитывая возможные погрешности и ограничения системы.

### Решение задачи

1. На первоначальном этапе определим выражение для функции плотности распределения случайной величины  $\tilde{r}$ , представляющей собой случайное расстояние случайного расстояния  $r$ . Данная функция будет задана как композиция законов распределения величин  $r$  и  $\delta_r$ :

$$\omega_{RN}(\tilde{r}; \sigma, \sigma_r) = f_R(r, \sigma) * \varphi(\delta_r, \sigma_r) = \frac{e^{v\tilde{r}}}{\sigma_r \sigma^2 \sqrt{2\pi}} \left( \frac{1}{2\mu} - \frac{v}{2\mu} \sqrt{\frac{\pi}{\mu}} e^{\frac{v^2}{\mu}} \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{v}{\sqrt{\mu}} \right) \right) \right), \quad (8)$$

где  $\mu = \frac{\sigma_r^2 + \sigma^2}{2\sigma_r^2 \sigma^2}$ ;  $x = -\frac{\tilde{r}}{2\sigma_r^2}$ ;  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ .

2. В формуле (8) параметр  $\sigma$  является мерой точности для управления РТК при заданных параметрах  $P_0$  и  $\rho$  и задается как:  $\sigma = \frac{\rho}{\sqrt{1-2\ln(1-P_0)}}$ . Каждый экземпляр РТК имеет свою характеристику  $\sigma^*$ . Требуется определить соответствие этой характеристики стандарту  $\sigma$ . Для строгого контроля точности управления следует использовать методы доверительных интервалов, сравнивая  $\sigma$  с нижней границей случайной величины  $\sigma^*$  [19].

3. На следующем шаге задается зависимость вероятности (7) от параметра  $\sigma_r$ , при условии, что точки  $\alpha$  и  $\beta$  симметричны относительно центра рассеивания  $A$  (рис. 1).

Далее необходимо установить значение  $\sigma_r^*$ , для которого выполняется заданная вероятность  $P_0$ , используя соотношение, связывающее  $P_0$  с распределением случайной величины в зависимости от  $\sigma_r$  (9).

Это позволит реализовать более эффективное управление в условиях изменчивости параметров измерения.

$$\sigma_r^* = \operatorname{arg} \min_{\sigma_r} e \left( \tilde{P}_0(\sigma_r) - P(\sigma_r) \right), \quad (9)$$

где  $e \left( \tilde{P}_0(\sigma_r) - P(\sigma_r) \right)$  – мера близости значений вероятностей  $\tilde{P}_0$  и  $P_0$  на

множестве  $E$  среди всех положительных значений переменной  $\sigma_r$ .

### Блок-схема алгоритма

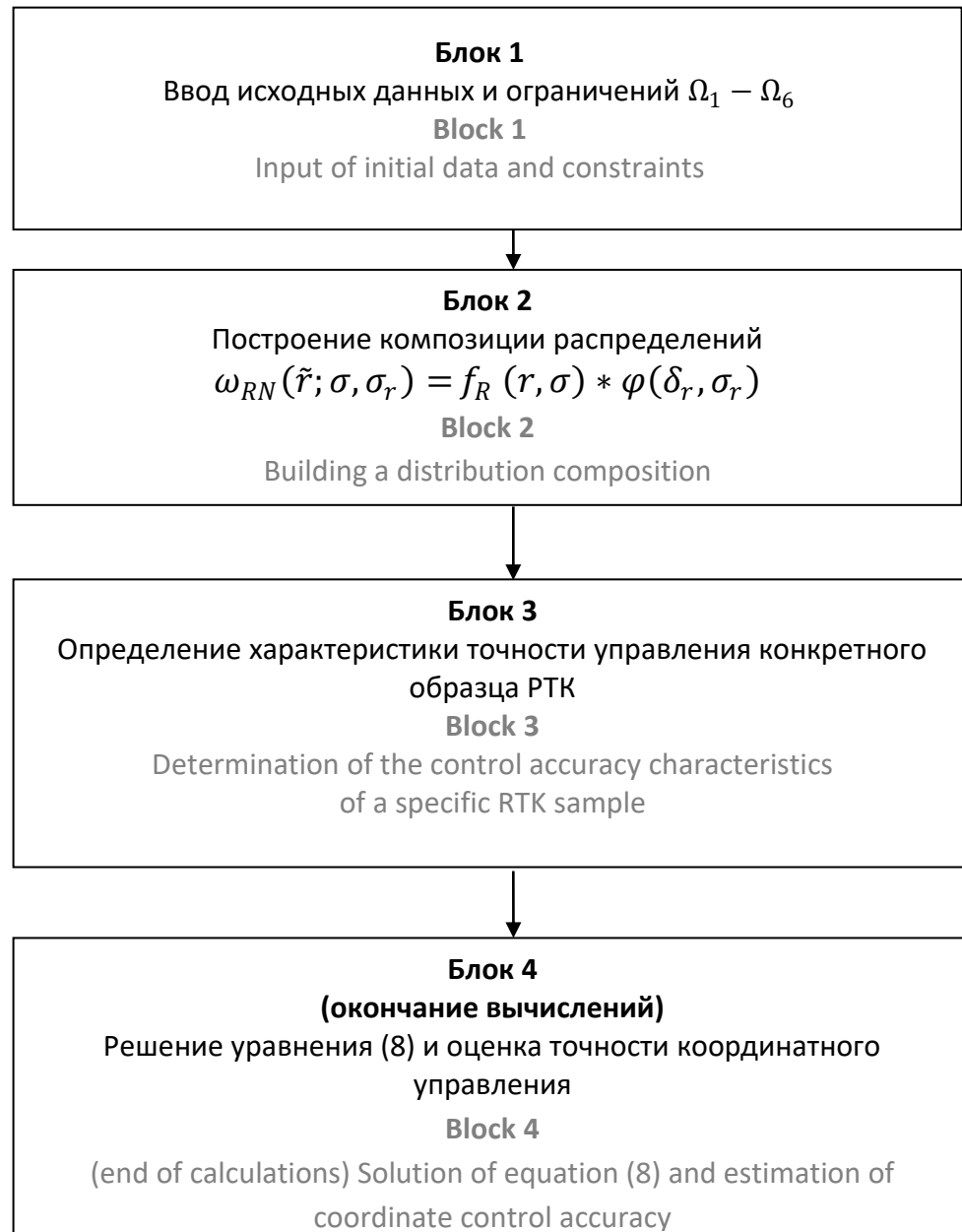
Алгоритм координатного управления структурно представлен на рис. 2 следующими функциональными блоками.

**Блок 1 исходных данных** представлен в требованиях и ограничениях  $\Omega_1 - \Omega_6$  к системе координатного управления РТК и в описании свойств погрешностей координатных измерений.

**Блок 2** содержит функциональную модель построения композиции законов распределения случайных величин  $r$  и  $\delta_r$  (8).

В **Блоке 3** для заданных значений величин  $P_0$  и  $\rho$  оценивается значение параметра  $\sigma^*$ , характеризующего точность управления для конкретного образца РТК. Найденное значение используется далее в качестве входного параметра последующего блока алгоритма.

В **Блоке 4** итерационным методом находится решение трансцендентного уравнения (8) для оценки среднего квадратического значения погрешности координатных измерений  $\sigma_r$ , достаточной для достижения цели координатного управления РТК.



**Рис. 2.** Блок-схема алгоритма координатного управления РТК

**Fig. 2.** Flowchart of coordinate control algorithm of RTK

Пример. Первоначальное условие – точность координатного движения РТК определяется законом распределения случайной величины дальности (3). Радиус  $R = 5$  м окружности должен находиться в области, где перемещается РТК, при этом измерительные погрешности подчиняются нормальному распределению (5). Для обеспечения заданной точности  $\sigma = 2$  м и вероятности выполнения условия

$P(\alpha < \tilde{r} < \beta) = \tilde{P}_0 = 0,9$  необходимо вычислить значение параметра  $\sigma_r$ . Используя формулу (9) для композиции законов и интегрируя (7), рассчитаем вероятность нахождения результатов измерений в круге радиуса  $R = 5$  м [20], результаты представлены в табл. 1.

Если в качестве меры близости значений вероятностей  $\tilde{P}_0$  и  $\tilde{P}$  выбрать их абсолютную разность, то, например, для

величины  $\sigma_r = 0,75$  м разность менее 0,6 %. На практике данное значение допустимо и позволяет сделать вывод, что значение  $\sigma_r = 0,75$  м удовлетворяет требованиям по точности измерений в системах

координатного управления для двигательной деятельности РТК как на поверхности, так и в водной среде или подземных сооружениях.

**Таблица 1**

Зависимость вероятности нахождения результатов координатных измерений в области, описываемой кругом радиуса  $R = 5$  м, от среднего квадратического значения погрешности измерения  $\sigma_r$  при фиксированном значении  $\sigma = 2$  м

**Table 1**

Dependence of the probability of finding the results of coordinate measurements in the area described by a circle of radius  $R = 5$  m on the mean square value of measurement error  $\sigma_r$  with a fixed value of  $\sigma = 2$  m

$P(\alpha < \tilde{r} < \beta)$	0,952	0,950	0,948	0,942	0,934	0,924	0,919	0,914	0,908
$\sigma_r, \text{ м}$	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,65	0,70	0,75

### Заключение

В данной работе предложено решение важной задачи – создание научного задела для обеспечения технологического перехода от дистанционно управляемых систем к автономным робототехническим средствам, предназначенным для выполнения аварийно-спасательных операций и тушения пожаров. Разработанная математическая модель координатного управления позволяет эффективно управлять РТК при проведении специализированных ра-

бот в рамках функционирования подразделений МЧС России.

Практическое применение результатов исследования может быть рекомендовано для обоснования параметров координатного управления динамическими объектами в условиях чрезвычайных ситуаций, что в конечном итоге может способствовать более эффективному выполнению задач по обеспечению безопасности населения и предотвращению последствий аварийных ситуаций.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Concept for the development of special purpose robotic systems in the system of the Ministry of Emergency Situations of Russia until 2030 // Decision of the Board of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2016. № 16/III. 20 p. URL: <https://rg.ru/2016/08/15/mchs-priniala-koncepciiu-razvitiia-robototehniki.html> (date of application: 05.12.2024).
2. Мошков, В. Б., Баранник, А. Ю., Лагутина, А. В. Перспективы развития робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности // II Научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности «RoboEmercom». 2022. С. 148–152. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50031805> (дата обращения: 05.12.2024).
3. Экспериментальные робототехнические платформы как практический инструмент разработки перспективных робототехнических комплексов / Е. А. Дудоров [и др.] // II Научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности «RoboEmercom». 2022. С. 71–85. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50031796> (дата обращения: 05.12.2024).
4. Баранник А. Ю., Краснова Л. В., Лагутина А. В. О новых правилах принятия на снабжение, вооружение, в эксплуатацию в системе МЧС России беспилотных авиационных систем и комплексов // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 4 (74). С. 70–73.
5. Медведев М. Ю., Костюков В. А., Пшихопов В. Х. Метод оптимизации траектории мобильного робота на плоскости с учетом критерия максимума вероятности ее прохождения в поле источников-репеллеров // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 3. С. 690–726.



6. Комиссина, И. Н. Современное состояние и перспективы развития робототехники в Китае // Проблемы национальной стратегии. 2020. № 1. С. 123–145. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42799704> (дата обращения: 05.12.2024).
7. Комплексные исследования в области создания и внедрения перспективных робототехнических средств, в том числе развитие учебной базы для подготовки операторов робототехнических комплексов, материально-технической базы для эксплуатации робототехнических комплексов и подходов к технико-экономическому обоснованию рациональности системы испытаний робототехнических комплексов в МЧС России : отчет о НИР (2 этап, заключительный) / ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) ; рук. А. Ю. Баранник ; исполн. А. И. Лагутина [и др.]. М., 2021. 192 с.
8. Комплексные исследования в области создания и внедрения перспективных робототехнических средств, в том числе развитие учебной базы для подготовки операторов робототехнических комплексов, материально-технической базы для эксплуатации робототехнических комплексов и подходов к технико-экономическому обоснованию рациональности системы испытаний робототехнических комплексов в МЧС России : отчет о НИР (1 этап, промежуточный) / ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) ; рук. А. Ю. Баранник ; исполн. С. П. Тодосейчук [и др.]. М., 2020. 71 с.
9. Проблемные вопросы группового применения робототехнических средств при решении задач МЧС России / С. П. Хрипунов [и др.] // III Научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности «RoboEmercom». 2023. С. 205–211. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=apyamf&ysclid=m024iqdgo2550472973> (дата обращения: 05.12.2024).
10. Лутманов, С. В., Остапенко, Е. Н. Оптимальное управление динамическими объектами : учебное пособие. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. 163 с. Электрон. версия печ. изд. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Lutmanov-Ostapenko-Optimalnoe-upravlenie-dinamicheskimi-obektami.pdf> (дата обращения: 13.08.2024).
11. Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А. Оптимизация управления полетом экраноплана над взволнованным морем. Навигация и управление движением : сб. тез. докл. Междунар. Семинара. Самара : изд-во Самар. ун-та, 2020. С. 57–58.
12. Самохин, А. С., Самохина, М. А. Построение траекторий трехимпульсного подлета к Фобосу с выходом на сферу Хилла Марса на основе решения серии задач Ламберта // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2020. С. 127–129. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43844883&pf=1> (дата обращения: 05.12.2024).
13. ГОСТ Р 60.0.0.3-2016/ ИСО 9787:2013. Роботы и робототехнические устройства. Системы координат и обозначение перемещений : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 8 ноября 2016 г. № 1623-ст : введен впервые : дата введения 2018-01-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141083> (дата обращения: 04.12.2024).
14. ГОСТ Р 70802-2023. Беспилотные авиационные системы для обеспечения пожаротушения, аварийно-спасательных и других работ, выполняемых в целях предупреждения чрезвычайных ситуаций и ликвидации их последствий. Общие требования : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 3 июля 2023 г. № 473-ст : введен впервые : дата введения 2023-12-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141083> (дата обращения: 04.12.2024).
15. ГОСТ Р 56122-2014. Воздушный транспорт. Беспилотные авиационные системы. Общие требования : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 18 сентября 2014 г. № 1130-ст : введен впервые : дата введения 2015-07-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113342> (дата обращения: 04.12.2024).
16. ГОСТ Р 57258-2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 10 ноября 2016 г. № 1674 : введен впервые : дата введения 2017-06-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141433> (дата обращения: 04.12.2024).
17. ГОСТ Р 59519-2021. Беспилотные авиационные системы. Компоненты беспилотных авиационных систем. Спецификация и общие технические требования : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 27 мая 2021 г. № 474-ст : введен впервые : дата введения 2021-07-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200179701> (дата обращения: 04.12.2024).

18. Пицык, В. В., Дмитриев, С. А. Обоснование точности измерений в системах координатного управления беспилотными летательными аппаратами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 3. С. 62–66. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-tochnosti-izmereniy-v-sistemah-koordinatnogo-upravleniya-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami-mchs> (дата обращения: 05.12.2024).
19. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М. : Наука, 1988. 480 с.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612419 Российской Федерации. Программа для интервальной оценки точности координатного управления беспилотными летательными аппаратами МЧС : № 2019667870 : заявл. 30.12.2019 : опубл. 21.02.2020 / В. В. Пицык, Л. В. Суховерхова, С. А. Дмитриев.

## REFERENCES

1. Concept for the development of special purpose robotic systems in the system of the Ministry of Emergency Situations of Russia until 2030 // Decision of the Board of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2016. № 16/III. 20 p. URL: <https://rg.ru/2016/08/15/mchs-priniala-koncepciu-razvitiia-robototekhniki.html> (date of application: 05.12.2024).
2. Moshkov V.B., Barannik A.Y., Lagutina A.V. Prospects for the development of robotics in the field of life safety // II Scientific and Practical Conference on the development of robotics in the field of life safety "RoboEmercom". 2022; 148–152. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50031805> (rus).
3. Dudorov E.A., Bogdanov A.A., Barannik A.Yu., Lagutina A.V., Sokolova E.A. Experimental robotic platforms as a practical tool for the development of advanced robotic complexes // II Scientific and Practical Conference on the development of robotics in the field of life safety "RoboEmercom". 2022; 71–85. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50031796> (rus).
4. Barannik A.Yu., Krasnova L.V., Lagutina A.V. On the new rules of acceptance of unmanned aircraft systems and complexes for supply, arming, in operation in the system of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti / Civil Security Technologies. 2022; 19:4(74):70–73 (rus).
5. Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Pshikhopov V.Kh. Optimization method of the mobile robot trajectory on the plane taking into account the criterion of the maximum probability of its passage in the field of propeller sources. Informatika i avtomatizacija / Informatics and Automation. 2021; 20:3:690–726. DOI: 10.15622/ia.2021.3.7 (rus).
6. Komissina I.N. Current state and prospects of robotics development in China. Problemy nacional'noj strategii / Problems of national strategy. 2020; 1:123–145. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42799704> (rus).
7. Integrated research in the field of creation and implementation of advanced robotic means, including the development of educational base for training of robotic complex operators, material and technical base for the operation of robotic complexes and approaches to the feasibility study of the rationality of the system of testing robotic complexes in the Ministry of Emergency Situations of Russia: research report (2nd stage, final): FGBU VNII GOCHS (FC); supervised by A.Y. Barannik ; executed by A.I. Lagutina [et al]. A.Yu. Barannik; executed by: A.I. Lagutina [et al]. Moscow, 2021; 192. (rus).
8. Comprehensive research in the field of creation and implementation of advanced robotic means, including the development of educational base for training of robotic complex operators, material and technical base for the operation of robotic complexes and approaches to the feasibility study of the rationality of the system of testing robotic complexes in the Ministry of Emergency Situations of Russia: research report (1 stage, interim): FGBU VNII GOCHS (FC); manual. A.Yu. Barannik; executed by: S.P. Todoseichu, A.I. Lagutina [et al]. Moscow, 2020; 71. (rus).
9. Khripunov S.P., Mamchenko M.V., Barannik A.Y., Lagutina A.V. Problematic issues of group application of robotic means in solving the tasks of the Ministry of Emergency Situations of Russia // III Scientific and Practical Conference on the development of robotics in the field of life safety "RoboEmercom". 2023; 205–211. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=apyamf&ysclid=m024iqdqdqo2550472973> (rus).
10. Lutmanov S.V., Ostapenko E.N. Optimal control of dynamic objects [Electronic resource]. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Lutmanov-Ostapenko-Optimalnoe-upravlenie-dinamicheskimi-obektami.pdf> (data obrashhenija: 13.08.2024) (rus).
11. Knyazhskiy A.Yu., Nebylov A.V., Nebylov V.A. Optimization of control of the screen-plane flight over the agitated sea. Navigation and motion control : a collection of abstracts from the International Workshop. Seminar. Samara: Samara University Publ. 2020; 57–58 (rus).

12. Samokhin A.S., Samokhina M.A. Construction of trajectories of a three-pulse approach to Phobos with exit to the sphere of Mars Hill based on the solution of a series of Lambert problems // XXVII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 2020; 127–129. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43844883&pf=1> (rus).
13. GOST P 60.0.0.3 - 2016/ ISO 9787:2013. Robots and robotic devices. Coordinate systems and designation of movements : approved by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from 08.11.2016 N 1623-st: date of introduction 2018-01-01. (rus).
14. GOST P 70802 - 2023. Unmanned aerial systems for firefighting, rescue and other works performed for the prevention of emergencies and elimination of their consequences. General requirements : approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from 03.07.2023 N 473-st : date of introduction 2023-12-01. (rus).
15. GOST P 56122 - 2014. Air transportation. Unmanned aircraft systems. General requirements : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of September 18, 2014 N 1130-st : date of implementation 2015-07-01. (rus).
16. GOST P 57258 - 2016. Unmanned aircraft systems. Terms and definitions : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 10, 2016. N 1674: date of introduction 2017-06-01. (rus).
17. GOST P 59519 - 2021. Unmanned aircraft systems. Components of unmanned aircraft systems. Specification and general technical requirements : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated May 27, 2021 No 474-st: date of introduction 2021-07-01. (rus).
18. Pitsyk V.V., Dmitriev S.A. Justification of the measurement accuracy in the systems of coordinate control of unmanned aerial vehicles. Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likvidacija / Fires and emergencies: prevention, liquidation. 2020: 3:62-66 (rus).
19. Ventzel E.S., Ovcharov L.A. Theory of probabilities and its engineering applications. Moscow: Nauka Publ., 1988. 480 p. (rus).
20. Certificate of state registration of computer program No. 2020612419 Russian Federation. Program for interval estimation of accuracy of coordinate control accuracy of unmanned aerial vehicles of the Ministry of Emergency

#### Информация об авторах

**Дмитриев Сергей Александрович**, соискатель ученой степени кандидата технических наук, Акционерное общество «РТ-Пожарная безопасность» государственной корпорации по содействию разработке, производству и экспорту высокотехнологичной промышленной продукции «Ростех», г. Москва, Россия, 121357, г. Москва, Вере́йская улица, д. 11; e-mail: [s.a.dmitriev-01@rambler.ru](mailto:s.a.dmitriev-01@rambler.ru)

#### Information about the authors

**Sergey A. Dmitriev**, Cand. Sci. (Eng.), Joint-Stock Company "RT-Fire Safety" of the State Corporation for Assistance to the Development, Production and Export of High-Tech Industrial Products "Rostec", Vereiskaya str., 11, Moscow, 121357, Russian Federation; e-mail: [s.a.dmitriev-01@rambler.ru](mailto:s.a.dmitriev-01@rambler.ru)