

УДК 621.396.969  
 DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-73-82

## Применение радиолокационных станций бокового обзора для повышения эффективности тушения лесных пожаров\* с использованием авиационных систем

**С. А. Ненашев**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

**О. И. Саута**, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

**А. Р. Бестужин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

**В. А. Ненашев**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

*В работе представлена методика реализации комплексной системы для организации тушения площадных лесных пожаров с применением беспилотных летательных аппаратов. Основное внимание уделено развитию авиационных технологий технического зрения, сочетающих использование современных радиолокационных станций, формирующих кадры, видеокамер видимого и инфракрасного диапазонов, высокоточных навигационных комплексов глобальной навигационной спутниковой системы и геоинформационных систем. Предложенная методика обеспечивает оперативное сканирование района пожара, получение геопривязанных данных об особенностях рельефа, определение опасных препятствий и точное картографирование фронта огня. На основе интеграции радиолокационной и оптической информации формируется оптимальный план полета пожарного самолета по виртуальной взлетно-посадочной полосе, расположенной на высоте 30...50 м над фронтом пожара, с учетом параметров ветра, облачности и наличия искусственных препятствий. Параметры траектории рассчитываются аналогично тому, как это делается для схем инструментального захода на посадку, что позволяет обеспечить точность сброса огнегасящей жидкости с погрешностью до нескольких метров и повысить безопасность полета в сложных условиях. Методика предусматривает циклическое обновление данных посредством БЛА и оперативную передачу скорректированных маршрутов бортовому вычислителю навигационно-пилотажного комплекса. Проведен детальный анализ точностных характеристик современной глобальной навигационной спутниковой системы, инерциальных модулей и цифровых матриц рельефа, а также выполнена оценка погрешностей определения координат объектов на удалении до 300 м. Показано, что разработанная методика позволяет компенсировать ограничения существующих баз данных и оперативно вводить новые элементы препятствий в маршрутную модель. Практическое внедрение предлагаемой методики способствует повышению эффективности тушения лесных пожаров, сокращению времени реагирования и снижению рисков авиационных инцидентов при выполнении задач экстренно-го реагирования.*

**Ключевые слова:** радиолокационная система, беспилотный летательный аппарат, рельеф местности, геоинформационные технологии, пожаротушение.

### Введение

**В** России ежегодно происходит до 15 тыс. лесных пожаров, в результате чего выгорает до 10 млн гектаров леса [1]. Для примера на рисунке 1 приведена иллюстрация случившихся в 2023 г. крупных лесных пожаров.

Важное значение авиации в решении проблемы борьбы с пожарами обусловлено, в том числе, тем, что тушение пожара с воздуха водой (или раствором замедлителя горения) возможно в местах, не доступных для наземных пожарных команд. При этом применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для ведения пожарной, инженерной, радиационной, химической разведки и мониторинга местности позволяет не только повысить оперативность получения информации по сравнению с использованием пилотируемой авиации, требующей доступа к базам обеспечения (аэродромам), но и существенно дешевле [2, 3].

Анализ состояния и развития летно-тактической инфраструктуры авиации МЧС России показывает [4], что наиболее эффективными средством тушения круп-

ных лесных пожаров являются самолеты Ил-76ТД, оборудованные водосливным устройством, содержащим до 42 т воды, и самолет Бе-200ЧС, предназначенный для тушения пожаров путем многократных сливов воды или огнегасящих растворов. Для тушения крупных точечных пожаров применяются вертолеты Ми-26Т, Ми-8 и Ка-32, использующие водосливные устройства, содержащие до 15 т воды. Остальные типы самолетов и вертолетов являются средствами экстренной доставки или эвакуации (RRJ-95LR-100, Ан-148-100ПМ), патрулирования (Ан-74П), вертолеты типа БК-117 и Бо-105 применяются для обеспечения санитарно-авиационной эвакуации.

Самолет Ил-76ТД может сбросить за 7 с на очаг пожара с высоты 40...50 м до 42 т воды или специальной огнегасящей жидкости, покрывающей площадь размером приблизительно 6 га. В процессе сброса воды также производится мощное ударное воздействие по всей площади сброса, так как скорость самолета при этом составляет около 280 км/ч.



Рис. 1. Очаги крупных лесных пожаров в России в 2023 г.

Fig. 1. Foci of large forest fires in Russia in 2023

В настоящее время прослеживается основная тенденция, суть которой заключается в необходимости оперативной подготовки авиационных специалистов к полетам на предельно малых высотах в сложных условиях [5].

При тушении крупных лесных пожаров альтернативы применения пожарной авиации нет, что обуславливается высокой скоростью распространения пожара (до 30 км/ч), массированным выделением углекислого газа, наличием плотного смога и др.

Специалисты лесного хозяйства, участвовавшие в тушении пожаров, отмечают, что без соответствующей подготовки экипажа самолета процесс тушения пожара с использованием авиации неэффективен [6]. Более того, известно множество случаев авиационных катастроф при тушении пожаров [7], обусловленных, в том числе, следующими причинами:

- отсутствие достоверной осведомляющей информации о характере рельефа и искусственных препятствиях в районе сброса огнегасящей жидкости;
- неэффективная предполетная подготовка пилотов;
- недостоверные показания бортовых датчиков;
- ошибки навигационных расчетов.

**Цель** настоящей статьи – разработка методики применения данных сканирования местности с использованием радиолокационной станции бокового обзора, установленной на беспилотном летательном аппарате, при совместном использовании с геоинформационными системами для повышения эффективности и безопасности тушения лесных пожаров.

Эффективность пожаротушения  $E$  будем оценивать по критерию повышения вероятности перекрытия ширины фронта пожара полосой слива огнегасящей жидкости при различной точности наведения воздушного судна (ВС) на очаг пожара в соответствии с выражением

$$E = \frac{P_1}{P_2}, \quad (1)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – вероятности, соответственно, перекрытия ширины фронта пожара полосой слива при ис-

пользовании разработанной методики и при наведении ВС на очаг пожара с использованием применяемых в настоящее время методик.

Повышение безопасности пожаротушения  $S$  будем оценивать по критерию повышения точности определения минимальной безопасной высоты проleta над очагом пожара в соответствии с выражением

$$S = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – погрешности определения высоты полета ВС над очагом пожара, соответственно, без использования предлагаемой методики и в случае ее применения.

#### Постановка проблемы

Эффективность тушения крупного лесного пожара с использованием авиации в значительной степени обусловлена оперативностью доведения до экипажа ВС информации о траектории полета, по которой необходимо выйти в район пожара, и о координатах относительно небольшой области фронта пожара, подавление огня в которой даст наибольший эффект в сдерживании или остановке распространения огня. В то же время траектория полета должна быть построена таким образом, чтобы обеспечить безопасный подход ВС к району пожара, снижение до высоты 30...50 м (оптимальной для сброса воды), полет на этой высоте с выполнением слива воды на выбранный участок фронта пожара и набор высоты с выполнением маневра ухода на заправку.

Описанная выше задача подобна задаче полета ВС в районе аэродрома при заходе на посадку и посадке на взлетно-посадочную полосу (ВПП). Для всех аэродромов существуют безопасные схемы прибытия и вылета, а также заданы параметры посадочной глиссады (курс, угол наклона) [8]. Также на аэродромах обычно устанавливаются радиотехнические средства навигации и посадки, информация от которых выдается на штатные индикаторы в кабине пилота и используется при посадке на взлетно-посадочную полосу. Ширина большинства ВПП для большинства аэродромов составляет около 50 м,

длина 1,5...2,5 км. При этом ВС осуществляет посадку с отклонением от оси ВПП не более чем 3...5 м.

Ширина фронта лесного пожара обычно составляет около 80 м [9], а длина участка, на котором осуществляется слив воды, около 600 м. Таким образом, если для тушения лесного пожара применить методики инструментального захода и посадки ВС на ВПП, то можно обеспечить точность сброса воды на фронт пожара с погрешностью в несколько метров. При этом экипаж может осуществляться пилотирование с использованием штатных навигационно-посадочных средств ВС в соответствии с тем, как это происходит при посадке на ВПП аэродрома.

Таким образом, если навигационный комплекс ВС оснастить бортовым оборудованием ГНСС, то возможно обеспечить его полет по заданному маршруту на основе использования технологий спутниковой навигации и посадки [10]. Для этого достаточно передать на борт ВС координаты промежуточных пунктов маршрута полета и параметры заданной траектории захода на фронт пожара (виртуальную ВПП), расположенную на высоте 30...50 м над фронтом пожара.

В настоящее время оперативная информация об особенностях рельефа и наличии искусственных препятствий в районе фронта пожара может быть получена при использовании БЛА, так как для их подготовки к выполнению полета требуется минимальное время и не нужна аэродромная инфраструктура. После прибытия в район пожара технического

подразделения МЧС, оснащенного БЛА с радиолокационной станцией бокового обзора, практически сразу можно приступить к оптическому, тепловизионному и радиолокационному картографированию области пожара.

Основными задачами, которые должны быть решены операторами БЛА, являются:

- определение границ района, в котором пожарное ВС будет выполнять пожаротушение;
- выявление особенностей рельефа и наличие опасных для выполнения маловысотного полета полет искусственных препятствий в районе полета;
- сведение топографических (геоинформационных) данных и результатов радиолокационного, оптического и тепловизионного сканирования района пожара;
- формирование оптимального плана полета пожарного ВС для сброса воды на фронт пожара и безопасного ухода на заправку;
- передача плана полета на ВС и загрузка его в бортовой вычислитель системы самолетовождения.

На рисунке 2 приведена иллюстрация исходного материала, который должен использоваться для подготовки эффективного и безопасного плана полета пожарного ВС: район сканирования земной поверхности в области лесного пожара с использованием РЛС бокового обзора, траектория полета БЛА при выполнении сканирования, область и фронт пожара, а также опасные при полете ВС на малых высотах искусственные препятствия.

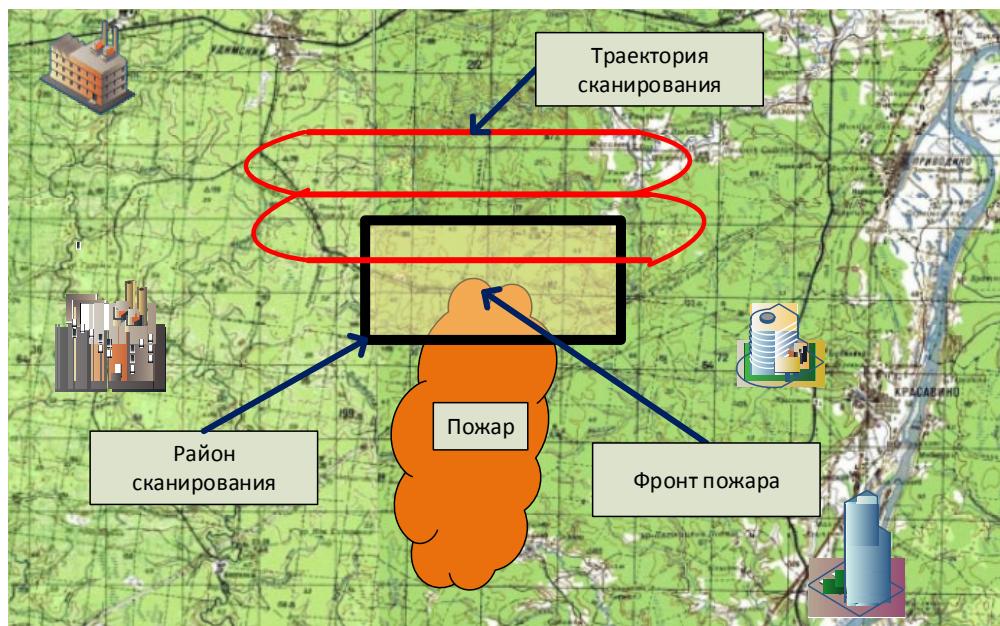


Рис. 2. Определение района сканирования, координат и границ фронта пожара

Fig. 2. Determination of the scanning area, coordinates and boundaries of the fire front

Базовой концепцией при реализации рассматриваемой методики является разработка и внедрение комплексной автоматизированной системы оперативно-тактической подготовки к тушению пожара, в которой обеспечивается сопряжение данных геоинформационных систем и оператив-

ных данных, полученных с применением БЛА, оснащенных РЛС бокового обзора. При этом фактически происходит актуализация баз данных геоинформационных систем с учетом обеспечения баланса их точности и данных сканирования подстилающей поверхности.

## Методика совместного использования данных РЛС и геоинформационных систем

Комплексное использование современных технологий геоинформационных систем, глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и РЛС бокового обзора позволяет реализовать новые оперативные методы тушения лесных пожаров, обеспечивающие повышение эффективности тушения пожара, безопасности полета при наведении пожарного самолета типа Ил-76 на рубеж сброса воды, а также вывода самолета типа Бе-200ЧС на область водной поверхности для забора воды в полете.

Суть предлагаемой методики заключается в том, что БЛА, оснащенный РЛС бокового обзора, осуществляет разведку района пожара и передает либо в центр управления операцией по тушению, либо непосредственно на борт пожарного самолета информацию, позволяющую сформировать оптимальный и безопасный маршрут к фронту или очагу пожара или безопасную траекторию для забора воды самолетом типа Бе-200ЧС.

Для реализации предлагаемой методики необходимо:

- оснастить БЛА бортовым комплексом в составе: аппаратура ГНСС/SBAS/GBAS, камера ИК/ТВ-диапазона, РЛС бокового обзора, комплекс связи с центром управления пожаротушением (ЦУП);
- доставить БЛА в район пожара;
- провести сканирование зоны пожара с использованием ИК/ТВ-камер и РЛС при полетах БЛА галсами в районе фронта пожара;
- передать геопривязанные данные сканирования в ЦУП;
- определить параметры (координаты) фронта пожара;
- выбрать оптимальную траекторию наведения самолета на фронт пожара;
- сгенерировать план полета пожарного самолета в горизонтальной и вертикальной плоскости с учетом обстановки (направление ветра, облачность, наличия естественных и искусственных препятствий и др.);
- передать план полета на борт пожарного самолета и загрузить его в бортовой вычислитель навигационно-пилотажного комплекса самолета;
- выполнить пожарным самолетом полет по заданному плану, сбросить огнегасящую жидкость или воду в заданной зоне фронта пожара и выполнить уход на заправку;
- повторить предыдущие пункты до завершения операции пожаротушения или по другим условиям.

Далее рассмотрим возможности реализации представленной методики при использовании существующих в настоящее время аппаратно-технических и программных средств.

## Тактико-технические характеристики бортового комплекса БЛА

Как отмечено выше, бортовой комплекс БЛА, используемого для повышения эффективности тушения лесных пожаров, должен включать аппаратуру

ГНСС/SBAS/GBAS, камеру ИК/ТВ-диапазона и РЛС бокового обзора.

Современное авиационное оборудование ГНСС обладает характеристиками, приведенными в таблице 1 [11].

Таблица 1. Погрешности ГНСС/SBAS/GBAS

Table 1. GNSS/SBAS/GBAS errors

Параметр	ГНСС	SBAS	GBAS
Погрешность горизонтальных координат, м	5,0...7,0	2,5...4,0	0,5...1,0
Погрешность вертикальных координат, м	10,0...8,0	5,0...7,0	1,0...1,5

Примечание: SBAS – функциональное дополнение ГНСС спутникового базирования; GBAS – функциональное дополнение ГНСС наземного базирования

В настоящее время практически всё бортовое оборудование ГНСС комплексируется с инерциальными модулями, данные от которых необходимы для системы автоматического управления БЛА. Поэтому в бортовом навигационно-пилотажном комплексе БЛА присутствует информация о его пространственной ориентации, то есть углах курса, крена и тангла. Современные инерциальные модули обеспечивают точность определения этих углов не более 1°.

Геоинформационные системы, использующие цифровые матрицы рельефа местности, формируемые на основе данных дистанционного зондирования земли, аэрофотоснимков, топографических карт крупного масштаба и схем, имеют точность геодезической привязки элементов не более 2...3 м в горизонтальной плоскости и не более 5...7 м – в вертикальной [12]. С такой же погрешностью в геоинформационных системах определяются и координаты искусственных препятствий, таких как линии электропередач, мачты, высотные объекты и др.

При использовании бортовой РЛС бокового обзора для определения координат сканируемых объектов требуется учитывать ошибки определения пространственного положения антенны РЛС, определяемые по данным ГНСС, а также ошибки измерения пространственной ориентации БЛА, зависящие от характеристик инерциальных модулей. При этом вектор полной погрешности определения координат объектов, представляющих опасность для полета ВС при пожаротушении (линии электропередач, высотные здания, трубы и др.) в общем случае можно описать следующим выражением:

$$\overrightarrow{\Delta r} = \overrightarrow{\Delta D}_{\text{ГНСС}} + A(\gamma, \varphi, \vartheta) [\overrightarrow{R} + \overrightarrow{\Delta R}], \quad (3)$$

где  $\overrightarrow{\Delta D}_{\text{ГНСС}}$  – вектор погрешности определения пространственного положения бортовой антенны РЛС в геоцентрической системе координат ECEF [13], определяемый типом используемого бортового оборудования ГНСС;  $A(\gamma, \varphi, \vartheta)$  – матрица преобразования вектора измерений РЛС  $\overrightarrow{R}$  из связанной с БЛА

системы координат в систему *ECEF*, формируемая на основе измерений углов ориентации БЛА в бортовом вычислительном устройстве на основе полученных от ИМ параметров крена  $\gamma$ , курса  $\phi$  и тангенса  $\vartheta$ ;  $\Delta\vec{R}$  – вектор погрешности измерений РЛС.

В связи с тем что выражение (3) нелинейное и его сложно использовать для анализа, выполним приблизительную оценку величины погрешности для вертикальной ( $\Delta\Gamma_v$ ) и горизонтальной ( $\Delta\Gamma_r$ ) составляющих вектора погрешности измерений РЛС бокового обзора  $\Delta\vec{r}$  на основе упрощенных геометрических соотношений. Положим, что ошибки определения углов ориентации по крену, курсу и тангенсу малы и одинаковы, и, принимая во внимание соотношение  $|\vec{R}| \gg |\Delta\vec{R}|$ , можно получить приближенные выражения:

$$\begin{aligned}\Delta\Gamma_r &\approx d_{\text{ГНСС}}^r + \sqrt{2}|\vec{R}|\delta; \\ \Delta\Gamma_v &\approx d_{\text{ГНСС}}^v + |\vec{R}|\delta,\end{aligned}\quad (4)$$

где  $d_{\text{ГНСС}}^r$ ,  $d_{\text{ГНСС}}^v$  – погрешности определения высоты и горизонтальных координат БЛА с использованием ГНСС;  $\delta$  – ошибка определения углов пространственной ориентации антенны РЛС бокового обзора.

Из выражения (4) видно, что при выполнении сканирования подстилающей поверхности с использованием РЛС бокового обзора погрешности определения координат искусственных препятствий и элементов рельефа, которые представляют опасность для выполнения полета ВС, растут практически линейно с расстоянием до них. Полет БЛА с РЛС бокового обзора при сканировании рельефа выполняется обычно на высотах не более 200 м, при этом ширина области сканирования также составит около 200 м. Тогда при погрешности определения углов ориентации  $\delta = 1,0^\circ$ , характерной для инерциальных модулей, и ошибках ГНСС, указанных в таблице 1, погрешности определения горизонтальных координат и высоты объектов на удалении около 300 м на основе измерений РЛС бокового обзора будут соответствовать приведенным в таблице 2.

Таблица 2. Погрешности измерений РЛС

Table 2. Errors in radar measurements

Параметр	ГНСС	SBAS	GBAS
Горизонтальная погрешность, $\Delta\Gamma_r$ , м	12,0...14,0	7,5...11,0	7,5...8,0
Вертикальная погрешность, $\Delta\Gamma_v$ , м	15,0...13,0	10,0...12,0	6,0...6,5
<i>Примечание:</i> указаны погрешности при использовании на БЛА приемоизмерителей ГНСС и соответствующих функциональных дополнений			

Если для тушения пожара используется самолет Ил-76ТД, то он способен за один заход покрыть огнегасящей жидкостью область шириной 50 м и дли-

ной 500 м [14]. Тогда параметры траектории движения самолета над этой областью (фронтом пожара) необходимо определять с погрешностью, не превышающей половины ее ширины, то есть не хуже 25 м.

Таким образом, учитывая приведенные в таблице 2 данные, можно утверждать, что использование РЛС бокового обзора позволяет с достаточной точностью определять координаты точек плана полета для наведения самолета на фронт пожара. При этом координаты опасных объектов, которые отсутствуют в базе данных ГИС, также могут быть уточнены, или будут введены новые объекты, влияющие на безопасность полета.

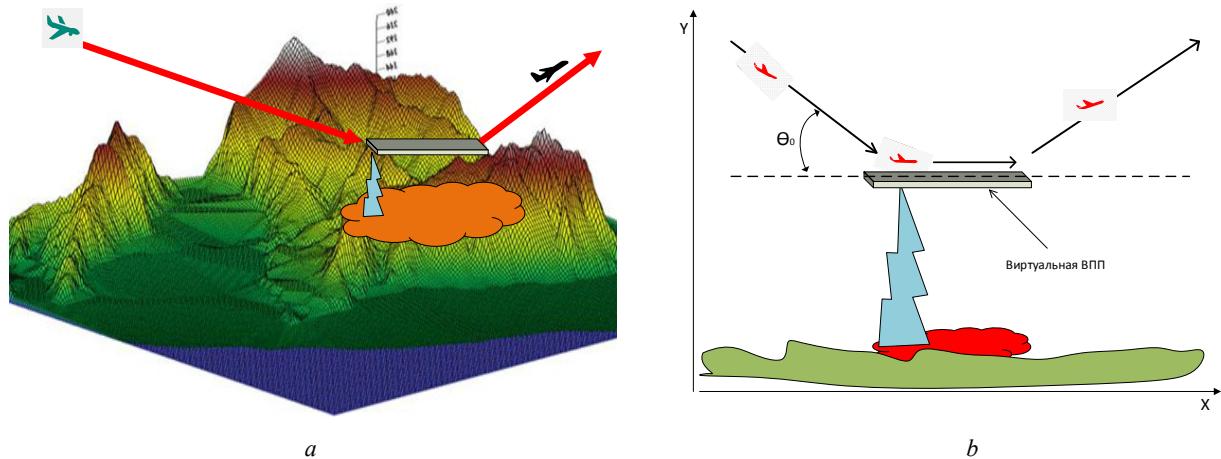
### Формирование плана полета

#### для наведения самолета на фронт пожара

После завершения сканирования местности в районе фронта пожара и получения радиолокационной карты местности осуществляется ее анализ на предмет совпадения с ЦМР из состава ГИС и выявление искусственных препятствий (линий электропередач, сооружений и др.), отсутствующих в ГИС. Затем формируется план полета пожарного ВС, включающий стандартные для авиации процедуры: полет по промежуточным пунктам маршрута, выход на схему прибытия, выполнение захода на посадку, полет по глиссаде, уход на второй круг, выход на схему вылета [15]. При этом все элементы маршрута строятся с учетом безопасного пролета над элементами подстилающей поверхности и искусственными препятствиями. Отличием от обычной посадки на аэродром в данном случае будет только то, что самолет будет наводиться на виртуальную ВПП, расположенную на высоте 30...50 м над фронтом пожара. Для пилота пожарного самолета использование такой схемы является штатным процессом, привычным для пилотирования и обеспечивает наивысшую точность полета по траектории, достигаемую при посадке на штатную ВПП, ширина которой обычно составляет около 40 м, а длина – около 2000 м.

На рисунке 3, *a* приведена иллюстрация траектории для наведения самолета на виртуальную ВПП, расположенную над фронтом пожара, сформированная с использованием программного комплекса ГИС для работы с ЦМР. Сброс пожарогасящей жидкости и уход за следующей порцией осуществляется с использованием стандартной процедуры «ухода на второй круг». На рисунке 3, *b* приведена иллюстрация схемы (в вертикальной плоскости) захода самолета на фронт пожара, гармонизированная со стандартными процедурами, выполняемыми самолетом при заходе на посадку.

Основное назначение РЛС БЛА при взаимодействии с ГИС заключается в определении опасных элементов в районе подлета и отлета от места забора воды и включении их в описание подстилающей поверхности при планировании безопасных траекторий полета.



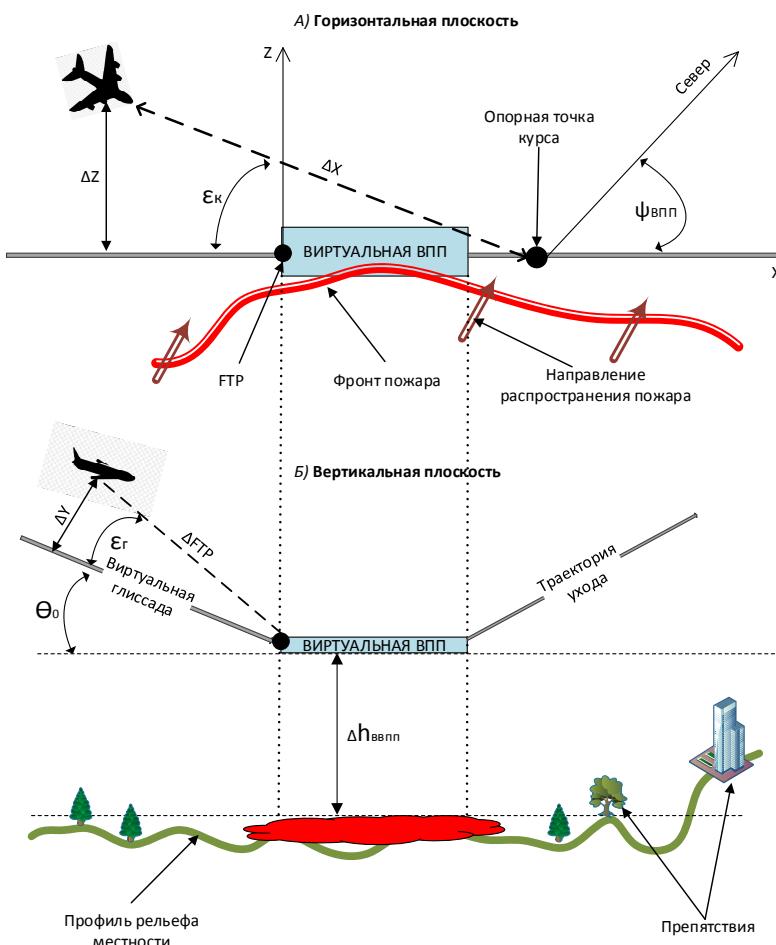
*Рис. 3. Траектория наведения самолета на виртуальную ВПП, расположенную над фронтом пожара:*  
*a – трехмерная проекция траектории полета самолета на фоне ЦМР; b – вертикальная проекция траектории полета самолета*

*Fig. 3. The trajectory of the aircraft pointing at a virtual runway located above the fire front:*  
*a - three-dimensional projection of the aircraft's flight path against the background of the DEM; b - vertical projection of the aircraft's flight path*

#### Расчет параметров наведения на виртуальную ВПП

При выполнении операции пожаротушения с использованием метода захода на виртуальную ВПП выполняются расчеты, подобные тем, которые используются при заходе ВС на посадку на обычные

аэродромы [16, 17], оборудованные локальными контрольно-корректирующими станциями. Разница заключается только в том, что точка фиктивного порога (*FTR*) располагается в начале виртуальной ВПП на высоте  $\Delta h_{\text{впп}} = 40...50$  м над фронтом пожара (рис. 4).



*Рис. 4. Иллюстрация горизонтальной и вертикальной проекций виртуальной глиссады и взлетно-посадочной полосы*

*Fig. 4. Illustration of horizontal and vertical projections of a virtual glide path and runway*

Тогда если в результате анализа данных ГИС, дополненных результатами анализа района пожара с использованием РЛС бокового обзора, определен безопасный курс виртуальной ВПП ( $\psi_{\text{ВВПП}}$ ) и координаты точки  $FTP$  [18] (широта  $B_{FTP}$ , долгота  $L_{FTP}$ , высота  $H_{FTP}$ ), то расчет параметров наведения ВС при движении по виртуальной глиссаде для выхода на виртуальную ВПП и максимально точного слива пожаротушащей жидкости на фронт пожара выполняется следующим образом.

Сначала осуществляется преобразование геодезических координат самолета ( $B_C, L_C, H_C$ ) и точки  $FTP$  ( $B_{FTP}, L_{FTP}, H_{FTP}$ ) в прямоугольную систему координат с центром в центре Земли и связанную с Землей, традиционно обозначаемую как  $ECEF$ , в соответствии с выражением

$$\begin{cases} x_k = (N + H_k) \cos B_k \cos L_k, \\ y_k = (N + H_k) \cos B_k \sin L_k, \\ z_k = [(1 - e^2) N + H_k] \sin B_k, \end{cases} \quad (5)$$

где  $N$  – радиус кривизны первого вертикала;  $e$  – эксцентриситет эллипсоида; индекс  $k$  принимает значение  $C$ , если преобразования осуществляются для координат самолета или  $FTP$ , если преобразования осуществляются для координат точки фиктивного порога  $FTP$ .

Затем вводится местная прямоугольная система координат с центром в точке  $FTP$  и осью  $OX$ , направленной вдоль оси виртуальной ВПП, вертикальной осью  $OY$  и осью  $OZ$ , дополняющей систему до правой, и вычисляется вектор координат самолета  $\vec{x}_c^{OXYZ}$  в местной прямоугольной системе координат  $OXYZ$  путем преобразования из системы  $ECEF$  при заданном курсе виртуальной ВПП  $\psi_{\text{ВВПП}}$  в соответствии с известным векторным уравнением [19]

$$\vec{x}_c^{OXYZ} = \mathbf{C}_c(\psi_{\text{ВВПП}}, B_{FTP}, L_{FTP}) \vec{x}_c^{ECEF} + \vec{A}, \quad (6)$$

где матрица  $\mathbf{C}_c(\psi_{\text{ВВПП}}, B_{FTP}, L_{FTP})$  определяется направляющими косинусами, характеризующими относительное направление координатных осей систем  $ECEF$  и  $OXYZ$ ; вектор  $\vec{x}_c^{ECEF} = [x_c, y_c, z_c]^T$  определен в соответствии с (3) в системе координат  $ECEF$ ; радиус-вектор  $\vec{A}$  направлен из центра Земли к точке  $FTP$ .

Далее осуществляется расчет отклонений самолета от заданного курса ( $\varepsilon_K$ ) и глиссады ( $\varepsilon_\Gamma$ ) в соответствии с выражениями

$$\begin{cases} \varepsilon_K = \arcsin \frac{\Delta Z}{\Delta X}, \\ \varepsilon_\Gamma = \arcsin \frac{\Delta Y}{\Delta FTP}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\Delta Z$  – отклонение самолета от плоскости заданного курса;  $\Delta Y$  – отклонение самолета от плоскости глиссады, проходящей под заданным (безопасным) углом  $\theta_0$  к плоскости местного горизонта (см. рис. 4);  $\Delta X$  – расстояние от самолета до опорной точки курса, лежащей на оси  $OX$  и выбираемой исходя из чувствительности бортового индикатора;  $\Delta FTP$  – расстояние от самолета до точки  $FTP$ .

Вычисленные значения  $\varepsilon_K$  и  $\varepsilon_\Gamma$  отображаются на штатных бортовых командно-пилотажных индикаторах (КПИ) самолета в виде планок положения плоскости курса и глиссады относительно текущего положения самолета, как показано на рисунке 5, и используются пилотом для наведения самолета на заданную, в данном случае виртуальную, глиссаду точно так же, как при выполнении захода на посадку на аэродром, оборудованный специализированными инструментальными системами посадки типа *ILS* или *LKKC/GBAS* [20].

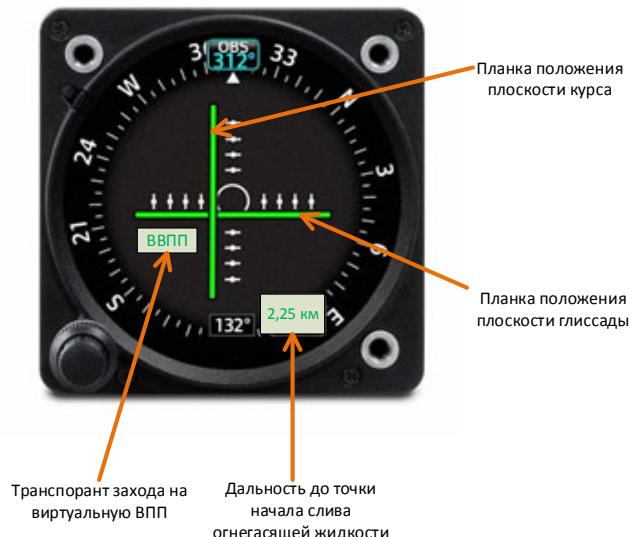


Рис. 5. Вид командно-пилотажного индикатора при наведении самолета на виртуальную глиссаду

Fig. 5. View of the command and flight indicator when pointing the aircraft at a virtual glide path

На приведенном на рисунке 5 приборе КПИ показано, что самолёт находится в центре окружности и для выхода на заданный курс (в данном случае  $312^\circ$ ) необходимо лететь влево, а для выхода на заданную глиссаду – ниже. При этом в окне справа внизу отображается оставшаяся дальность до точки *FTP* (2,25 км), в которой необходимо перейти в горизонтальный полет и начать слив огнегасящей жидкости.

Учитывая приведенные в таблице 2 данные, можно утверждать, что с использованием рассмотренного выше метода наведение самолета на виртуальную ВПП для тушения пожара может осуществляться с точностными характеристиками, соответствующими инструментальным системам посадки I категории ИКАО, если используется ГНСС без каких-либо функциональных дополнений, или даже по II-III категориям ИКАО, если ГНСС будет использоваться с функциональными дополнениями *SBAS* или *GBAS*.

Используя данные, приведенные в таблице 2, оценим вероятности  $P_1$  и  $P_2$  перекрытия ширины фронта пожара полосой слива огнегасящей жидкости с самолета типа Ил 76ТД.

Предположим, что для самолетовождения используются данные ГНСС, и полёт выполняется в условиях, удовлетворяющих требованиям к навигации воздушных судов *RNP 0.3*, которые применяются при полетах в районе аэродрома и являются достаточно жесткими в части выдерживания заданной траектории. Цифра 0.3 в данном обозначении означает, что самолет при выполнении полета по заданной траектории отклоняется от требуемых координат в поперечной плоскости не более чем на 550 м. Тогда при ширине слива огнегасящей жидкости около 50 м и равновероятном положении самолета в заданном диапазоне отклонений вероятность слива огнегасящей жидкости на фронт пожара составит  $P_2 = 50/550 \approx 0,09$ . В то же время при использовании предлагаемой новой методики наведения самолета на фронт пожара, с учетом приведенных в таблице 2 данных о погрешностях измерений РЛС, вероятность слива огнегасящей жидкости на фронт пожара составит  $P_1 \approx 1,0$ .

Таким образом, эффективность  $E$  разработанной методики пожаротушения, в соответствии с выбранным критерием, может быть оценена как  $E = P_1 / P_2 \approx 1,0/0,09 \approx 11$ , то есть возрастет в 11 раз. Следует заметить, что при использовании ВС с меньшей шириной полосы слива эффективность пожаротушения при использовании предлагаемой методики будет еще выше.

Обеспечение безопасности полета при пожаротушении является важнейшей задачей, так как полет в этом случае осуществляется на крайне малой высоте. Использование радиовысотомеров, способных с высокой точностью определять высоту при полете над лесом, практически невозможно, особенно при сложном характере рельефа. Поэтому использование разработанной методики, позволяющей определять минимально безопасную высоту полета с погрешностью, указанной в таблице 2, позволяет гарантированно удерживать требуемую высоту. Если выпол-

нять пожаротушение с использованием применяемых в настоящее время методик, то основным средством контроля высоты полета будет являться барометрический высотомер, погрешность измерений которого достигает 30 м, а при полете над очагом пожара в восходящих воздушных потоках еще больше. Таким образом, повышение безопасности пожаротушения  $S$  при использовании разработанной методики, с учетом данных таблицы 2, может составить примерно от 2 до 5 раз в соответствии с выбранным критерием в зависимости от используемых функциональных дополнений ГНСС.

Предложенная в настоящей работе методика использования БЛА с РЛС бокового обзора и ГИС имеет широкую сферу применения, в том числе при решении следующих задач:

- помочь людям, оказавшимся в зоне бедствия или катастрофы, путем доставки средств спасения к месту их нахождения;
- обеспечение безопасной посадки малой авиации в условиях ограниченной видимости или в сложных метеоусловиях.

### Выводы

В работе приведена методика применения беспилотных БЛА, оборудованных РЛС бокового обзора, при совместном использовании с геоинформационными системами для формирования плана полета пожарных самолетов при тушении лесных пожаров и предотвращения катастроф исправных самолетов авиации МЧС России в результате их столкновения с землей и искусственными препятствиями.

Разработана методика применения данных сканирования местности с использованием РЛС бокового обзора, установленной на беспилотном летательном аппарате. Применение предлагаемой методики может обеспечить повышение эффективности пожаротушения в 10 и более раз. При этом более чем в 2 раза повышается безопасность полетов при тушении лесных пожаров.

Разработана методика оценка погрешности определения координат искусственных препятствий и элементов рельефа местности в районе лесного пожара с использованием РЛС бокового обзора, установленной на беспилотном летательном аппарате.

Показано, что современное состояние развития техники РЛС бокового обзора, геоинформационных систем и пилотажно-навигационных комплексов бортового радиоэлектронного оборудования воздушных судов МЧС России способно обеспечить быстрое практическое внедрение разработанной методики.

### Библиографические ссылки

1. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году: информационно-аналитический сборник. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. 110 с.
2. Применение беспилотных летательных аппаратов для поддержки управления противопожарными действиями в условиях чрезвычайных ситуаций / С. И. Мартемьянов, О. С. Маторина, О. В. Стрельцов [и др.] // Междуна-

- родный научно-исследовательский журнал. 2024. № 1 (139). С. 112–120. DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.5
3. Оценка состояния средств тушения лесных пожаров и экономической эффективности их применения / Н. А. Коршунов, А. А. Мартынюк, В. А. Савченкова, М. С. Калинин // Лесохозяйственная информация: электронный сетевой журнал. 2019. № 1. С. 77–88.
4. Скуднева О. В., Коптев С. В., Иванцов С. В. Навигационно-пилотажная система беспилотного летательного аппарата для мониторинга лесных пожаров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 6 (378). С. 194–203.
5. Особенности тушения лесных пожаров с применением авиации / Н. П. Копылов, В. Н. Карпов, А. Е. Кузнецов, Д. В. Федоткин, И. Р. Хасанов, Е. Ю. Сушкина // Вестник томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 59. С. 79–86.
6. Организация эксплуатации воздушного пространства: монография. А. Р. Бестужин, И. А. Киршина, А. Д. Филин, В. П. Рачков. М. : ИНФРА-М, Научная мысль, 2020. 344 с.
7. Саута О. И., Виноградова Е. П. Цифровая модель бортового радиовысотомера для комплексной корреляционно-экстремальной навигационной системы // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : материалы XXVI Международной научной конференции. В 3 ч. Санкт-Петербург, 29 мая – 02 июня 2023 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. Ч. 2. С. 339–349.
8. Baburov S.V., Bestugin A.R., Galyamov A.M., Sauta O.I., Shatrakov Yu.G. (2019) Development of Navigation Technology for Flight Safety. Springer Aerospace Technology, Singapore, 2019, 248 p.
9. Способ проактивной компенсации мешающих отражений при радиолокационном наблюдении малоразмерных объектов на фоне подстилающей поверхности / А. Р. Бестугин, И. А. Киршина, В. Н. Коврегин, Е. А. Антохин, О. И. Саута // Наукоменные технологии в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15, № 2. С. 4–9. DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-2-4-9
10. Алгоритм директорного управления самолетом в режиме посадки / В. В. Лукьянов [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. № 11 (107). С. 6–20. DOI: 10.18698/2308-6033-2020-11-2032
11. Современное развитие ГНСС ГЛОНАСС и GPS / Е. Н. Гарин, В. А. Копылов, В. Н. Ратушняк, И. В. Лютиков // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2018. Т. 11, № 3. С. 313–317.
12. Методы взаимной высокоточной навигации, основанные на использовании относительных режимов работы угломерных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / Д. Д. Дмитриев, А. Б. Гладышев, В. Н. Тяпкин, Н. С. Кремез, Ю. Л. Фатеев // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6, № 2 (40). С. 123–132.
13. Барановский А. М., Мусиенко А. С. Динамические диагностические модели и метод обеспечения устойчивости контроля технического состояния бортовых систем управления летательных аппаратов // Труды МАИ. 2024. № 139. С. 1–31.
14. Середа Э. А., Аксенов С. Г. Применение беспилотных авиационных систем при тушении лесных пожаров // Экономика строительства. 2023. № 8. С. 34–37.
15. Крымский В. В., Головенко В. Р. Особенности управления при тушении воздушных судов пожарными подразделениями // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3 (47). С. 115–124.
16. Система информационного обеспечения и управления полётами воздушных судов при мониторинге чрезвычайных ситуаций и пожаров / А. Н. Коротоношко, Н. Г. Топольский, В. В. Симаков, А. В. Мокшанцев // Технологии техносферной безопасности. 2020. Вып. 1 (87). С. 51–66. DOI: 10.25257/TTS.2020.1.87.51-66
17. Брюханов А. В., Коршунов Н. А. Авиационное тушение природных пожаров: история, современное состояние, проблемы и перспективы // Сибирский лесной журнал. 2017. № 5. С. 37–54.
18. Крымский В. В., Головенко В. Р. Особенности управления при тушении воздушных судов пожарными подразделениями // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3 (47). С. 115–124.
19. Шон Ч. Т., Кузин А. А. Алгоритм преобразования координат из геоцентрической системы в топоцентрическую и его применение при строительстве во Вьетнаме // Вестник СГУГИТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2019. Т. 24, № 1. С. 59–71.
20. Обзор и сравнительный анализ систем посадки летательных аппаратов / Ж. А. Хуррамов, Г. Ш. Туганов, Ш. М. Исломов, А. Р. Зияев, А. С. Мардиев // Universum: технические науки. 2025. Т. 2, № 3 (132). С. 24–30.

### References

1. *Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2023 godu: informacionno-analiticheskij sbornik* [Fires and fire safety in 2023: inform]. Balashikha: FSBI VNIIPo EMERCOM of Russia, 2024, 110 p. (in Russ.).
2. Martemyanov S.I., Matrina O.S., Streltsov O.V. (2024) [The use of unmanned aerial vehicles to support fire management in emergency situations]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, no. 1, pp. 112-120. DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.5 (in Russ.).
3. Korshunov N.A., Martynuk A.A., Savchenkova V.A., Kalinin M.S. (2019) [Assessment of the state of forest fire extinguishing agents and the economic effectiveness of their use]. *Lesohozajstvennaya informaciya: elektronnyj setevoy zhurnal*, no. 1, pp. 77-88 (in Russ.).
4. Skudneva O.V., Koptev S.V., Ivantsov S.V. (2020) [Navigation and piloting system of an unmanned aerial vehicle for monitoring forest fires]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*, no. 6, pp. 194-203 (in Russ.).
5. Kopylov N.P., Karpov V.N., Kuznetsov A.E., Fedotkin D.V., Khasanov I.R., Sushkina E.Yu. (2019) [Features of extinguishing forest fires using aviation]. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mehanika*, no. 59, pp. 79-86 (in Russ.).
6. Bestugin A.R., Kirshina I.A., Filin A.D., Rachkov V.P. (2020) *Organizaciya ekspluatacii vozduzhnogo prostranstva* [Organization of airspace exploitation]. Moscow: INFRA-M, Nauchnaya mys' Publ., 344 p. (in Russ.).
7. Sauta O.I., Vinogradova E.P. (2023) *Cifrovaya model' bortovogo radiovysotomera dlya kompleksnoj korrelyacionno-ekstremal'noj navigacionnoj sistemy* [Digital model of an onboard radio altimeter for an integrated correlation-extreme navigation system]. Wave electronics and infocommunication systems: Proceedings of the XXVI International scientific conference. In 3 parts. St. Petersburg, May 29 - June 2, 2023. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publishing House, part 2, pp. 339-349 (in Russ.).
8. Baburov S.V., Bestugin A.R., Galyamov A.M., Sauta O.I., Shatrakov Yu.G. (2019) Development of Navigation Technology for Flight Safety. Springer Aerospace Technology, Singapore, 2019, 248 p.
9. Bestugin A.R., Kirshina I.A., Kovregin V.N., Antokhin E.A., Sauta O.I. (2023) [A method for proactive compen-

- sation of interfering reflections during radar observation of small-sized objects against the background of the underlying surface]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli*, vol. 15, no. 2, pp. 4-9. DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-2-4-9 (in Russ.).
10. Lukyanov V.V. (2020) [The algorithm of director control of an aircraft in landing mode]. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii*, no. 11, pp. 6-20. DOI: 10.18698/2308-6033-2020-11-2032 (in Russ.).
11. Garin E.N., Kopylov V.A., Ratushnyak V.N., Lyutikov I.V. (2018) [Modern development of GNSS GLONASS and GPS]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, vol. 11, no. 3, pp. 313-317 (in Russ.).
12. Dmitriev D.D., Gladyshev A.B., Tyapkin V.N., Kremer N.S., Fateev Yu.L. (2022) [According to J. and others. Methods of mutual high-precision navigation based on the use of relative operating modes of angle-measuring receivers of signals from global navigation satellite systems]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*, vol. 6, no. 2, pp. 123-132 (in Russ.).
13. Baranovsky A.M., Musienko A.S. (2024) [Dynamic diagnostic models and methods for ensuring the stability of control of the technical condition of on-board control systems of aircraft]. *Trudy MAI*, no. 139, pp. 1-31 (in Russ.).
14. Sereda E.A., Aksenov S.G. (2023) [The use of unmanned aircraft systems in extinguishing forest fires]. *Ekonomika stroitel'stva*, no. 8, pp. 34-37 (in Russ.).
15. Krymsky V.V., Golovenko V.R. (2023) [Features of control during the extinguishing of aircraft by fire departments]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*, no. 3, pp. 115-124 (in Russ.).
16. Korotonoshko A.N., Topolsky N.G., Simakov V.V., Mokshantsev A.V. (2020) [Information support and flight control system for aircraft monitoring emergencies and fires]. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*, Iss. 1, pp. 51-66. DOI: 10.25257/TTS.2020.1.87.51-66 (in Russ.).
17. Bryukhanova A.V. Korshunov N.A. (2017) [Aviation extinguishing of wildfires: history, current state, problems and prospects]. *Siberian Forest Magazine*, no. 5, pp. 37-54 (in Russ.).
18. Krymsky V.V., Golovenko V.R. (2023) [Features of control when extinguishing aircraft by fire departments]. *Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*, no. 3, pp. 115-124 (in Russ.).
19. Shot Ch.T., Kuzin A.A. (2019) [An algorithm for converting coordinates from a geocentric system to a topocentric one and its application in construction in Vietnam]. *Bulletin of the SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, vol. 24, no. 1, pp. 59-71 (in Russ.).
20. Khurramov Zh.A., Tuganov G.Sh., Islomov Sh.M., Ziyaev A.R., Mardiev A.S. (2025) [Review and comparative analysis of aircraft landing systems]. *Universum: tekhnicheskie nauki*, vol. 2, no. 3, pp. 24-30 (in Russian).

## Application of Side-Looking Radars to Increase the Effectiveness of Forest Fires Extinguishing Using Aviation Systems

S.A. Nenashev, Post-graduate, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia  
 O.I. Sauta, DSc in Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia  
 A.R. Bestugin, DSc in Engineering, Professor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia  
 V.A. Nenashev, PhD in Engineering, Associate Professor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

*The paper presents a methodology for implementing an integrated system for area forest fire extinguishing using unmanned aerial vehicles (UAVs). The main attention is paid to the development of aviation vision technologies that combine the use of modern radar stations that form frames, video cameras of the visible and infrared ranges, high-precision navigation systems of the global navigation satellite system (GNSS) and geographic information systems (GIS). The proposed technique provides rapid scanning of the fire area, obtaining geo-linked data on terrain features, identifying dangerous obstacles and accurately mapping the fire front. Based on the integration of radar and optical information, an optimal flight plan for a firefighting aircraft is formed along a virtual runway located at an altitude of 30-50 m above the fire front, taking into account wind parameters, clouds and the presence of artificial obstacles. Trajectory parameters are calculated in the same way as it is done for instrument approach schemes, which makes it possible to ensure the accuracy of extinguishing liquid discharge with an error of up to several meters and increase flight safety in complicated conditions. The technique provides for cyclic data updating by means of UAVs and prompt transmission of adjusted routes to the on-board computer of the navigation and aerobatic complex. A detailed analysis of the accuracy characteristics of modern GNSS, inertial modules and digital terrain matrices has been carried out, as well as an assessment of the errors in determining the coordinates of objects at a distance of up to 300 m. It is shown that the developed methodology makes it possible to balance the limitations of existing databases and quickly introduce new elements of obstacles into the route model. The practical implementation of the proposed methodology helps to increase the efficiency of forest fire extinguishing, reduce response time and reduce the risks of aviation incidents when performing emergency response tasks.*

**Keywords:** radar system, unmanned aerial vehicle, terrain, geoinformation technologies, fire extinguishing.

Получено 26.08.2025

### Образец цитирования

Применение радиолокационных станций бокового обзора для повышения эффективности тушения лесных пожаров с использованием авиационных систем / С. А. Ненашев, О. И. Саута, А. Р. Бестужин, В. А. Ненашев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 4. С. 73–82. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-73-82

### For Citation

Nenashev S.A., Sauta O.I., Bestugin A.R., Nenashev V.A. (2025) [Application of Side-Looking Radars to Increase the Effectiveness of Forest Fires Extinguishing Using Aviation Systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 4, pp. 73-82. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-73-82 (in Russ.).