

Научная статья  
УДК 004.932  
DOI: 10.34759/vst-2022-3-209-221

## ОПТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОСАДОЧНЫХ ЗОН ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА С ПОМОЩЬЮ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ КОХОНЕНА

Даниил Сергеевич Альханов<sup>1</sup>, Владимир Алексеевич Кузурман<sup>2</sup>, Александр Андреевич Гоголев<sup>3</sup> ✉

<sup>1,2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС),  
Москва, Россия

<sup>1</sup>daniil.alhanov@yandex.ru

<sup>2</sup>kuzurmanva@student.bmstu.ru

<sup>3</sup>kirbizz8@yandex.ru ✉

**Аннотация.** При широком применении беспилотных воздушных судов вертолетного типа неизбежно возникает ряд сложностей, наиболее серьезная из них — проблема безаварийной посадки на неподготовленную посадочную площадку в автоматическом режиме, успешное выполнение которой позволит существенно повысить уровень безопасности эксплуатации аппарата. Предлагается несколько основных способов частичного решения данной задачи, однако в полном объеме проблема посадки на неподготовленную площадку не разрешена. Исследуемая задача усложняется ввиду наличия высоты невозврата у воздушного судна вертолетного типа, при прохождении которой в ходе снижения аппарат не сможет осуществить безопасный набор высоты. Хотя процедуры захода на посадку и построения траектории решаются современными системами автоматического управления полетом, критической остается проблема выбора места посадки, особенно если оно не было проинспектировано заранее в случае расположения в труднодоступной местности или в ходе аварийной ситуации. Ввиду малых габаритных размеров исследуемого в данной работе аппарата, особый интерес представляет мезо- и микрорельеф подстилающей поверхности. Поиск перспективных вариантов посадочных площадок, их дальнейший анализ и определение оптимального варианта дополнительно усложняются отсутствием стандартизированных требований к посадочной зоне для исследуемого класса беспилотных воздушных судов.

В статье предложены основные требования к оптимальному варианту посадочной площадки для беспилотного воздушного судна вертолетного типа. Произведен обзор существующих методов определения качества подстилающей поверхности. Предложен метод оптического распознавания перспективных посадочных зон с применением самоорганизующихся карт Кохонена.

**Ключевые слова:** беспилотное воздушное судно, автоматизация посадочных процедур, анализ подстилающей поверхности, самоорганизующиеся карты Кохонена

**Для цитирования:** Альханов Д.С., Кузурман В.А., Гоголев А.А. Оптическое детектирование перспективных посадочных зон для беспилотного воздушного судна вертолетного типа с помощью самоорганизующихся карт Кохонена // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 209-221. DOI: 10.34759/vst-2022-3-209-221

Original article

## OPTICAL DETECTION OF PROMISING LANDING SITES FOR HELICOPTER-TYPE UNMANNED AERIAL VEHICLE USING KOHONEN SELF-ORGANIZING MAPS

Daniil S. Al'khanov<sup>1</sup>, Vladimir A. Kuzurman<sup>2</sup>, Aleksandr A. Gogolev<sup>3</sup> ✉<sup>1,2</sup>Bauman Moscow State Technical University (BMSTU),  
Moscow, Russia<sup>3</sup>State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS),  
Moscow, Russia<sup>1</sup>daniil.alhanov@yandex.ru<sup>2</sup>kuzurmanva@student.bmstu.ru<sup>3</sup>kirbizz8@yandex.ru ✉

### Abstract

The subject of the article being presented is a helicopter-type unmanned aerial vehicle (UAV) with a coaxial rotors design. The research issue is landing procedures automation on a site unprepared with respect to engineering. The purpose of the work consists in developing a set of basic requirements for an air-defined landing site based on current aviation standards, as well as implementing neural network classifier of the underlying surface. The authors considered the existing methods of landing performing for the UAV. As the result of the analysis, the method of autonomy enhancing by implementation of information systems and sensors of various operation principles was defined as the most promising. With account for acting Federal Aviation Regulations (FAR), as well as norms adopted by the International Civil Aviation Organization (ICAO) and European Aviation Safety Agency (EASA), the list of requirements for the prospective landing zone characteristics, accounting for the specifics of the UAV studied in the work, was developed. The main complexity here consists in the lack of the standardized regulations of performing landing procedures for the UAVs of this weight class of 325 kilos. The review of the conventional methods for the underlying surface quality determining was conducted. By reason of small overall sizes of the aerial vehicle being studied, meso- and micro-relief of the terrain are of special interest. The authors decided to split the algorithm for appropriate landing site determining into the two logical stages. Optical survey of the terrain and determination of several optimal prospective landing zones based on color semantics, characteristic structure patterns, presence of obstacles and proximity of the terrain regions transition are being executed at the first stage. Next, the descent to the most optimal site to the altitude exceeding the critical decision point is being performed, and relief scanning by the compensated laser-radar system is being executed to obtain the relief model and determine the soil characteristics. Both technique and software development was being performed in the course of this work for the first stage of the underlying surface primary inspection. The main problem of the video fixation cameras application onboard of aerial vehicles consists in strong dependence of the obtained data processing results on the environment state. Variability of both weather conditions and Earth surface lighting conditions may exert drastic parasitic effect the result of the algorithm execution. Various methods of preliminary image processing, such as contrast ratio improving, segmentation and noise filtering, allow partially solving this problem. However, the greatest invariance to the shooting conditions can be achieved using neural network methods for image analysis. The authors proposed an optical recognition method of the prospective landing zones employing self-organizing Kohonen maps. The neural networks of this kind advantage is the simplicity of the training sample preparing, as well as simplicity of the synoptic weights distribution process in the course of the casual observer training. The selected approach allows evaluating not only the color specters distribution on the image, bug tracking characteristic patterns of the texture as well. The training sample contained 2700 fragments of the terrain topographic snapshots, and the neural network training time was 10,000 epochs. Computer tests revealed 21% of the alpha errors and 0% of the beta errors, which is specific for the neural networks of this class as well. The results obtained in the course of this work are simultaneously

indicative of this approach exploitability to the underlying surface clustering and the need for further research on the considered issue.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, landing procedures automation, underlying surface analysis, Kohonen self-organising maps

**For citation:** Al'khanov D.S., Kuzurman V.A., Gogolev A.A. Optical Detection of Promising Landing Sites for the Helicopter-Type Unmanned Aerial Vehicle by the Kohonen Self-Organizing Maps. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 209-221. DOI: 10.34759/vst-2022-3-209-221

## Введение

Широкое применение беспилотных летательных аппаратов связано с целым рядом проблем, среди которых наиболее серьезной является осуществление безаварийной посадки на неподготовленную посадочную площадку в автоматическом режиме. Успешное решение этой проблемы немалого повысит уровень безопасности эксплуатации воздушного судна [1–3].

Предлагается несколько основных способов частичного решения данной задачи [4–6]:

- посадка под руководством оператора при наличии управляющего радиоканала;
- посадка с использованием пассивных методов – с применением парашютов, устройств захвата и т.п.;
- использование ультразвуковых, лазерных, радиолокационных или оптических средств анализа подстилающей поверхности.

*Посадка при помощи управляющего радиоканала* требует от оператора высокой квалификации, концентрации внимания на выполнении посадочных процедур ввиду сложности выдерживания требуемых режимов полета и невозможности непосредственной оценки поведения воздушного судна (ВС) из-за удаленного управления [7, 8]. Визуального контроля за аппаратом в этой ситуации недостаточно по причине возрастающего риска ошибок пилотирования, связанных с особенностями человеческого восприятия [9, 10]. В связи с этим человеко-машинный интерфейс рабочего места оператора должен предоставлять удаленному пилоту дополнительные инструменты для оценки окружающей обстановки с целью успешного и безопасного выполнения поставленной задачи. Следствием становятся многократно возрастающие потоки данных и увеличение объема бортовой информации, подлежащей пе-

редаче на наземный комплекс управления [11, 12]. Требования к качеству радиосвязи и ее устойчивости к внешним воздействиям становятся особенно важными ввиду того, что временные задержки в 0.25–0.3 с на отклик по каналу управления приводят к полной невозможности управления беспилотным воздушным судном [13, 14]. Возможными решениями проблемы растущих требований к пропускной способности и скорости передачи являются перспективное совершенствование алгоритмов сжатия и повышение автономности беспилотных систем, что отражено в работе [15].

*Посадка с применением пассивных методов*, изучаемая, например, в работах [16–21], также не лишена недостатков. В первую очередь, такая методика предполагает наличие дополнительных устройств, обеспечивающих возможность неактивной посадки. Размещение подобных устройств на конструктивных элементах фюзеляжа или непосредственно внутри фюзеляжной части приводит к увеличению эксплуатационной массы пустого оборудованного ВС. Кроме того, в конструкции аппарата необходимо в этом случае предусмотреть дополнительные модули системы развертывания установленных пассивных средств, позволяющих избежать ухудшения аэродинамических характеристик ВС на крейсерских режимах полета. Немаловажным фактором является увеличение в этом случае времени послеполетного осмотра и сервисного обслуживания. Методика осуществления посадки такого типа подразумевает выдерживание диапазона скоростей, высот, углов ориентации аппарата, а также соблюдения прочих требований. Совершенствование алгоритмов автоматического управления беспилотным ВС позволит рассматривать выполнение

посадки с применением пассивных методов в качестве крайней меры в аварийных ситуациях.

В работах [22—29] исследуется применение ультразвуковых, лазерных, радиолокационных или оптических средств анализа подстилающей поверхности, являющихся одним из наиболее перспективных направлений по автоматизации выполнения посадочных процедур в беспилотной авиации. Основная сложность заключается в непостоянстве условий окружающей среды, а также в подверженности сенсорных систем внешним воздействиям и помехам. Многие задачи успешно решаются благодаря применению комплексов информационных устройств различной природы действия, что позволяет повысить надежность и безопасность беспилотной системы, однако приводит к значительному удорожанию итогового продукта.

Таким образом, в настоящее время в России и в мире активно исследуются различные методы выполнения автоматической посадки. Предлагается несколько основных способов частичного решения задачи посадки воздушного судна вертолетного типа в автоматическом режиме на неподготовленную площадку, однако в полном объеме проблема не решена и требует дальнейших научных исследований в этой области.

### Формирование требований к перспективной посадочной площадке

Хотя задача захода на посадку и построения траектории довольно успешно решается современными системами управления полетом, однако критической остается проблема выбора посадочной площадки, особенно в тех случаях, когда предполагаемое место находится в труднодоступной местности и/или не было проинспектировано заранее, а также в ходе нештатных и аварийных ситуаций.

Объектом данного исследования является беспилотное воздушное судно вертолетного типа соосной конструкции, основные исходные данные которого представлены в таблице.

Ввиду малых габаритных размеров исследуемого беспилотного ВС вертолетного типа особый интерес представляет мезо- и микрорельеф подстилающей поверхности. Невозможность определения микрорельефа с высоты, превышающей дальность применения сенсорных систем, приводит к необходимости выполнения первичного анализа видимого сектора по косвенным признакам. Дальнейшее более подробное изучение осо-

### Исходные данные объекта исследования

Параметр	Значение
Масса аппарата, кг	325
Максимальная взлетная масса, кг	355
Мощность силовой установки, л. с.	75
Диаметр несущего винта, м	3.81
Угол заклинения несущего винта, град	4
Основной аэродинамический профиль	NACA 23012

бенностей рельефа должно выполняться на высотах, близких к критической высоте принятия решения, являющейся следствием ограниченной скороподъемности аппарата. При прерывании выполнения посадочных процедур воздушное судно должно быть способно осуществить набор высоты по глиссаде, расстояние от точек которой до ближайшего препятствия составляет не менее 10.7 м.

До начала снижения и осуществления захода на посадку система автоматического управления должна сформировать несколько вариантов перспективных посадочных площадок, выполнить анализ и определить оптимальный вариант, удовлетворяющий следующим факторам:

- отсутствие вблизи предполагаемого места посадки переходных зон подстилающей поверхности, существенно влияющих на характер обтекания воздухом несущих винтов и приводящих к возникновению турбулентности;
- допустимость величины угла наклона выбранной площадки по отношению к горизонту;
- отсутствие существенных неровностей и препятствий в непосредственной близости к посадочной площадке и по направлению глиссады;
- характер поверхности, допустимость плотности и твердости грунта на выбранной посадочной площадке;
- наличие воды в пределах выбранной посадочной площадки, влажность поверхности;
- сила и направление ветра;
- возможность ухода на второй круг и повторного захода, обеспечиваемую воздушными подходами к выбранной площадке, включая случай критической высоты принятия решения.

В качестве перспективных посадочных зон, определяемых системой автоматического управления, следует рассматривать подобранные с воздуха поверхности естественного и искусственного происхождения, изначально не предназначенные для посадки ВС данного типа и предвзрительно не обследованные на предмет пригодности для целей приземления. К подобным площадкам также следует относить поверхности аэродромов и вертодромов, не оборудованные средствами авиационного обеспечения полетов, либо за состоянием которых не осуществлялся контроль наземными службами в течение временного интервала более 24 часов.

Форма перспективной посадочной зоны может быть произвольной, однако при этом должна выполняться возможность вписать в нее минимально допустимые габариты посадочной зоны в соответствии с ФАП (федеральными авиационными правилами) – поместить круг диаметром не менее диаметра, равного длине аппарата с вращающимися несущими винтами  $D$ . Однако для аппаратов с максимальной взлетной массой менее 3100 кг допустимо использование более мягкого критерия –  $0.83D$ . Для исследуемого в данной работе беспилотного воздушного судна эта величина составляет 3.2 м.

При подборе площадки с воздуха размеры элементов перспективных посадочных зон в основном определяются с помощью системы оптического распознавания на основе информации, поступающей с системы видеофиксации. Для исключения ошибок при оценке размеров предполагаемых посадочных площадок в сторону их уменьшения линейные размеры площадок следует увеличивать на 20–30%.

При скорости ветра свыше 5 м/с не рекомендуется подбирать посадочные площадки с подветренной стороны массивных препятствий, т.к. при приближении к таким препятствиям беспилотное воздушное судно попадает в зону повышенной турбулентности нисходящего воздушного потока, а в непосредственной близости от препятствий — в зону затенения, в которой скорость ветра может быть значительно меньше, чем над препятствиями. Зависание рекомендуется, по возможности, выполнять выше препятствий или на высоте не менее 20 м с последующим вертикальным снижением аппарата вплоть до приземления. Направление ветра на площадке косвенно может определяться по наклону деревьев, кустарников, ряби воды, дыму, пыли, а также с

помощью целенаправленного сброса ветроуказателей или дымовых шашек. Возможна также оценка по направлению сноса аппарата при прямолинейном горизонтальном полете в сторону выбранного визуального ориентира с минимальной скоростью.

В качестве подходящей поверхности может быть выбрана либо грунтовая поверхность естественного происхождения, либо искусственная бетонная поверхность, а также плотный песок, неглубокий снег или лед. При этом необходимо избегать ярко-зеленой растительности, особо выделяющейся на общем фоне рельефа, т.к. подобное может быть признаком заболоченности местности, являющейся абсолютно непригодной для целей выполнения посадочных процедур.

При выполнении штатной посадки на площадку с поверхностью естественного происхождения обязательно необходимо выполнять контрольное зависание аппарата выше зоны влияния эффекта воздушной подушки для целей дополнительной оценки качества подстилающей поверхности. Зона влияния воздушной подушки распространяется до высоты, равной двум диаметрам несущего винта беспилотного судна вертолетного типа. При обнаружении непригодности площадки для приземления после зависания допускается горизонтальное перемещение аппарата на высоте не менее 10.7 м над препятствиями до пригодной площадки, если таковая расположена в пределах перспективной посадочной зоны, определенной на этапе первичного анализа.

Если посадочная площадка по своим уклонам пригодна для приземления, следует, плавно уменьшая общий шаг несущего винта, обжать стойки шасси беспилотного воздушного судна вертолетного типа, обеспечивая уверенное касание поверхности на горизонтальной площадке с твердым покрытием. Посадка на неровную и/или наклонную поверхность, как и посадка в мягкий рыхлый грунт может привести к аварийной ситуации. Для автоматической посадки необходима ровная, без препятствий поверхность, имеющая твердую основу.

При посадке на малопрочный грунт необходимо следить, чтобы ползки шасси не погружались в него более чем на половину. Для получения уверенности в устойчивом положении аппарата на малопрочном грунте необходимо уменьшение общего шага несущего винта выполнять ступенчато с многократным его увеличением и последующим сбросом.



С учетом требований к штатным вертодромным посадочным площадкам и процессу выполнения посадки в соответствии с принятыми авиационными стандартами [30—33], а также учитывая то, что завершение полета может быть как штатным, так и аварийным (без возможности ухода на второй круг или облета потенциальной зоны приземления при условии минимальности времени завершения полета), можно определить более мягкие минимальные значения характеристик потенциальной площадки:

- минимальные размеры площадки  $5 \times 5$  м;
- максимально допустимые углы наклона поверхности площадки в любом направлении  $10^\circ$ ;
- в радиусе 5 м от зоны площадки не должно быть препятствий выше 1 м;
- минимально допустимая плотность грунта:  $0.25\text{--}1$  кг/см<sup>2</sup>;
- неровности грунта не должны превышать 0.07 м.

Если при приближении к поверхности земли алгоритмы системы управления определяют непригодность выбранных площадок к выполнению посадки, то при наличии возможности беспилотное воздушное судно увеличивает высоту полета и осуществляет поиск мест посадки на большей, чем ранее, площади. В случае если ситуация аварийная и посадка обязательна, критерии отбора снижаются. В случае аварийной посадки и при отсутствии возможных вариантов осуществляется аварийная посадка в максимально приближенную к требованиям зону.

### **Первичный анализ подстилающей поверхности с применением самоорганизующихся карт Кохонена**

Первичный анализ подстилающей поверхности состоит в наборе дистанционных измерений рельефа и состояния земной поверхности, а также в оценке наличия препятствий в перспективной зоне выполнения посадки. Современные средства изучения земной поверхности имеют различную физическую природу, наиболее основными и применяемыми являются:

- ультразвуковые методы;
- радиолокационные методы;
- лидарная съемка и лазерные методы;
- оптические методы.

Применение ультразвуковых методов в данном случае усложняется спецификой применения беспилотного аппарата вертолетного типа. Помимо небольшой дальности уверенного приема от-

раженного сигнала в разреженной среде, качество съемки ухудшается по причине изменения плотности среды ввиду воздушной струи, отбрасываемой несущими винтами, а также вследствие генерации собственных ультразвуковых шумов в процессе работы несущего винта и силовой установки.

Радарные снимки не нуждаются в источнике внешнего освещения, в связи с чем имеют наивысшую устойчивость к изменениям времени года и суток, а также погодных условий, но более сложны для человеческого и машинного зрения, и требуют исходных данных более высокого качества и их тщательной предобработки. Благодаря радарным средствам возможна оценка пригодности участка земной поверхности, основанная не только на снимках местности, но и на структуре и составе ее поверхностного слоя, толщину которого можно регулировать, задавая необходимую частоту излучения. Однако немаловажными аспектами являются дороговизна и проблема доступности радиолокационных средств. Кроме того, при таком подходе утрачивается цветовая информация.

Среди перечисленных методов лидарная съемка, с одной стороны, обладает максимальной высокой точностью при построении модели подстилающей поверхности, а с другой — наиболее требовательна к высоте полета при воздушном лазерном сканировании. Следовательно, применение лидара целесообразно уже после завершения первичного анализа при снижении к оптимальной перспективной зоне посадки для дальнейшей оценки характеристик местности и микрорельефа.

Оптический метод сканирования, который был выбран в этой работе, позволяет получать информацию о земной поверхности в видимом полноцветном диапазоне в любом интервале высот в пределах дальности видимости, что является критически важным на этапах первичной оценки. Однако полученную информацию будет необходимо уточнять на дальнейших этапах, т.к. прямая оценка микрорельефа при применении данной методики невозможна. Камеры видеосъемки обладают наименьшей стоимостью и являются общедоступными, однако оптические средства анализа сильнее всего подвержены изменчивости окружающей среды.

Частично данную проблему позволяет решить предварительная обработка изображений [34, 35]. Для улучшения качества исходных данных актив-

но применяются методы улучшения контрастности и фильтрации шумов; масштабирование, локализация и сегментация позволяют сократить размерность изображений без потери необходимой информации. Однако описанные средства не уменьшают чувствительность к прочим изменениям, таким как угол и высота воздушной съемки. Нейросетевые методы анализа изображений, обладающие повышенной устойчивостью к зашумленным данным, способствуют достижению достаточной инвариантности к условиям фотофиксации [36, 37]. В ходе данного исследования были использованы самоорганизующиеся карты Кохонена.

Самоорганизующаяся карта Кохонена (SOM, self-organizing map) — нейронная сеть, основанная на конкурентном обучении без учителя, выполняющая задачу визуализации и кластеризации. Подобно структуре человеческого мозга, который подразделяется на специализированные области, особым образом реагирующие на однотипные определенные стимулы, алгоритм SOM отображает входное многомерное пространство в упрощенную двумерную структуру, обладающую свойством сохранения топологии [38—43]. В узлах данной структуры, представляющих собой решетку, находятся нейроны, вес каждого из которых представляет собой вектор, определяющий в пространстве признаков некоторую характерную точку. В результате реализации алгоритма обучения нейроны распределяются в пространстве признаков, аппроксимируя статистические взаимосвязи между данными обучающего множества. Такая способность к обобщению входных данных позволяет нейронной сети распознавать и характеризовать заранее не известный набор информации, являясь перспективным инструментом кластерного анализа. Структура нейронной сети и процесс распределения весов самоор-

ганизирующей карты Кохонена представлены на рис. 1.

Алгоритм обучения самоорганизующейся карты Кохонена, применяемый в данной работе, состоит из нескольких этапов. На начальном этапе происходит инициализация векторов синоптических весов случайными значениями в заданном диапазоне:

$$w_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jn}]^T, \quad j = 1, 2, \dots, l.$$

Здесь  $l$  — общее количество нейронов в карте;  $n$  — размерность входного пространства.

Затем на вход нейронной сети подаются значения обучающей выборки. Для упрощения визуализации процесса обучения рассмотрим одну итерацию. Входной вектор имеет вид:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n].$$

После подачи на вход случайного элемента из обучающей выборки будет определен нейрон, значения компонент вектора веса которого наиболее близки к соответствующим компонентам входного элемента. Критерием близости значения двух векторов является евклидово расстояние. Данный нейрон обозначается как нейрон-победитель. Для определения нейрона-победителя необходимо перебрать все узлы самоорганизующейся карты и рассчитать для каждой пары вход-нейрон евклидово расстояние по формуле:

$$dist = |x - w_j| = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - w_i)^2}.$$

На следующем этапе происходит изменение веса нейрона-победителя и соседствующих с ним в некоторой окрестности нейронов на величину обучения. Число соседствующих нейронов определяется радиусом данной окрестности, называ-

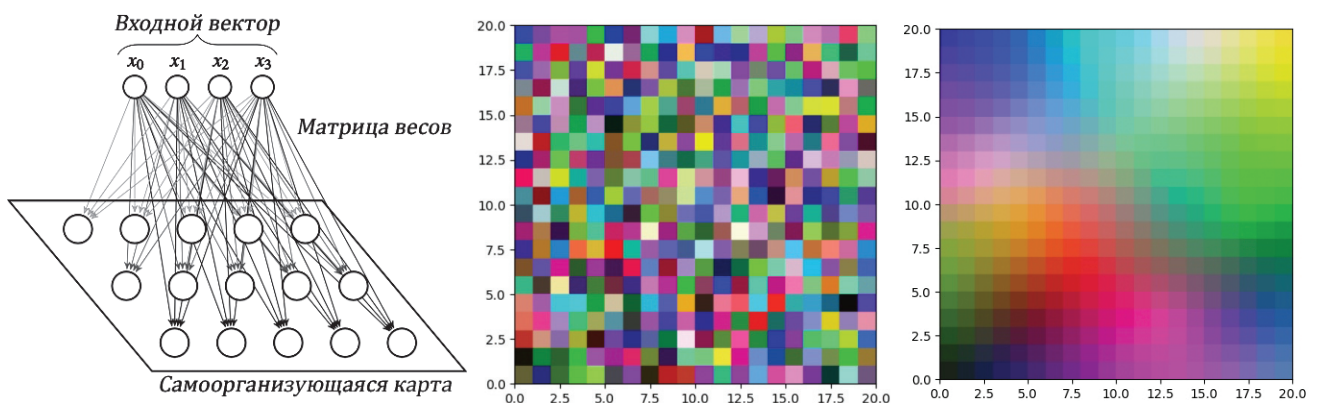


Рис. 1. Структурная схема карты Кохонена и распределение синоптических весов до и после обучения

емым радиусом обучения. Радиус обучения на начальном этапе задается равным половине ширины карты. С каждой итерацией радиус обучения уменьшается, что наглядно может быть представлено экспоненциальной функцией затухания:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/\lambda}.$$

Здесь  $\sigma_0$  — радиус обучения на начальном этапе;  $\lambda$  — константа, устанавливаемая исследователем.

Радиус обучения продолжит уменьшаться до тех пор, пока не будет охватывать только один нейрон — собственно нейрон-победитель. При этом веса нейронов будут изменяться на величину, зависящую от скорости обучения, также устанавливаемой исследователем:

$$w(t+1) = w(t) + \theta(t) L(t) dist(t).$$

Здесь  $L$  — скорость обучения;  $t$  — итерация обучения;  $\theta$  — функция изменения скорости обучения.

Результаты экспериментов показали, что величина коэффициента скорости обучения должна уменьшаться не только с течением итераций, но и по мере отдаления от нейрона-победителя в пределах радиуса обучения. Таким образом, на границе радиуса обучения вклад в изменение веса должен быть практически равен нулю. Зависи-

мость вклада в изменение веса от расстояния может быть представлена функцией Гаусса:

$$\theta(t) = e^{-dist^2 / 2\sigma(t)^2}.$$

График изменения коэффициента скорости обучения и схема варьирования радиуса обучения представлены на рис. 2.

Процесс обучения повторяется в течение заданного числа эпох. Векторы синоптических весов нейронов в конце обучения представляют некоторые устойчивые точки в исходном многомерном пространстве, позволяющие определить закономерности во входных данных.

### Результаты

В ходе исследования был создан нейросетевой классификатор подстилающей поверхности на основе самоорганизующейся карты Кохонена с применением библиотеки тензорных вычислений PyTorch языка Python. Оптимальный размер карты определялся эмпирически и составил  $20 \times 20$  нейронов. В качестве обучающей выборки использовались топографические снимки местности размером  $256 \times 256$  пикселей. Далее выполнялась сегментация данных изображений на секторы размером  $32 \times 32$  пикселя. Масштаб такого фрагмента подобран так, чтобы соответствовать искомой посадочной зоне площадью  $5 \times 5$  м на земной поверхности. Процесс подготовки изображений представлен на рис. 3.

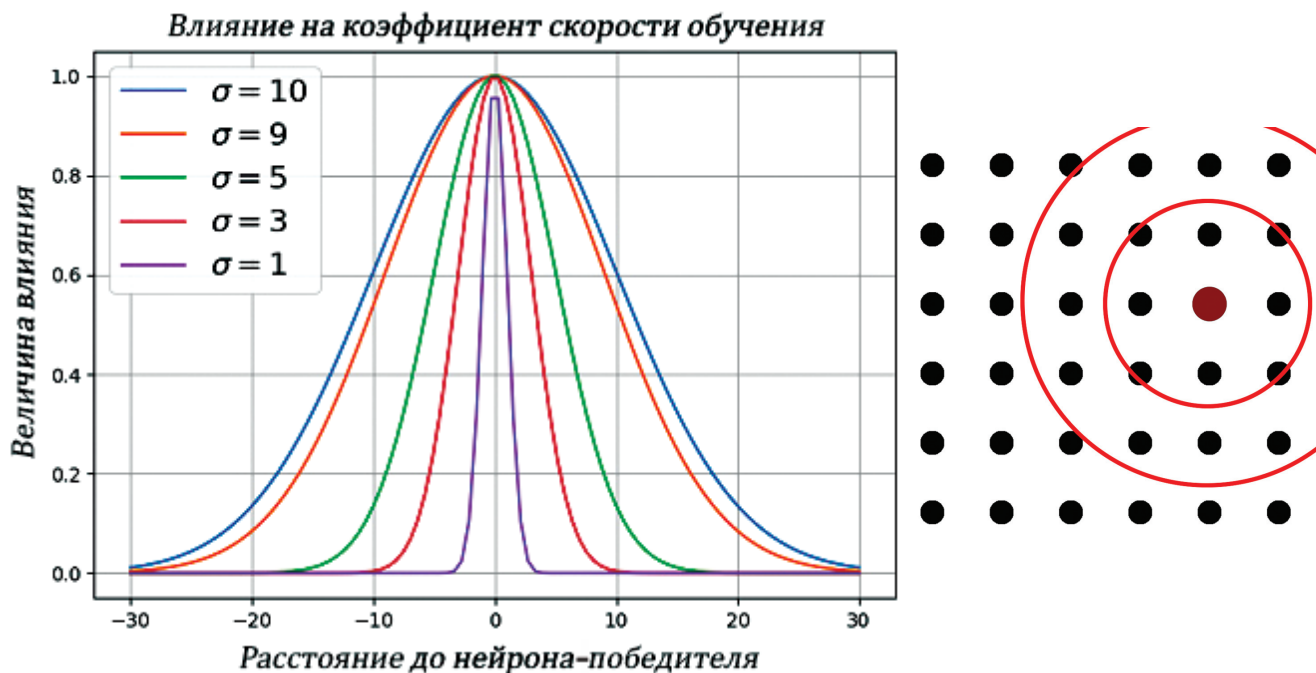


Рис. 2. Изменение коэффициента скорости обучения и радиуса обучения



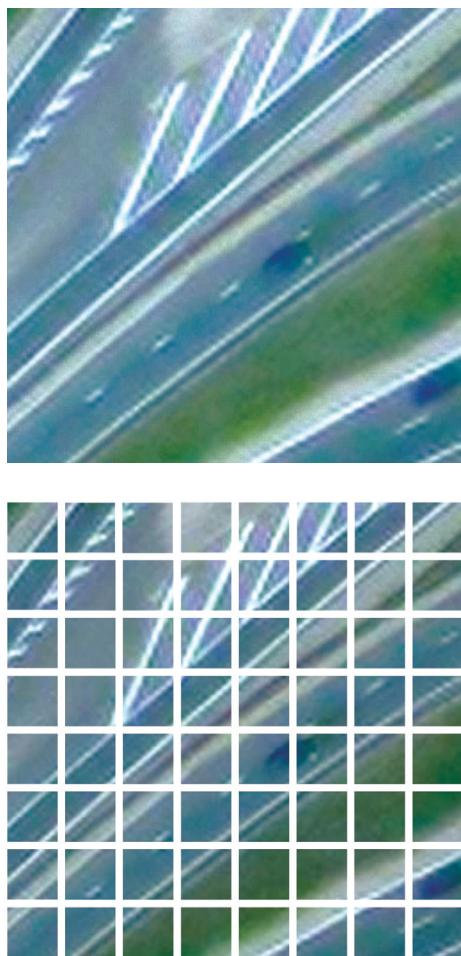


Рис. 3. Процесс подготовки изображений обучающей выборки

Эти фрагменты являлись прямыми входными значениями для нейронной сети. Вес каждого нейрона соответственно представлял собой трёхмерную матрицу размера  $32 \times 32 \times 3$ . Дополнительная размерность обусловлена использованием полноцветных изображений в RGB-спектре.

Количество распознаваемых классов задавалось вручную пользователем. Каждому нейрону присваивался дополнительный семантический параметр класса с помощью отдельной программы классификатора. Результирующее распределение весов нейронной сети в окне программы-классификатора представлено на рис. 4.

После завершения обучения и настройки классов была проведена серия тестов разработанного нейросетевого классификатора. Пример исходного изображения и результат работы классификатора представлен на рис. 5. Описанный подход позволяет оценивать не только соотношение и распределение спектров цвета на изображении, но и отслеживать характерные паттерны текстуры.

### Обсуждение

Обучающая выборка содержала 2700 фрагментов топографических снимков местности. Нейронная сеть обучалась в течение 10 000 эпох. В ходе серии из 40 компьютерных тестов с различными снимками местности было выявлено 21% ошибок первого рода и 0% ошибок второго рода, что подтверждает перспективность данного подхода к кластеризации подстилающей повер-

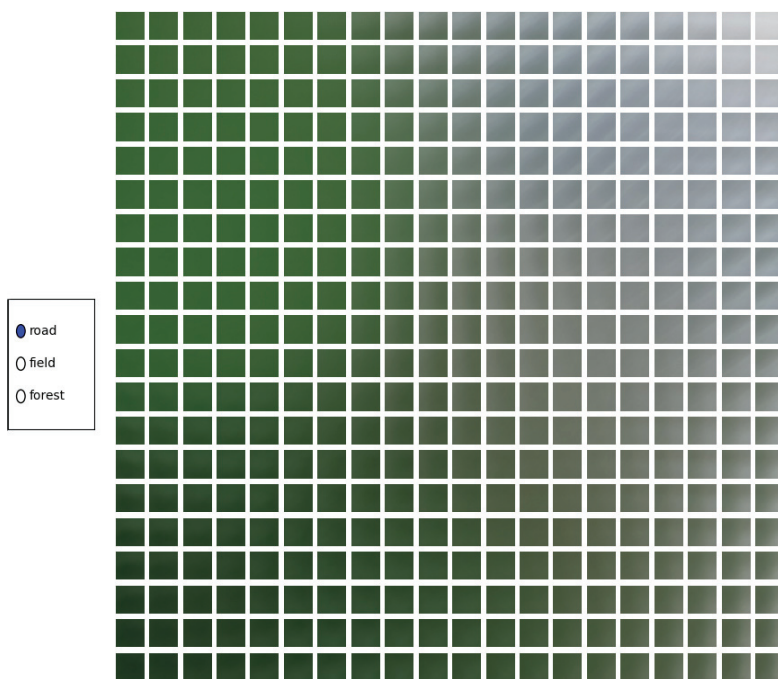


Рис. 4. Результирующее распределение весов нейронной сети в окне программы-классификатора

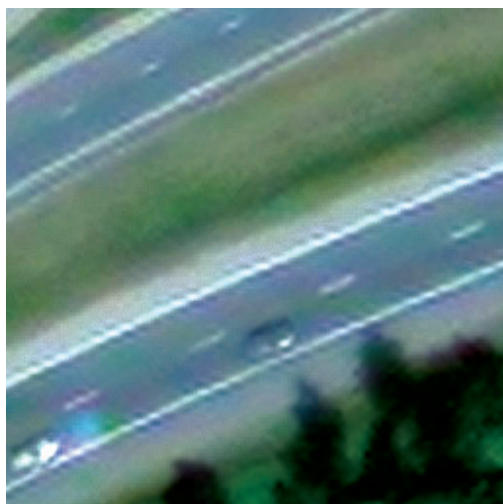


Рис. 5. Результат работы нейросетевого классификатора

хности и необходимость дальнейших исследований по рассмотренной теме.

#### Выводы

В рамках данной работы были сформулированы основные требования к оптимальному варианту посадочной площадки для беспилотного воздушного судна вертолетного типа соосной конструкции, подбираемого с воздуха на этапе предварительного анализа с помощью оптического метода. Предложен способ кластеризации подстилающей поверхности с применением самоорганизующихся карт Кохонена. Разработан и протестирован нейросетевой классификатор с применением библиотеки тензорных вычислений PyTorch языка Python.

#### Список источников

1. *Byun J.-H., Lee G.-M., Kim S.-H.* Design of Experiments for Optimization of Helicopter Flight Tests // Transactions of the KSME C Industrial Technology and Innovation, The Korean Society of Mechanical Engineers. 2014. Vol. 2. No. 2, pp. 113-124. DOI: 10.3795/KSME-C.2014.2.2.113
2. *Гулевич С.П.* Летные испытания скоростных беспилотных летательных аппаратов: Монография. – 2-е изд. – М.: Первый том, 2018. – 288 с.
3. *McAteer T., Rice C., Gavin C.* Flight test safety – The U.S. navy approach // IEEE Aerospace Conference (28 June 2018; Big Sky, MT, USA). DOI: 10.1109/AERO.2018.8396745
4. *Gregory J.W., Liu T.* Introduction to Flight Testing (Aerospace Series). - John Wiley & Sons Ltd, 2021. – 352 p.
5. *Costello D.H., Jewell J., Xu H.* Autonomous Flight-Test Data in Support of Safety of Flight Certification // Aerospace Research Central. 2020. Vol. 29. No. 2. DOI: 10.2514/1.D0220
6. *Hallberg E., Kaminer I., Pascoal A.* Development of a flight test system for unmanned air vehicles // IEEE Control Systems Magazine. 1999. Vol. 19. No. 1, pp. 55-56. DOI: 10.1109/37.745769
7. *Alaimo A., Esposito A., Orlando C., Tesoriere G.* A Pilot Mental Workload Case Study in a Full Flight Simulator // Aerotecnica Missili & Spazio. 2018. Vol. 97, pp. 27–33.
8. *Kantowitz B.H., Campbell J.L.* Pilot Workload and Flightdeck Automation // Automation and Human Performance: Theory and Applications. - CRC Press, 2019, 20 p.
9. *Tang L., Si J., Sun L., Mao G., Yu S.* Assessment of the mental workload of trainee pilots of remotely operated aircraft using functional near-infrared spectroscopy // BMC Neurol. 2022. No. 1: 160. DOI: 10.1186/s12883-022-02683-5
10. *Евдокименков В.Н., Ким Р.В., Векшина А.Б., Якуменко В.А.* Исследование индивидуальных особенностей управляющих действий лётчиков в процессе посадки на основе нейросетевых моделей // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 17-29.
11. *Semkin V., Huhtinen I.* Millimeter-wave UAV-based Channel Measurement Setup // IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (25-28 April 2021; Helsinki, Finland). DOI: 10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448737
12. *Miao Y., Fan W., Rodriguez-Piceiro J., Yin X., Gong Y.* Emulating UAV Air-to-Ground Radio Channel in Multi-Probe Anechoic Chamber // IEEE Globecom Workshops (09–13 December 2018; Dhabi, United Arab Emirates). DOI: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644381
13. *Burhanuddin L.A., Liu X., Deng Y., Challita U., Zahemszky A.* QoE Optimization for Live Video Streaming in UAV-to-UAV Communications via Deep Reinforcement Learning // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2022. Vol. 71. No.5, pp. 5358 – 5370. DOI: 10.1109/TVT.2022.3152146

14. Zhou H., Hu F., Juras M., Mehta A.B., Deng Y. Real-Time Video Streaming and Control of Cellular-Connected UAV System: Prototype and Performance Evaluation // IEEE Wireless Communications Letters. 2021. Vol. 10. No. 8, pp. 1657–1661. DOI: 10.48550/arXiv.2101.10736
15. Погосян М.А., Верейкин А.А. Управление положением и движением летательных аппаратов в системах автоматической посадки: Аналитический обзор // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 7-22. DOI: 10.34759/vst-2020-3-7-22
16. Иванов П.И., Куринный С.М., Криворотов М.М. Параметры, подлежащие определению в летных испытаниях многокупольной парашютной системы с целью оценки ее эффективности // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 49-59. DOI: 10.34759/vst-2020-3-49-59
17. Николаев Е.И., Неделько Д.В., Шувалов В.А., Югай П.В. Применение внешних подушек безопасности на вертолете // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 91-101.
18. Журин С.В. Парашютно-реактивная система мягкой посадки с упругим звеном // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 107-114.
19. Grlj C.G., Krzmar N., Pranjic M. A Decade of UAV Docking Stations: A Brief Overview of Mobile and Fixed Landing Platforms // Drones. 2022. Vol. 6. No. 1: 17. DOI: 10.3390/drones6010017
20. Bagare S.V., Mirza K., Sharma M. et al. Design of Mobile Docking Mechanism for Unmanned Aerial Vehicles capable of Vertical Take-off and Landing // AIAA Aviation Forum, 2022. DOI: 10.2514/6.2022-4063
21. Stewart W., Ajanic E., Müller M., Floreano D. How to Swoop and Grasp Like a Bird With a Passive Claw for a High-Speed Grasping // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2022. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3143095
22. Kramar V., Kabanov A., Dudnikov S. A Mathematical Model for a Conceptual Design and Analyses of UAV Stabilization Systems // Fluids. 2021. Vol. 6. No. 5: 172. DOI: 10.3390/fluids6050172
23. Theodore C., Rowley D., Hubbard D. et al. Flight Trials of a Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle Landing Autonomously at Unprepared Sites. - San Jose State Foundation, Jet Propulsion Laboratory, US Army AFDD, 2006.
24. Takahashi M., Abershitz A., Rubinets R., Whalley M. Evaluation of safe landing area determination algorithms for autonomous rotorcraft using site benchmarking // 67th American Helicopter Society International annual forum (03-05 May 2011; Virginia Beach, Virginia, USA).
25. Sanfourche M., le Besnerais G., Fabiani P., Piquereau A., Whalley M. Comparison of terrain characterization methods for autonomous UAVs // 65th American Helicopter Society International annual forum (27–29 May 2009, Grapevine, Texas, USA).
26. Krizhevsky S., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Advances in Neural Information Processing Systems. 2012.
27. Лунев Е.М. Повышение точности определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотограмметрических измерений на этапе посадки // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 2. С. 150-159.
28. Меркушин Г.В., Сливин И.В. Оптико-электронный высотомер для системы посадки самолета // Вестник Московского авиационного института. 2001. Т. 8. № 2. С. 75-82.
29. Garcia-Pardo P.J., Sukhatme G.S., Montgomery J.F. Towards vision-based safe landing for an autonomous helicopter // Robotics and Autonomous Systems. 2002. Vol. 38. No. 1, pp. 19-29. DOI: 10.1016/S0921-8890(01)00166-X
30. Федеральные авиационные правила «Требования к посадочным площадкам, расположенным на участке земли или акватории». 2011.
31. Нормы летной годности гражданских вертолетов СССР (НЛГВ-2) / Междувед. комис. по нормам лет. годности гражд. самолетов и вертолетов СССР. - 2-е изд. - М.: Б. и., 1987. - 410 с.
32. European Union Aviation Safety Agency, Certification Specifications and Guidance Material for the design of surface-level VFR heliports located at aerodromes that fall under the scope of Regulation (EU) 2018/1139 (CS-HPT-DSN). 2019.
33. International Civil Aviation Organization, Physical Characteristics - Surface-level Heliports. ICAO Regional Workshop. 2016.
34. Nath S.S., Mishra G., Kar J. et al. A survey of image classification methods and techniques // International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (10–11 July 2014; Kanyakumari, India). DOI: 10.1109/ICCICCT.2014.6993023
35. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. — 4th edition. — Pearson, 2017. — 1192 p.
36. Tajbakhsh N., Shin J.Y., Gurudu S.R. et al. Convolutional neural networks for medical image analysis: Full training or fine tuning? // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2016. Vol. 35. No. 5, pp. 1299-1312. DOI: 10.48550/arXiv.1706.00712
37. Zhao Z., Ma Q. A novel method for image clustering // 10th International Conference on Natural Computation (19-21 August 2014; Xiamen, China), pp. 648-652.
38. Bernard Y., Hueber N., Girau B. Novelty Detection with Self-Organizing Maps for Autonomous Extraction of Salient Tracking Features // Advances in Self-Organizing Maps, Learning Vector Quantization, Clustering and Data Visualization. 2019, pp. 100–109.



39. Malone J., McGarry K., Wermter S., Bowerman C. Data mining using rule extraction from Kohonen self-organising maps // *Neural Computing and Applications*. 2006. Vol. 15. No. 1, pp. 9-17. DOI: 10.1007/s00521-005-0002-1
40. Kabra A., Iwahori Y., Usami H. et al. Polyp Classification and Clustering from Endoscopic Images using Competitive and Convolutional Neural Networks // 8th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (19-21 February 2019, Prague, Czech Republic), pp. 446-452. DOI: 10.5220/0007353204460452
41. Kohonen T. Essentials of the self-organizing map // *Neural networks*. 2013. Vol. 37, pp. 52-65. DOI: 10.1016/j.neunet.2012.09.018
42. Парфентьев К.В. Разработка системы распознавания изображений с использованием самоорганизующихся карт Кохонена // *Молодежный научно-технический вестник*. 2013. № 11. С. 34.
43. Гаврилов А.И., Парфентьев К.В. Построение модели подстилающей поверхности на основе реконструкции данных мультиспектрального мониторинга // *XLI Академические чтения по космонавтике (24–27 января 2017; Москва): тезисы докладов*. С. 413.

## References

1. Byun J.-H., Lee G.-M., Kim S.-H. Design of Experiments for Optimization of Helicopter Flight Tests. *Transactions of the KSME C Industrial Technology and Innovation, The Korean Society of Mechanical Engineers*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 113-124. DOI: 10.3795/KSME-C.2014.2.2.113
2. Gulevich S.P. *Letnye ispytaniya skorostnykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov* (Flight tests of high-speed unmanned aerial vehicles), 2nd ed, Moscow, Pervyi tom, 2018, 288 p.
3. McAteer T., Rice C., Gavin C. Flight test safety — The U.S. navy approach. *IEEE Aerospace Conference (28 June 2018; Big Sky, MT, USA)*. DOI: 10.1109/AERO.2018.8396745
4. Gregory J.W., Liu T. *Introduction to Flight Testing (Aerospace Series)*. John Wiley & Sons Ltd, 2021, 352 p.
5. Costello D.H., Jewell J., Xu H. Autonomous Flight-Test Data in Support of Safety of Flight Certification. *Aerospace Research Central*, 2020, vol. 29, no. 2. DOI: 10.2514/1.D0220
6. Hallberg E., Kammer I., Pascoal A. Development of a flight test system for unmanned air vehicles. *IEEE Control Systems Magazine*, 1999, vol. 19, no. 1, pp. 55-56. DOI: 10.1109/37.745769
7. Alaimo A., Esposito A., Orlando C., Tesoriere G. A Pilot Mental Workload Case Study in a Full Flight Simulator. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 2018, vol. 97, pp. 27–33.
8. Kantowitz B.H., Campbell J.L. Pilot Workload and Flightdeck Automation. In: *Automation and Human Performance: Theory and Applications*. CRC Press, 2019, 20 p.
9. Tang L., Si J., Sun L., Mao G, Yu S. Assessment of the mental workload of trainee pilots of remotely operated aircraft using functional near-infrared spectroscopy. *BMC Neurol*, 2022, no. 1: 160. DOI: 10.1186/s12883-022-02683-5
10. Evdokimenkov V.N., Kim R.V., Vekshina A.B., Yakimenko V.A. Study of pilot's control actions personality during landing based on neural network models. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 17-29.
11. Semkin V., Huhtinen I. Millimeter-wave UAV-based Channel Measurement Setup. *IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (25-28 April 2021; Helsinki, Finland)*. DOI: 10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448737
12. Miao Y., Fan W., Rodriguez-Piceiro J., Yin X., Gong Y. Emulating UAV Air-to-Ground Radio Channel in Multi-Probe Anechoic Chamber. *IEEE Globecom Workshops (09-13 December 2018; Dhahbi, United Arab Emirates)*. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644381
13. Burhanuddin L.A., Liu X., Deng Y., Challita U., Zahemszky A. QoE Optimization for Live Video Streaming in UAV-to-UAV Communications via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, vol. 71, no.5, pp. 5358 – 5370. DOI: 10.1109/TVT.2022.3152146
14. Zhou H., Hu F., Juras M., Mehta A.B., Deng Y. Real-Time Video Streaming and Control of Cellular-Connected UAV System: Prototype and Performance Evaluation. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, vol. 10, no. 8, pp. 1657–1661. DOI: 10.48550/arXiv.2101.10736
15. Pogosyan M.A., Vereikin A.A. Position and motion control of aerial vehicles in automatic landing systems: analytical review. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 7-22. DOI: 10.34759/vst-2020-3-7-22
16. Ivanov P.I., Kurinnyi S.M., Krivorotov M.M. Parameters liable to be defined while a multi-dome parachute system flight-testing for its efficiency estimation. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 49-59. DOI: 10.34759/vst-2020-3-49-59
17. Nikolaev E.I., Nedelko D.V., Shuvalov V.A., Yugai P.V. External airbags application onboard a helicopter. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 91-101.
18. Zhurin S.V. Parachute-jet soft landing system with elastic linkage. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 107-114.
19. Grlj C.G., Krznar N., Pranjić M. A Decade of UAV Docking Stations: A Brief Overview of Mobile and Fixed Landing Platforms. *Drones*, 2022, vol. 6, no. 1: 17. DOI: 10.3390/drones6010017
20. Bagare S.V., Mirza K., Sharma M. et al. Design of Mobile Docking Mechanism for Unmanned Aerial Vehicles capable of Vertical Take-off and Landing. *AIAA Aviation Forum*, 2022. DOI: 10.2514/6.2022-4063



21. Stewart W., Ajanic E., Мyller M., Floreano D. How to Swoop and Grasp Like a Bird With a Passive Claw for a High-Speed Grasping. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3143095
22. Kramar V., Kabanov A., Dudnikov S. A Mathematical Model for a Conceptual Design and Analyses of UAV Stabilization Systems. *Fluids*, 2021, vol. 6., no. 5: 172. DOI: 10.3390/fluids6050172
23. Theodore C., Rowley D., Hubbard D. et al. *Flight Trials of a Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle Landing Autonomously at Unprepared Sites*. San Jose State Foundation, Jet Propulsion Laboratory, US Army AFDD, 2006.
24. Takahashi M., Abershitz A., Rubinets R., Whalley M. Evaluation of safe landing area determination algorithms for autonomous rotorcraft using site benchmarking. *67th American Helicopter Society International annual forum (03-05 May 2011; Virginia Beach, Virginia, USA)*.
25. Sanfourche M., le Besnerais G., Fabiani P., Piquereau A., Whalley M. Comparison of terrain characterization methods for autonomous UAVs. *65th American Helicopter Society International annual forum (27-29 May 2009, Grapevine, Texas, USA)*.
26. Krizhevsky S., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems. 2012*.
27. Lunev E.M. Improving the accuracy of uav navigation parameters during landing on the basis of photogrammetric measurements. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 150-159.
28. Merkishin G.V., Slivin I.V. Optoelectronic altimeter for aircraft landing system. *Aerospace MAI Journal*, 2001, vol. 8, no. 2, pp. 75-82.
29. Garcia-Pardo P.J., Sukhatme G.S., Montgomery J.F. Towards vision-based safe landing for an autonomous helicopter. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, vol. 38, no. 1, pp. 19-29. DOI: 10.1016/S0921-8890(01)00166-X
30. *Federal'nye aviatsionnye pravila "Trebovaniya k posadochnym ploshchadkam, raspolozhennym na uchastke zemli ili akvatorii"* (Federal Aviation Regulations "Requirements for landing sites located on a plot of land or water area"), 2011.
31. *Normy letnoi godnosti grazhdanskikh vertoletov SSSR. NLGV-2* (Airworthiness Standards of the USSR civil helicopters. NLGV-2). Moscow, 1987, 410 p.
32. *European Union Aviation Safety Agency, Certification Specifications and Guidance Material for the design of surface-level VFR heliports located at aerodromes that fall under the scope of Regulation (EU) 2018/1139 (CS-HPT-DSN)*. 2019.
33. *International Civil Aviation Organization, Physical Characteristics - Surface-level Heliports*. ICAO Regional Workshop. 2016.
34. Nath S.S., Mishra G., Kar J. et al. A survey of image classification methods and techniques. *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (10-11 July 2014; Kanyakumari, India)*. DOI: 10.1109/ICCICCT.2014.6993023
35. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. 4th edition. Pearson, 2017, 1192 p.
36. Tajbakhsh N., Shin J.Y., Gurudu S.R. et al. Convolutional neural networks for medical image analysis: Full training or fine tuning? *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2016, vol. 35, no. 5, pp. 1299-1312. DOI: 10.48550/arXiv.1706.00712
37. Zhao Z., Ma Q. A novel method for image clustering. *10th International Conference on Natural Computation (19-21 August 2014; Xiamen, China)*, pp. 648-652.
38. Bernard Y., Hueber N., Girau B. Novelty Detection with Self-Organizing Maps for Autonomous Extraction of Salient Tracking Features. *Advances in Self-Organizing Maps, Learning Vector Quantization, Clustering and Data Visualization*, 2019, pp 100–109.
39. Malone J., MCGarry K., Wermter S., Bowerman C. Data mining using rule extraction from Kohonen self-organising maps. *Neural Computing and Applications*, 2006, vol. 15, no. 1, pp. 9-17. DOI: 10.1007/s00521-005-0002-1
40. Kabra A., Iwahori Y., Usami H. et al. Polyp Classification and Clustering from Endoscopic Images using Competitive and Convolutional Neural Networks. *8th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (19-21 February 2019, Prague, Czech Republic)*, pp. 446-452. DOI: 10.5220/0007353204460452
41. Kohonen T. Essentials of the self-organizing map. *Neural networks*, 2013, vol. 37, pp. 52-65. DOI: 10.1016/j.neunet.2012.09.018
42. Parfent'ev K.V. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik*, 2013, no. 11, pp. 34.
43. Gavrilov A.I., Parfent'ev K.V. *Materialy XLI Akademicheskii chteniya po kosmonavtike (24–27 yanvarya 2017; Moskva)*, p. 413

Статья поступила в редакцию 29.06.2022; одобрена после рецензирования 08.08.2022; принята к публикации 10.08.2022.

The article was submitted on 29.06.2022; approved after reviewing on 08.08.2022; accepted for publication on 10.08.2022.