

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-3-587-596

УДК 004.932.72'1

Технология трехмерной реконструкции траектории свободной струи на основе фотограмметрии

Ирина Николаевна Пожаркова✉

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железнодорожск, 662972, Российская Федерация
Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Российская Федерация
pozharikova@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1153-350X>

Аннотация

Введение. Предметом исследования является трехмерная реконструкция траектории свободной струи огнетушащего вещества по результатам натурных испытаний противопожарной ствольной техники. Получаемые на основе струи геометрические фигуры используются при синтезе и отладке систем технического зрения, алгоритмов управления пожарными роботами, построения и валидации математических и нейросетевых моделей изучаемых потоковых процессов. Особенности свободных струй в данной прикладной области являются значительные размеры, изменяющаяся форма границ, переменная оптическая плотность различных участков и т. д., что значительно затрудняет применение существующих методов трехмерной реконструкции. Разработана технология построения моделей траекторий движения огнетушащего вещества, позволяющая решить указанные проблемы. **Метод.** Предложена методика проведения натурных испытаний ствольной техники на предварительно размеченном экспериментальном полигоне с синхронизированной видеофиксацией свободной струи в трех плоскостях, в том числе с использованием бортовой камеры беспилотного летательного аппарата. Приведен алгоритм трехмерной реконструкции траектории на основе полученных цифровых изображений с учетом геометрических особенностей изучаемых потоковых процессов. **Основные результаты.** Приведены результаты апробации разработанной технологии при изучении движения потока огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола под воздействием бокового ветра, который может существенно отклонять струю в поперечном направлении. На основе полученных при проведении эксперимента цифровых изображений была построена трехмерная модель исследуемой траектории. Сравнительный анализ геометрических характеристик струи (высота, дальность и отклонение в поперечном направлении), рассчитанных по результатам реконструкции, а также измеренных в ходе натурных испытаний, показал, что максимальная относительная ошибка составляет 3,7 %, что говорит о достаточно высокой точности разработанной методики. **Обсуждение.** Практическая значимость данной технологии заключается в возможности получения с высоким пространственным разрешением эмпирических данных при исследованиях свободных струй. Результаты эксперимента могут использоваться для валидации моделей, описывающих их движение на основе методов вычислительной гидродинамики и машинного обучения. Предложенная технология может найти применение при разработке систем технического зрения, алгоритмов управления наведением огнетушащего вещества на цель с учетом возмущающих воздействий в противопожарных роботизированных системах.

Ключевые слова

трехмерная реконструкция, свободные струи, фотограмметрия, компьютерное зрение, пожарные роботы, машинное обучение, БПЛА

Ссылка для цитирования: Пожаркова И.Н. Технология трехмерной реконструкции траектории свободной струи на основе фотограмметрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 3. С. 587–596. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-3-587-596

Photogrammetry-based free jet trajectory 3D reconstruction technology

Irina N. Pozharkova✉

Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
 Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
 pozharkova@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1153-350X>

Abstract

The subject of this study, which is the focus of this article, is the three-dimensional reconstruction of the trajectory of a free jet of fire-extinguishing agent based on full-scale tests of firefighting monitor systems. The resulting geometric shapes are used in the synthesis and debugging of computer vision systems, control algorithms for firefighting robots, and the construction and validation of mathematical and neural network models of the studied flow processes. Key features of free jets in this applied field include their large scale, dynamically changing boundary shapes, variable optical density across different regions, and more, which significantly complicates the application of existing 3D reconstruction methods. The aim of this work is to develop a technology for modeling the trajectories of fire-extinguishing agents that can address these challenges. This study proposes a methodology for conducting full-scale tests of monitor systems on a pre-marked experimental site with synchronized video recording of the free jet in three planes, including the use of an onboard camera from an unmanned aerial vehicle. Additionally, an algorithm for 3D trajectory reconstruction based on the obtained digital images was developed, taking into account the geometric features of the studied flow processes. The article presents the results of testing the developed technology in studying the motion of a fire-extinguishing agent stream from a fire monitor nozzle under the influence of crosswinds which can significantly deflect the jet laterally. A 3D model of the investigated trajectory was constructed using digital images captured during the experiment. A comparative analysis of the jet geometric characteristics (height, range, and lateral deflection) — calculated from the reconstruction results and measured during full-scale tests — showed a maximum relative error of 3.7 %, indicating the high accuracy of the proposed method. The practical significance of this technology lies in its ability to obtain high-spatial-resolution empirical data in free-jet studies. These data can be used to validate models describing jet motion based on computational fluid dynamics and machine learning methods, particularly in the development of computer vision systems and fire-extinguishing agent targeting algorithms that account for external disturbances in robotic firefighting systems.

Keywords

3D reconstruction, free jets, photogrammetry, computer vision, fire robots, machine learning, UAVs

For citation: Pozharkova I.N. Photogrammetry-based free jet trajectory 3D reconstruction technology. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 3, pp. 587–596 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-3-587-596

Введение

Построение трехмерных моделей реальных объектов и процессов является основой решения задач, связанных, в том числе, с оценкой различных целевых характеристик предметов исследования [1], валидацией описывающих их численных методов [2], формированием выборок для машинного обучения [3] и т. д. Например, траектория свободных струй под влиянием внешних воздействий, в частности при движении потоков огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола (ПЛС) на открытой местности, представляет собой геометрически достаточно сложную фигуру, которая может иметь значительные размеры (десятки метров). Фотограмметрия [4, 5] является одним из наиболее доступных способов трехмерной реконструкции реальных объектов. В настоящее время существуют готовые решения и их программные реализации [6, 7], позволяющие на основе множества фотографий, сделанных с различных ракурсов, в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [8], с высокой точностью создавать цифровых двойников различных предметов, зданий, сооружений и т. д. Однако применимость указанных методов ограничена преимущественно статичными объектами, форма и положение которых в процессе «сканирования» является стабильной. В связи с этим соответствующие алгоритмы фотограмметрии могут иметь низкую эффективность при построении трех-

мерных моделей траекторий свободных струй, границы которых в процессе движения существенно изменяются под влиянием различных факторов, в частности турбулентности. Кроме того, указанная задача может осложняться следующими особенностями исследуемых потоковых процессов: различная оптическая плотность струи на разных ее участках; зависимость оптической плотности одного и того же фрагмента струи от ракурса фотосъемки; слабая различимость струи на близком по яркости и цвету фоне; визуальное зашумление полупрозрачной струи внешними объектами, на фоне которых она движется; ограниченное время существования струи; значительные размеры струи.

Указанные особенности могут затруднять решение таких задач, как получение синхронизированных изображений исследуемых процессов в достаточном качестве и количестве различных ракурсов, выделение границ, выделение особых точек [9], ректификация [10] и т. д. Причем в значительной степени сложности, связанные с оптической плотностью, визуальным зашумлением и слабой различимостью струи, проявляются на участках ее распада и распыления, которые, как правило, представляют наибольший исследовательский интерес.

Цель настоящей работы заключается в разработке с учетом перечисленных проблем технологии трехмерной реконструкции траекторий потоков огнетушащего вещества из ПЛС,двигающегося в гравитационном поле при возмущающих воздействиях. Получаемые на

ее основе данные предназначены для валидации моделей вычислительной гидродинамики, а также нейросетевых моделей, используемых для прогнозирования соответствующих потоковых процессов, разработки и отладки алгоритмов управления ими, в частности с применением пожарных роботов [3, 11] и т. д.

Методы

В качестве модели траектории свободной струи, представляющей наибольший интерес с точки зрения решения прикладных задач, в частности в области управления пожарными роботами, используется множество точек, лежащих на верхней границе оптически наиболее плотной части исследуемого потока. Разработанная технология построения соответствующей трехмерной модели включает 5 основных этапов: калибровка камер, подготовка экспериментального полигона, проведение эксперимента, трехмерная реконструкция траекторий струй и оценка точности.

Калибровка камер заключается в расчете их внутренних параметров — калибровочных матриц $\mathbf{K}_m$, на основе которых в дальнейшем осуществляются перспективные преобразования:

$$\mathbf{K}_m = \begin{bmatrix} fx_m & s_m & cx_m \\ 0 & fy_m & cy_m \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где m — индекс камеры; $fx_m = F_m/ax_m$, $fy_m = F_m/ay_m$ — фокусные расстояния камеры m , выраженные в пикселях матрицы; ax_m и ay_m — ширина и высота пикселя, F_m — фокусное расстояние; s_m — коэффициент перекоса осей матрицы камеры m ; cx_m , cy_m — координаты оптического центра (главной точки) изображения.

Для камер, сенсоры которых имеют квадратные пиксели ($ax_m = ay_m = a_m$), строго перпендикулярные друг другу оси ($s_m = 0$), и главные точки, совпадающие с их центрами ($cx_m = cy_m = 0$), калибровочные матрицы будут иметь вид:

$$\mathbf{K}_m = \begin{bmatrix} f_m & 0 & 0 \\ 0 & f_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $f_m = F_m/a_m$, a_m — длина стороны квадратного пикселя.

Следует подчеркнуть, что на практике калибровочные матрицы не всегда выполняются и для того, чтобы учитывать влияние внутренних параметров на результаты перспективных преобразований, проводится соответствующая калибровка камер. Данная операция осуществляется с использованием алгоритмов, представленных в [12], по результатам съемки специализированных маркеров.

Подготовка экспериментального полигона при исследовании траекторий свободных струй огнетушащего вещества с учетом возмущающих воздействий заключается в разметке координатных осей и расстановке маяков в точках, являющихся ориентирами для размещения камер и ПЛС. На рис. 1 представлена схема экспериментального полигона.

Оси системы координат экспериментального полигона (рис. 1): OX — горизонтальная ось (выбирается вдоль направления проекции выходного патрубка исследуемого ПЛС на горизонтальную плоскость); OY — вертикальная ось; OZ — горизонтальная ось, перпендикулярная OX и OY . Точки размещения камер выбираются так, чтобы изображения свободных струй (в исследуемом диапазоне управляющих параметров ПЛС) полностью размещались в границы кадра.

Подготовка полигона для проведения натурных испытаний с целью сбора эмпирических данных, описывающих динамику струи из ПЛС при возмущающих воздействиях, согласно предлагаемой технологии, заключается в решении следующих задач.

1. Предварительный выбор расположения оси OX , начала координат и других точек, который осуществляется с учетом геометрических (размеры, перепад высот) и технических (места возможной установки

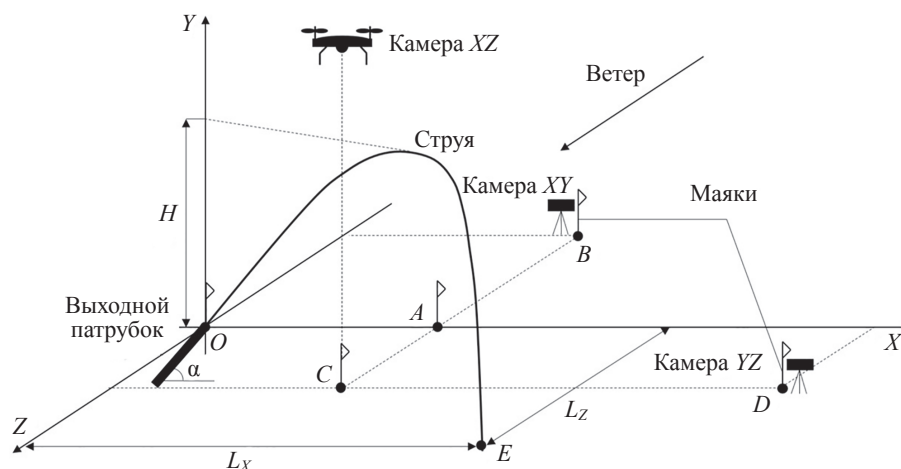


Рис. 1. Схема экспериментального полигона: H — высота струи; α — угол возвышения пожарного лафетного ствола; L_X — дальность струи; L_Z — смещение пятна контакта

Fig. 1. Layout of the experimental test site: H is jet height; α is elevation angle of the fire monitor; L_X is jet range; L_Z is contact patch displacement

ПЛС) особенностей экспериментального полигона, параметров управляющих (исследуемые углы возвышения выходного патрубка, рабочие давления и расходы огнетушащего вещества) и возмущающих воздействий (скорость и направление ветра), характеристик используемых цифровых камер и т. д.

- Разметка полигона (определение положения точек A, B, C, D), которая осуществляется при помощи геодезического оборудования (теодолит и т. д.). При этом в каждой точке устанавливаются маяки — хорошо заметные вертикальные объекты известной высоты, которые используются для быстрого размещения и настройки (ориентации) оборудования (ПЛС, камер, в том числе бортовой камеры БПЛА), а также уточнения на основе полученных цифровых изображений геометрических параметров эксперимента (характерные размеры, углы поворота камер и т. д.).
- Измерение по результатам разметки полигона координат (по осям OX, OY, OZ) точек: A, B, C, D .

Проведение эксперимента включает три основных этапа: подготовительные работы (установка и настройка камер, ПЛС и т. д.), тестовый запуск струи, по результатам которого определяется соответствие расстановки оборудования параметрам исследуемых процессов (в частности, осуществляется проверка того, что изображения потока огнетушащего вещества в заданном диапазоне управляющих параметров ПЛС полностью умещаются в границы кадров используемых камер), и основной ход натурных испытаний.

Основной ход эксперимента включает в себя запуск БПЛА (камера XZ , рис. 1), положение которого выбирается так, чтобы его проекция на плоскость XZ была как можно ближе к точке C . Матрица бортовой предварительно откалиброванной [12] камеры (камера XZ , рис. 1) ориентируется в горизонтальной плоскости. Высота положения БПЛА выбирается в диапазоне от минимального до максимального значений, которые со-

ответствуют попаданию с небольшим запасом в область изображения: ПЛС и маяка в точке E (максимально удаленной от ПЛС точке траектории исследуемой свободной струи, определяемой по результатам тестового запуска), ПЛС, маяка в точке E и камер XY, YZ . Съемка свободной струи при различных управляющих и возмущающих воздействиях осуществляется в видеорежиме с максимально возможным для применяемого оборудования разрешением и частотой кадров. При заданной точности требуемое минимальное разрешение по горизонтали можно оценить по формуле:

$$NX = 2Stg\left(\frac{\beta}{2}\right)/\delta,$$

где S — расстояние от камеры до наиболее удаленной точки струи; β — угол обзора камеры по горизонтали; δ — требуемая точность.

Экспериментальные результаты были получены на основе видеосъемки с разрешением 3840×2160 пикселей и частотой 60 кадров/с, что для наиболее удаленной от точки O ($S = 52,1$ м) камеры с углом обзора $\beta = 75^\circ$

обеспечивает точность $\delta = 2 \cdot 52,1 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{75}{2}\right) / 3840 = 0,02$ м.

Для синхронизации видеопотоков используется звуковой сигнал. При необходимости производится инструментальное измерение различных геометрических параметров струи — для оценки точности полученных на основе анализа цифровых изображений результатов. Параметры, заносямые в протокол испытаний, представлены в табл. 1.

На основе данных табл. 1 производится расчет положений всех камер (центральной точки их матриц) в координатной системе экспериментального полигона:

$$\begin{aligned} [X_c \ Y_c \ Z_c]^T &= [X_b \ Y_b \ Z_b]^T + \\ &+ [\Delta X_c \ \Delta Y_c \ \Delta Z_c]^T - [\Delta X_c \ \Delta Y_c \ \Delta Z_c]^T, \end{aligned}$$

Таблица 1. Основные параметры, записываемые в протокол испытаний

Table 1. Key parameters recorded in the test protocol

Наименование параметров	Этап
Координаты базовых точек A, B, C, D и E , м	Разметка полигона, тестовый запуск струи
Отклонения (по осям) расположения камер XY, YZ, XZ (центральной точки матрицы) относительно точек B, D и C соответственно, м	Подготовительные работы, основной ход эксперимента
Углы поворота камер относительно горизонтальных осей, град	
Отклонения (по осям) центра выходного отверстия ПЛС относительно точки O , м	Основной ход эксперимента
Угол возвышения выходного патрубка, град	
Угол направления ветра, град	Основной ход эксперимента
Скорость ветра, м/с	
Основные параметры окружающей среды: температура, $^\circ\text{C}$ влажность, %	
Основные параметры огнетушащего вещества: расход, л/с давление, МПа	

где Xb, Yb, Zb — координаты базовых точек B, C и D (табл. 1, строка 1); $\Delta Xc, \Delta Yc, \Delta Zc$ — отклонения (по осям) расположения камер относительно соответствующих базовых точек (табл. 1, строка 2); $\Delta Xs, \Delta Ys, \Delta Zs$ — отклонения (по осям) центра выходного отверстия ПЛС относительно точки O (табл. 1, строка 4); T — знак транспонирования.

Для построения трехмерной модели на основе цифровых изображений, сформированных из полученных в ходе натурных испытаний видеозаписей, производится распознавание траекторий свободных струй по результатам эксперимента, которое в данном случае заключается в построении массивов положения точек, лежащих на границах исследуемого огнетушащего вещества, в координатных системах матриц каждой из камер. При этом синхронизация видеопотоков осуществляется по соответствующим звуковым сигналам. Выделение границ струй на изображениях выполняется с применением методики, представленной в [13]. Данный подход заключается в сечении множества точек огнетушащего вещества путем последовательного поворота луча относительно заданной координаты. При этом для каждого такого сечения определяются точки струи, находящиеся на максимальном и минимальном расстояниях от указанного центра вращения и лежащие соответственно на ее верхней и нижней границах. Для повышения эффективности данного алгоритма производится предварительная обработка, позволяющая повысить яркий перепад между огнетушащим веществом и фоном. На основе полученных таким образом массивов точек изображений границ струи с различных камер осуществляется трехмерная реконструкция ее траектории.

Алгоритм построения трехмерной модели траектории свободной струи

Входные данные. Массив индексов цифровых камер: $Cam = \langle m \rangle$, где m — координатные плоскости, которым параллельны матрицы камер, используемые для съемки свободной струи (XY, YZ, XZ).

Массивы координат точек изображений верхних границ свободной струи: tp_m . Каждая точка массива описывается однородными координатами [14]: $[x \ y \ 1]^T$, где x, y — положение точки в координатной системе матрицы соответствующей цифровой камеры.

Калибровочные матрицы цифровых камер [12, 15]: K_m .

Матрицы вращения цифровых камер [14], описывающие их ориентацию в пространстве экспериментального полигона относительно координатных осей и определяемые на основе параметров (табл. 1, строка 3): R_m .

Матрицы перемещения цифровых камер [14], описывающие их положение в пространстве экспериментального полигона:

$$T_m = [Xc_m \ Yc_m \ Zc_m]^T,$$

где Xc_m, Yc_m, Zc_m — положения камеры в системе координат полигона, определяемые на основе параметров (табл. 1).

Индекс начальной главной камеры: $msam$. Данная камера, для которой на текущей итерации алгоритма отклонения между соседними точками траектории струи по оси перпендикулярной соответствующей координатной плоскости минимальны. На схеме, представленной на рис. 1, на начальном участке движения исследуемого потока главной является камера XY , поэтому для данного сценария в качестве $msam$ выбирается соответствующий индекс.

Минимальный шаг по массивам точек изображения траектории: $MinStep$.

Минимально допустимое расстояние между соседними точками траектории в системе координат экспериментального полигона ϵ .

Выходные данные. Массив точек траектории свободной струи в системе координат экспериментального полигона: P .

Рассмотрим основные шаги разработанного алгоритма.

Шаг 1. Выполняется инициализация алгоритма.

1.1. В массив траектории P добавляется точка с координатами в системе экспериментального полигона: $N = 0, P_N = 0$.

1.2. В качестве текущей точки выбирается последняя точка траектории $cP = P_N$.

1.3. В качестве главной камеры выбирается камера $msam$: $main = msam$.

1.4. Вычисление матриц, используемых для расчетов: $Q_m = K_m R_m$ и $q_m = -Q_m T_m, m \in Cam$.

Текущий шаг по массивам точек изображений траектории принимается равным минимальному: $step = MinStep$.

Шаг 2. Выполняется прямое перспективное преобразование [14] для текущей точки с параметрами главной камеры ($m = main$):

$$cp_m = Q_m cP + q_m, cp_m = cp_{m,1}/cp_{m,2}. \quad (1)$$

Шаг 3. Определяется индекс ближайшей к cp_m точки изображения траектории с главной камеры ($m = main$):

$$k = k: |p_k - cp_m| = \min_{p_i \in tp_m} (|p_i - cp_m|), \quad (2)$$

где $||$ — модуль вектора.

Если $k + step \geq |tp_m|$ (где $||$ — количество элементов массива), то конец алгоритма.

Шаг 4. Выбирается следующая за ближайшей точка массива ($m = main$):

$$nextP_m = tp_{m,k+step}. \quad (3)$$

Производится обратное перспективное преобразование [14] точки $nextP_m$:

$$nextP_m = Q_m^{-1}(\lambda nextP_m - q_m), \quad (4)$$

где $\lambda = \frac{cp_{TC(m)} + [Q_m^{-1} q_m]_{TC(m)}}{[Q_m^{-1} nextP_m]_{TC(m)}}$, $TC(m) = \begin{cases} Z, m = XY \\ X, m = YZ \\ Y, m = XZ \end{cases}$ — функция, устанавливающая соответствие между ка-

мерами и координатными осями системы полигона ортогональным плоскостям их матриц.

Шаг 5. Для камер, не являющихся главными ($m \neq main$, $m \in Cam$), определяются ближайшие к соответствующим прямым перспективным преобразованиям $\mathbf{cP} = \mathbf{nextP}_{main}$ точки изображения траектории по формулам (1)–(3) (для $step = 0$), а также их обратные перспективные преобразования (4).

Шаг 6. На основе полученных по результатам выполнения шагов 2–5 точек $\mathbf{nextP}_m$ для всех камер усреднением определяется новая текущая точка:

$$\mathbf{cP} = \frac{\sum_{m \in C} \mathbf{nextP}_m}{|Cam|},$$

где $|Cam|$ — количество элементов массива Cam .

Шаг 7. Если расстояние между $\mathbf{cP}$ и последней точкой траектории $\mathbf{P}_N$ меньше ε : $|\mathbf{cP} - \mathbf{P}_N| < \varepsilon$, то $step = step + 1$, $\mathbf{cP} = \mathbf{P}_N$ и переход к шагу 2. В противном случае, если $step > MinStep$, $step = step - 1$.

Шаг 8. Текущая точка $\mathbf{cP}$ заносится в массив траектории: $N = N + 1$, $\mathbf{P}_N = \mathbf{cP}$. Удаление из массивов $\mathbf{tp}_m$ точек, лежащих между истоком струи и $\mathbf{nextP}_m$ включительно ($\mathbf{tp}_{m,i} : i \leq k$, $\mathbf{nextP}_m = \mathbf{tp}_{m,k}$, $m \in Cam$).

Шаг 9. Определяется новая главная камера по минимальному отклонению координат в системе экспериментального полигона между двумя последними точками траектории:

$$main = \text{invTC}(ax),$$

$$\text{где } ax = ax: |\mathbf{P}_{N,ax} - \mathbf{P}_{N-1,ax}| = \min_{i=(X,Y,Z)} (|\mathbf{P}_{N,i} - \mathbf{P}_{N-1,i}|);$$

$$\text{invTC}(ax) = \begin{cases} YZ, ax = X \\ XZ, ax = Y \\ XY, ax = Z \end{cases} \text{ — функция, устанавливающая}$$

соответствие между координатными осями полигона и камерами, матрицы которых лежат в ортогональных им плоскостям.

Переход к шагу 2.

На рис. 2 показана поясняющая схема к алгоритму построения траектории, демонстрирующая переход между ее точками, а на рис. 3 — блок-схема алгоритма.

Удаление из массивов $\mathbf{tp}_m$ точек, лежащих между истоком струи и $\mathbf{nextP}_m$ включительно, на шаге 8 используется для предотвращения некорректной работы алгоритма в окрестностях максимума струи по высоте при малых расстояниях между изображениями восходящего и нисходящего потоков огнетушащего вещества, например, в проекции YZ , когда боковой ветер имеет незначительную скорость, или в проекции XY при больших значениях угла возвышения выходного патрубка. Так на шагах 3 и 5 алгоритма в качестве ближайших к $\mathbf{cP}_m$ могут быть выбраны точки, лежащие на соседнем участке траектории (восходящем, вместо нисходящего), что при последующих итерациях приведет к накоплению ошибки построенной модели. Поэтому для предотвращения данного эффекта на шаге 8 производится соответствующая коррекция.

Оценка точности построенной трехмерной модели производится путем сравнения полученных на ее основе различных геометрических характеристик с измеренными при проведении натурных испытаний.

Результаты

Для оценки эффективности разработанной технологии были проведены натурные испытания на экспериментальном полигоне. Из-за ряда ограничений, в том числе и на высоту полета БПЛА, углы поворота камер относительно различных осей отличались от

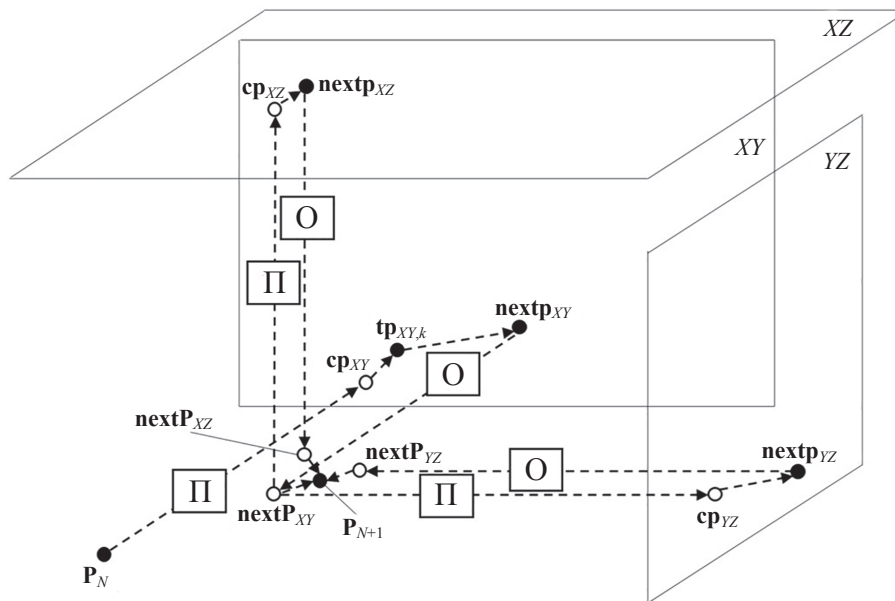


Рис. 2. Поясняющая схема к алгоритму построения траектории.

П — операция прямого перспективного преобразования; О — операция обратного перспективного преобразования

Fig. 2. Explanatory diagram of the trajectory reconstruction algorithm.

П is forward perspective transformation operation; О is inverse perspective transformation operation

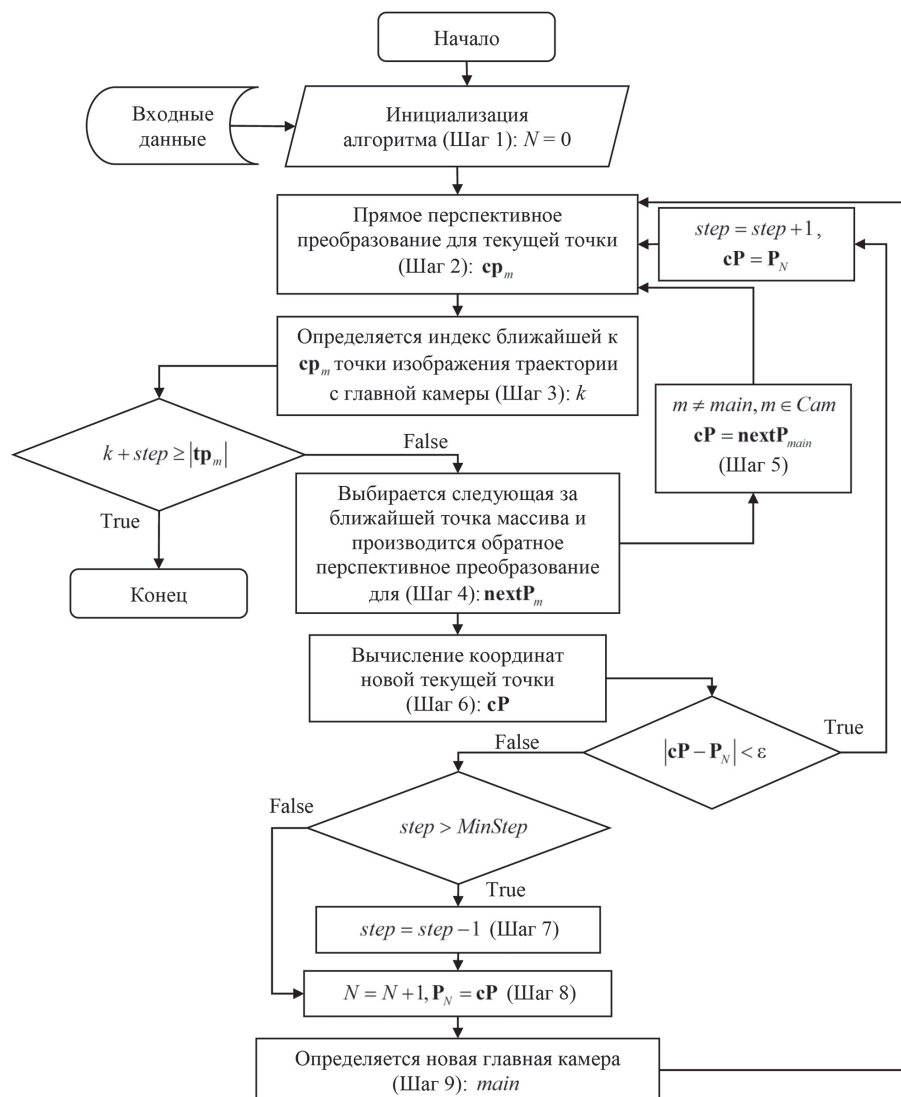


Рис. 3. Блок-схема алгоритма построения трехмерной модели траектории свободной струи

Fig. 3. Block-diagram of the algorithm for constructing a 3D model of the free jet trajectory

рекомендованных в рамках предлагаемой методики. Расстановка наземных камер и разметка полигона производилась, исходя из планируемых максимальных значений дальности и высоты струи, соответственно 35 м и 20 м. Положение БПЛА выбиралось так, чтобы обеспечить полное попадание огнетушащего вещества в область изображения с учетом параметров текущего эксперимента и ограничений на высоту полета. В табл. 2 представлены координаты и углы поворота по осям камер, соответствующие запуску струи со следующими характеристиками: угол возвышения выходного патрубка ЛС-П20У 44°30'; расход огнетушащего вещества 16,1 л/с; рабочее давление 343 кПа; скорость ветра 2 м/с; угол направления ветра в плоскости XZ 104°.

На рис. 4 представлены фрагменты исходных изображений, полученные в один и тот же момент времени на основе синхронизированных по звуковому сигналу видеозаписей с трех камер, а также соответствующие результаты их предварительной обработки и выделения границ струи.

На рис. 5, а представлены результаты построения трехмерной модели траектории струи (исходная и сглаженная кривые) с использованием разработанного алгоритма, а также контрольные точки, полученные на ее основе и по результатам измерений: исток струи (центр выходного отверстия ПЛС), наивысшая точка струи, наиболее удаленная от выходного патрубка ПЛС точка струи.

Таблица 2. Основные параметры камер

Table 2. Main camera parameters

Наименование параметра	Камера XY	Камера YZ	Камера XZ
Координаты (X; Y; Z), м	(23,4; -1,38; -30)	(0,3; -1,8; 52,1)	(14; 34,9; 0)
Углы поворота (OX; OY; OZ), град	(20; 0; 0)	(0; -1,2; 20)	(0,5; 0; 0)

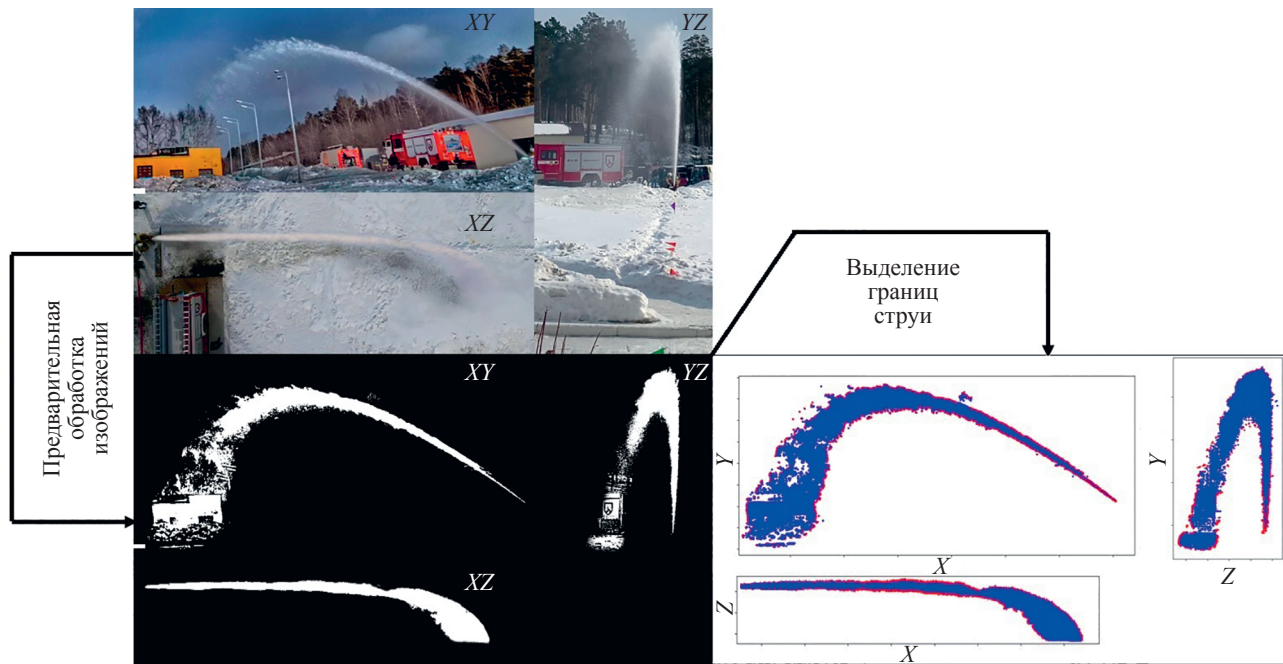


Рис. 4. Фрагменты исходных изображений, результаты их предварительной обработки и выделения границ струи

Fig. 4. Fragments of source images, their pre-processing results, and extracted jet boundaries

В табл. 3 представлен сравнительный анализ основных геометрических характеристик струи, полученных на основе построенной модели и по результатам измерений, проведенных во время натурных испытаний с использованием геодезического оборудования.

Отклонения модельных положений наивысшей точки и наиболее удаленной от ПЛС точки струи (рис. 5, а) от измеренных не превышает 1 м, а соответствующие координаты истоков совпадают. Максимальная среди представленных в табл. 3 характеристик относитель-

ная ошибка составила 3,7 %, что говорит о достаточно высокой точности предлагаемой технологии.

Для оценки чувствительности разработанной методики к разрешениям камер исходные изображения были соответствующим образом сжаты. Далее на их основе были построены модели с применением предлагаемой технологии. Точность оценивалась на основе средней квадратической ошибки относительно исходной траектории, полученной при разрешении 3840×2160 пикселей. Результаты представлены на рис. 5, б. Как видно,

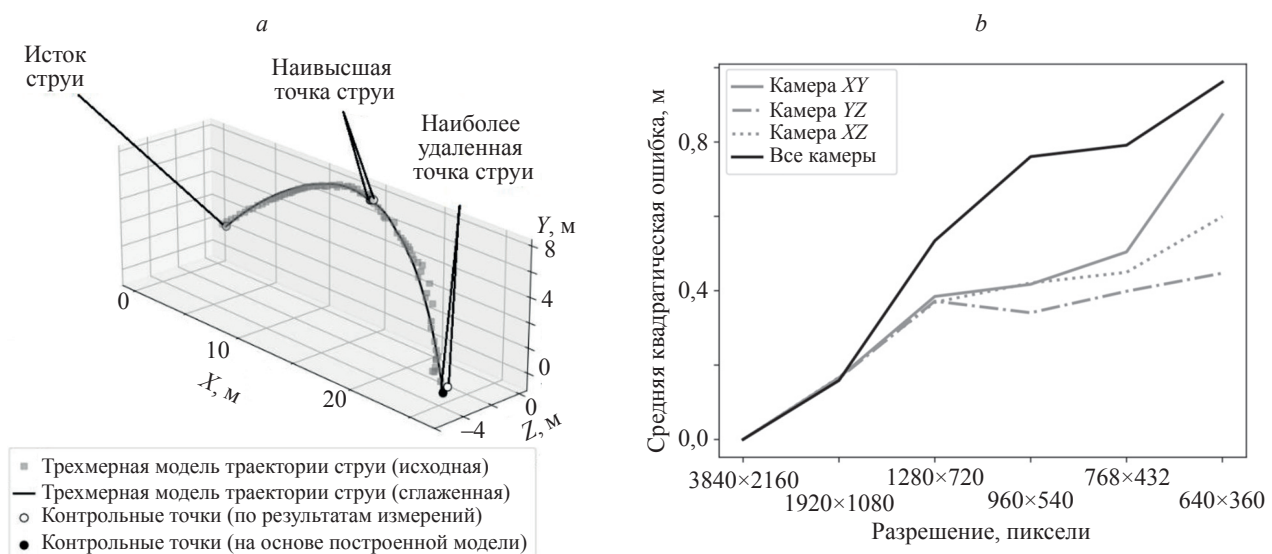


Рис. 5. Результаты оценки эффективности разработанной технологии: построение трехмерной модели траектории струи при исходном разрешении камер (а); оценка чувствительности технологии к разрешению камер (б)

Fig. 5. Results of the developed technology efficiency evaluation: jet trajectory 3D reconstruction at initial resolution of cameras (а); technology sensitivity evaluation to resolution of cameras (б)

Таблица 3. Сравнительный анализ геометрических характеристик струи
Table 3. Comparative analysis of the jet geometric characteristics

Наименование параметра струи	Значение, м		Абсолютная ошибка, м	Относительная ошибка, %
	Измерения	Модель		
Дальность по оси OX (L_X)	25,20	24,90	0,30	1,2
Высота струи (H)	7,65	7,37	0,28	3,7
Отклонение по оси OZ (L_Z)	3,60	3,60	0,00	0,0

наибольшее влияние на ошибку оказывает разрешение камеры XU (исходная главная камера), а наибольшее ухудшение качества реконструкции траектории наблюдается при одновременном снижении разрешения всех камер.

Заключение

Представленная технология предназначена для построения трехмерной модели траектории свободной струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола при возмущающих воздействиях. Разработанная методика подготовки экспериментального полигона и проведения эксперимента позволяет получить в достаточном количестве и качестве для последующей реконструкции цифровые изображения исследуемых потоковых процессов при проведении натурных испытаний пожарной ствольной техники, в том числе и в полевых условиях.

Разработанный алгоритм построения трехмерной модели траектории свободной струи, двигающейся в

гравитационном поле при возмущающих воздействиях, может использоваться для решения соответствующих исследовательских задач в различных прикладных областях.

Проведенная апробация предлагаемой технологии показала высокую точность трехмерной реконструкции траектории струи воды из пожарного лафетного ствола при воздействии ветровой нагрузки, в частности, максимальное относительное отклонение геометрических параметров, оцененных на основе построенной модели, от измеренных при проведении эксперимента составило 3,7 %.

Предложенная технология может использоваться для получения эмпирических данных при исследованиях свободных струй, валидации моделей, описывающих их движение на основе методов вычислительной гидродинамики и машинного обучения, в частности при разработке алгоритмов управления наведением струи огнетушащего вещества, а также систем технического зрения в противопожарных роботизированных системах.

Литература

1. Zhou L., Wu G., Zuo Y., Chen X., Hu H. A comprehensive review of vision-based 3D reconstruction methods // *Sensors*. 2024. V. 24. N 7. P. 2314. doi: 10.3390/s24072314
2. Paden I., Garcia-Sanchez C., Ledoux H. Towards automatic reconstruction of 3D city models tailored for urban flow simulations // *Frontiers in Built Environment*. 2022. V. 8. P. 899332. doi: 10.3389/fbuil.2022.899332
3. Samavati T., Soryani M. Deep learning-based 3D reconstruction: a survey // *Artificial Intelligence Review*. 2023. V. 56. N 9. P. 9175–9219. doi: 10.1007/s10462-023-10399-2
4. Karami A., Menna F., Remondino F. Combining photogrammetry and photometric stereo to achieve precise and complete 3D reconstruction // *Sensors*. 2022. V. 22. N 21. P. 8172. doi: 10.3390/s22218172
5. Zhao S., Kang F., Li J., Ma C. Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction // *Automation in Construction*. 2021. V. 130. P. 103832. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103832
6. Sebar L.E., Grassini S., Parvis M., Lombardo L. A low-cost automatic acquisition system for photogrammetry // *Proc. of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2021. P. 1–6. doi: 10.1109/i2mtc50364.2021.9459991
7. Lehoczy M., Abdurakhmonov Z. Present Software of photogrammetric processing of digital images // *E3S Web of Conferences*. 2021. V. 227. P. 04001. doi: 10.1051/e3sconf/202122704001
8. Sharma M., Raghavendra S., Agrawal S. Development of an open-source tool for UAV photogrammetric data processing // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2021. V. 49. N 3. P. 659–664. doi: 10.1007/s12524-020-01237-x
9. Tian Y., Ding C., Lin Y.F., Ma S., Li L. Automatic feature type selection in digital photogrammetry of piping // *Computer-Aided*

References

1. Zhou L., Wu G., Zuo Y., Chen X., Hu H. A comprehensive review of vision-based 3D reconstruction methods. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 7, pp. 2314. doi: 10.3390/s24072314
2. Paden I., Garcia-Sanchez C., Ledoux H. Towards automatic reconstruction of 3D city models tailored for urban flow simulations. *Frontiers in Built Environment*, 2022, vol. 8, pp. 899332. doi: 10.3389/fbuil.2022.899332
3. Samavati T., Soryani M. Deep learning-based 3D reconstruction: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 2023, vol. 56, no. 9, pp. 9175–9219. doi: 10.1007/s10462-023-10399-2
4. Karami A., Menna F., Remondino F. Combining photogrammetry and photometric stereo to achieve precise and complete 3D reconstruction. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 21, pp. 8172. doi: 10.3390/s22218172
5. Zhao S., Kang F., Li J., Ma C. Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction. *Automation in Construction*, 2021, vol. 130, pp. 103832. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103832
6. Sebar L.E., Grassini S., Parvis M., Lombardo L. A low-cost automatic acquisition system for photogrammetry. *Proc. of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/i2mtc50364.2021.9459991
7. Lehoczy M., Abdurakhmonov Z. Present Software of photogrammetric processing of digital images. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 227, pp. 04001. doi: 10.1051/e3sconf/202122704001
8. Sharma M., Raghavendra S., Agrawal S. Development of an open-source tool for UAV photogrammetric data processing. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, vol. 49, no. 3, pp. 659–664. doi: 10.1007/s12524-020-01237-x
9. Tian Y., Ding C., Lin Y.F., Ma S., Li L. Automatic feature type selection in digital photogrammetry of piping. *Computer-Aided Civil*

- Civil and Infrastructure Engineering, 2022. V. 37. N 10. P. 1335–1348. doi: 10.1111/mice.12840
10. Aguera-Vega F., Aguera-Puntas M., Aguera-Vega J., Martinez-Carricondo P., Carvajal-Ramirez F. Multi-sensor imagery rectification and registration for herbicide testing // *Measurement*. 2021. V. 175. P. 109049. doi: 10.1016/j.measurement.2021.109049
 11. Пожаркова И.Н., Ченцов С.В., Цариченко С.Г., Горбань Ю.И., Немчинов С.Г. Методика прогнозирования траектории струи огнетушащего вещества из ствола пожарного робота в режиме реального времени // *Безопасность труда в промышленности*. 2025. № 3. С. 14–20. doi: 10.24000/0409-2961-2025-3-14-20
 12. Zhang Z. Camera calibration // *Computer Vision*. 2021. P. 130–131. doi: 10.1007/978-3-030-63416-2_164
 13. Пожаркова И.Н. Распознавание траекторий струй огнетушащего вещества из пожарного ствола на основе цифровых изображений // *Программные продукты и системы*. 2024. № 2. С. 262–269. doi: 10.15827/0236-235X.146.262-269
 14. Zhang J., Zhang J., Chen B., Gao J., Ji S., Zhang X., Wang Z. A perspective transformation method based on computer vision // *Proc. of the IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*. 2020. P. 765–768. doi: 10.1109/icaica50127.2020.9182641
 15. Zhang Z. Camera parameters (intrinsic, extrinsic) // *Computer Vision*. 2021. P. 135–140. doi: 10.1007/978-3-030-63416-2_152
 - and Infrastructure Engineering, 2022, vol. 37, no. 10, pp. 1335–1348. doi: 10.1111/mice.12840
 10. Aguera-Vega F., Aguera-Puntas M., Aguera-Vega J., Martinez-Carricondo P., Carvajal-Ramirez F. Multi-sensor imagery rectification and registration for herbicide testing. *Measurement*, 2021, vol. 175, pp. 109049. doi: 10.1016/j.measurement.2021.109049
 11. Pozharkova I.N., Chentsov S.V., Tsarichenko S.G., Gorban Yu.I., Nemchinov S.G. Methodology of real-time forecast of fire-extinguishing agent jet trajectory from fire robot monitor. *Occupational Safety in Industry*. 2025, no. 3, pp. 14–20. (in Russian). doi: 10.24000/0409-2961-2025-3-14-20
 12. Zhang Z. Camera calibration. *Computer Vision*, 2021, pp. 130–131. doi: 10.1007/978-3-030-63416-2_164
 13. Pozharkova I.N. Recognizing jet trajectories of fire monitor extinguishing agent based on digital images. *Software & Systems*, 2024, no. 2, pp. 262–269. (in Russian). doi: 10.15827/0236-235X.146.262-269
 14. Zhang J., Zhang J., Chen B., Gao J., Ji S., Zhang X., Wang Z. A perspective transformation method based on computer vision. *Proc. of the IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*, 2020, pp. 765–768. doi: 10.1109/icaica50127.2020.9182641
 15. Zhang Z. Camera parameters (intrinsic, extrinsic). *Computer Vision*, 2021, pp. 135–140. doi: 10.1007/978-3-030-63416-2_152

Автор

Пожаркова Ирина Николаевна — кандидат технических наук, доцент, профессор, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железнодорожск, 662972, Российская Федерация; доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Российская Федерация, [sc 55990913900](https://orcid.org/0000-0003-1153-350X), <https://orcid.org/0000-0003-1153-350X>, pozharkova@mail.ru

Author

Irina N. Pozharkova — PhD, Associate Professor, Professor, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation; Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, [sc 55990913900](https://orcid.org/0000-0003-1153-350X), <https://orcid.org/0000-0003-1153-350X>, pozharkova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2025
Одобрена после рецензирования 24.04.2026
Принята к печати 19.05.2026

Received 16.06.2025
Approved after reviewing 24.04.2026
Accepted 19.05.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»