

Создание модели беспилотного летательного аппарата типа биплан, использующей генетический алгоритм в полете, для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области

О. В. Кузьмин✉, М. В. Лавлинский

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ quzminov@mail.ru

Резюме

С конца июля 2019 г. в Сибири был зафиксирован резкий рост площади природных пожаров. Наиболее сложная ситуация складывается в Иркутской области, где одни районы страдают от наводнений, другие – от природных пожаров. Для того чтобы эффективнее бороться со стихийными бедствиями, происходящими на территории как Приангарья, так и России в целом, предлагается данный проект – разработка беспилотных летательных аппаратов, способных работать автономно и выполнять ряд задач по сбору информации. Экологическая ситуация в целом на водосборной территории озера Байкал продолжает усугубляться с каждым днем. Масштабную угрозу экологии водосборного бассейна несут не только стихийные бедствия (лесные пожары и наводнения), но и несанкционированные свалки твердых бытовых отходов, браконьерство, а также загрязнение Байкала туристами. Безусловно, необходим постоянный и оперативный экологический мониторинг состояния водосборного бассейна озера Байкал, в котором может оказаться полезным создаваемый модельный ряд беспилотных летательных аппаратов, в том числе разработанная ранее модель квадрокоптера-эколога. Данная статья посвящена проектированию модели беспилотного летательного аппарата, предназначенного для помощи в мониторинге лесных массивов и водных пространств Иркутской области. Проектирование выполнено с учетом того, что аппарат должен функционировать в неблагоприятных климатических условиях и бортовой компьютер способен поддерживать работу с нейронной сетью. Обосновывается выбор концепции беспилотного летательного аппарата – биплан со стреловидными крыльями. Компьютерное трехмерное моделирование выполнено в универсальной программе Autodesk Fusion 360. В работе представлен чертеж полученной компьютерной модели. Предлагаемая САД-модель позволит получить необходимые для создания натуральных моделей чертежи и G-код для 3D-печати и возможного применения фрезерного и лазерного станка. Приводится описание процесса создания тестовой модели и оснащения ее электроникой. В основе программного обеспечения беспилотного летательного аппарата будет использоваться генетический алгоритм. Выбрана архитектура нейросети и проведены необходимые математические расчеты.

Ключевые слова

беспилотный летательный аппарат, биплан, трехмерное моделирование, пожары, наводнения, генетический алгоритм, натурная тестовая модель

Для цитирования

Кузьмин О. В. Создание модели беспилотного летательного аппарата типа биплан, использующей генетический алгоритм в полете, для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области / О. В. Кузьмин, М. В. Лавлинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 185–192. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).185-192

Информация о статье

поступила в редакцию: 25.08.2021, поступила после рецензирования: 14.09.2021, принята к публикации: 17.09.2021

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-41-385001

Creation of a biplan type uav model using a genetic algorithm in flight to help in solving the problem of fires in the Irkutsk region

O. V. Kuzmin✉, M. V. Lavlinsky

Irkutsk State University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ quzminov@mail.ru

Abstract

Since the end of July 2019, a sharp increase in the area of wildfires has been recorded in Siberia. The most difficult situation is in the Irkutsk region, where some areas suffer from floods, while others - from wildfires. In order to more effectively deal with nat-

ural disasters occurring on the territory of both the Angara region and Russia as a whole, the project is proposed for the development of unmanned aerial vehicles (UAVs) capable of operating autonomously and performing a number of tasks to collect information. The ecological situation in general in the catchment area of Lake Baikal continues to worsen every day. Not only natural disasters (forest fires and floods), but also unauthorized solid waste dumps, poaching, and tourist pollution of Lake Baikal pose a large-scale threat to the ecology of the drainage basin. Of course, constant and operational environmental monitoring of Lake Baikal drainage basin condition seems urgent, making quite useful the created model range of UAVs, including the model of a quadcopter-ecologist, developed by our team earlier. This article is devoted to the design of a UAV model штреутувв to help monitor forests and water areas of the Irkutsk region. The design was carried out taking into account the fact that the device must operate in adverse climatic conditions and the on-board computer is capable of working in the interaction with a neural network. The choice of the UAV concept is substantiated - a biplane with swept wings. Computer three-dimensional modeling (CAD) is carried out in the universal program Autodesk Fusion 360. The work presents a drawing of the resulting computer model. The created CAD model will allow obtaining the drawings and G-code necessary for creating full-scale models for 3D printing and the possible use of a milling and laser machine tools. A description of the process of creating a test model and equipping it with electronics is given. The UAV software will be based on a genetic algorithm. The architecture of the neural network was chosen and the necessary mathematical calculations were carried out.

Keywords

uav, biplane, 3D modeling, fires, floods, genetic algorithm, full-scale test model

For citation

Kuzmin O.V., Lavlinsky M.V. Sozдание modeli bespilotnogo letatel'nogo apparata tipa biplan, ispol'zuyushchei geneticheskiy algoritm v polete, dlya pomoshchi v reshenii problemy pozharov v Irkutskoi oblasti [Creation of a biplan type uav model using a genetic algorithm in flight to help in solving the problem of fires in the Irkutsk region]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 185–192. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).185-192

Article info

Received: 25.08.2021, Revised: 14.09.2021, Accepted: 17.09.2021

Acknowledgments

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Irkutsk Region within the framework of the scientific project No. 20-41-385001

Введение

Проблема лесных пожаров по-прежнему является достаточно актуальной для России. И, к сожалению, Иркутская область находится на высоком месте в рейтинге по площади, охваченной пожарами среди регионов нашей страны. Кроме того, в Иркутской области частыми стихийными бедствиями являются наводнения. Для того чтобы результативнее вести борьбу с природными бедствиями, случающимися на территории, как нашей области, так и России в целом, предлагается данный проект – модель беспилотного летательного аппарата (БПЛА), работающего автономно и выполняющего мониторинг лесных массивов и водных пространств [1–7].

Концепция беспилотного летательного аппарата и его конструктивные особенности

Выбор концепции БПЛА был обусловлен тремя основными факторами:

1. Мобильность. Не требует длинной взлетной полосы и легко транспортируется.
2. Небольшие затраты на производство и обслуживание. Из-за малого веса аппарату не требуется много топлива, а в силу небольших размеров его производство проще и дешевле.
3. Отсутствие рисков для пилота. Потеря БПЛА не только дешевле, чем потеря полноразмер-

ного летательного аппарата, но и не представляет опасность для пилота [8–15].

Для БПЛА будет актуальна самолетная платформа исходя из следующих аспектов:

- высокие летно-технические характеристики;
- покрытие больших площадей при съемке и наблюдении;
- большое время в полете (до 2–3 ч);
- возможность полета при ветре до 30 м/с [16].

Модель БПЛА будет иметь конструкцию биплана, чтобы увеличить подъемную силу при меньшем размахе крыла, с круговым крылом, т. е. верхняя и нижняя поверхность соединены на концах. Размах крыльев 1,4 м, длина фюзеляжа 1,4 м. Крылья имеют стандартный профиль, плоские снизу, предназначенные для уменьшения давления на верхнюю часть крыла. Угол атаки передних крыльев 10°, задних 0° [12]. Эффективность данного тандема крыльев подтверждают проведенные расчеты. Также из расчетов следует, что БПЛА достаточно иметь скорость более 82 км/ч для удержания в воздухе, эта скорость вполне достижима и достаточно мала, для того чтобы нейросеть бортового компьютера успевала обрабатывать снимки в потоковом режиме [1, 17–20].

Несущие винты самолета располагаются в плоскости крыльев и позволяют совершать вертикальный взлет – посадку, что необходимо для рабо-

ты в условиях удаленных регионов, не оборудованных взлётно-посадочными полосами. Два задних винта после взлета переводятся в горизонтальное положение и обеспечивают скорость достаточную для продолжения полета в горизонтальной плоскости. Средняя скорость БПЛА (по предварительным расчетам) составит 80–150 км/ч [21–23].

Создание компьютерной модели беспилотного летательного аппарата

Для создания компьютерной модели БПЛА

(рис. 1.) использована универсальная программа создания инженерных проектов Autodesk Fusion 360. При создании модели были применены инструменты проектирования, такие как выдавливание, вращение, сопряжение, лофт и булевы операции.

Для компьютерной модели была создана необходимая чертежная документация (рис. 2).

Создание тестового образца беспилотного летательного аппарата

Далее переходим к созданию тестового об-

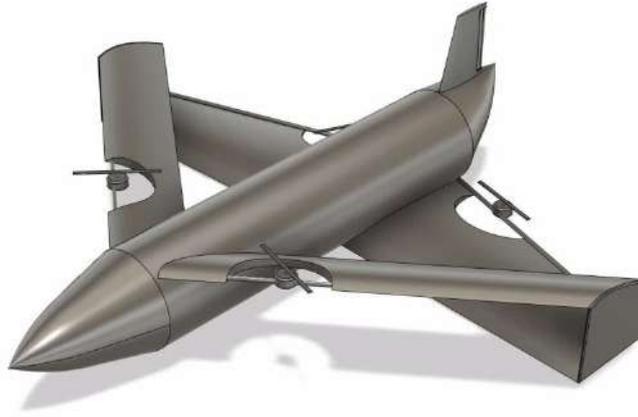


Рис. 1. Компьютерная модель беспилотного летательного аппарата

Fig. 1. The UAV computer model

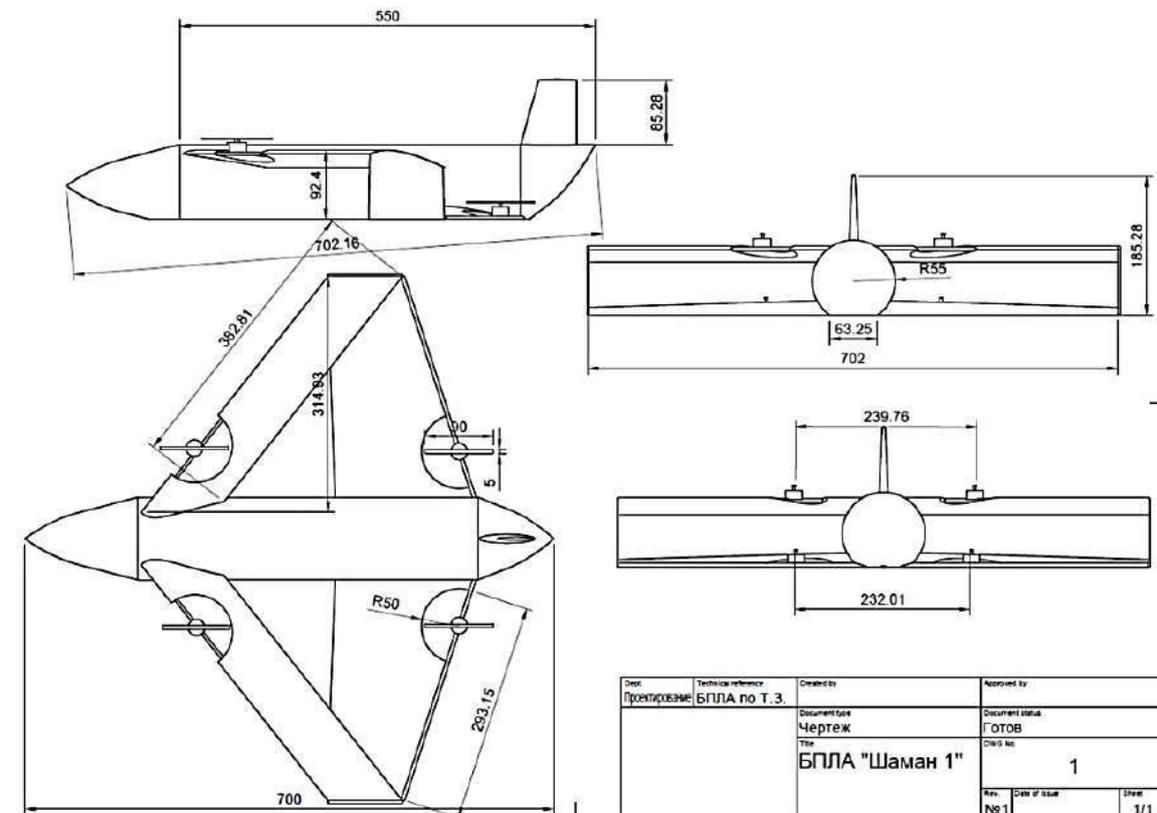


Рис. 2. Ассоциативный чертеж беспилотного летательного аппарата

Fig. 2. The UAV associative drawing

разца БПЛА в меньшем масштабе для исследования конструкции, летных качеств и проверки программного обеспечения.

Корпус модели создается из специального материала, предназначенного для авиамоделирования. Технология производства следующая:

1. На центральную пластину крепятся ребра (рис. 3).

2. Наклеивается обшивка (рис. 4).

Крыло производится по той же технологии, но с применением дополнительных ребер жесткости. Части со сложной геометрией, а именно нос и корма печатаются на 3D-принтере, в виде тонкостенных моделей.

Электроника тестовой модели БПЛА будет состоять из четырех связок: мотор-регулятор

(рис. 5.), подсоединенный к общему аккумулятору, платформы Arduino Mega и Raspberry Pi 4, камеры, датчики и сервоприводы [13, 14, 17].

Программное обеспечение модели беспилотного летательного аппарата

Реализация программного обеспечения модели БПЛА будет проходить по следующему алгоритму:

1. Создание симулируемого пространства в Autodesk CFD для тестирования возможности полета.

2. Создание условий взаимодействия между симуляцией полета и алгоритмом на Python.

3. Создание генетического алгоритма NEAT, где функции приспособленности будут вычисляться в ходе тестирования модели в симулированном пространстве.



Рис. 3. Пластина с ребрами

Fig. 3. Ribbed plate



Рис. 4. Обшивка

Fig. 4. Cladding



Рис. 5. Мотор-регулятор
Fig. 5. Regulation motor

4. Установка операционной системы для Raspberry PI 4.

5. Экспортирование весов алгоритма на плату Raspberry PI 4.

6. Написание программы для преобразования экспортируемых весов в алгоритм действий, по которым будет летать модель БПЛА.

7. Запуск на Raspberry PI 4.

Описание генетического алгоритма

Метод NEAT предназначен для уменьшения размерности пространства поиска параметров посредством постепенного развития структуры нейросети в процессе эволюции. Эволюционный процесс начинается с популяции маленьких, простых геномов (семян) и постепенно увеличивает их сложность с каждым новым поколением. Геномы семян имеют очень простую топологию: доступны (экспрессированы) только входные, выходные и смещающие нейроны. На начальном этапе скрытые узлы отсутствуют, чтобы гарантировать, что поиск решения начинается в пространстве параметров (весов связей) с наименьшим числом измерений. С

каждым новым поколением вводятся дополнительные гены, расширяющие пространство поиска решения, представляя новое измерение, которого ранее не существовало.

Таким образом, эволюция начинается с поиска в небольшом пространстве, которое можно легко оптимизировать, и при необходимости добавляет новые измерения. При таком подходе сложные фенотипы (решения) могут быть открыты постепенно, шаг за шагом, что намного результативнее, чем запуск поиска непосредственно в обширном пространстве окончательных решений. Естественная эволюция использует похожую стратегию, время от времени добавляя новые гены, которые делают фенотипы более сложными.

Схема генетического кодирования NEAT разработана таким образом, чтобы можно было легко сопоставлять соответствующие гены во время процесса. Геном NEAT является линейным представлением схемы связей кодированной нейронной сети (рис. 6).

Каждый геном представлен в виде списка генов связей, которые кодируют связи между узлами

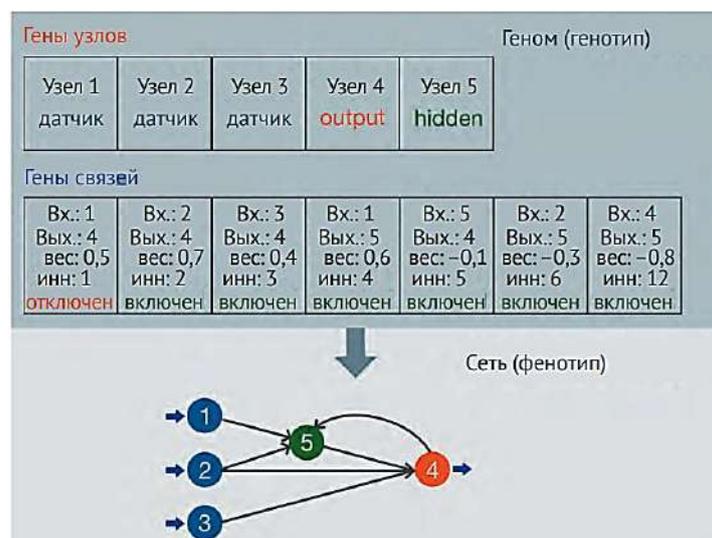


Рис. 6. Схема связей кодированной нейронной сети
Fig. 6. Connection scheme of the incoded nueral network

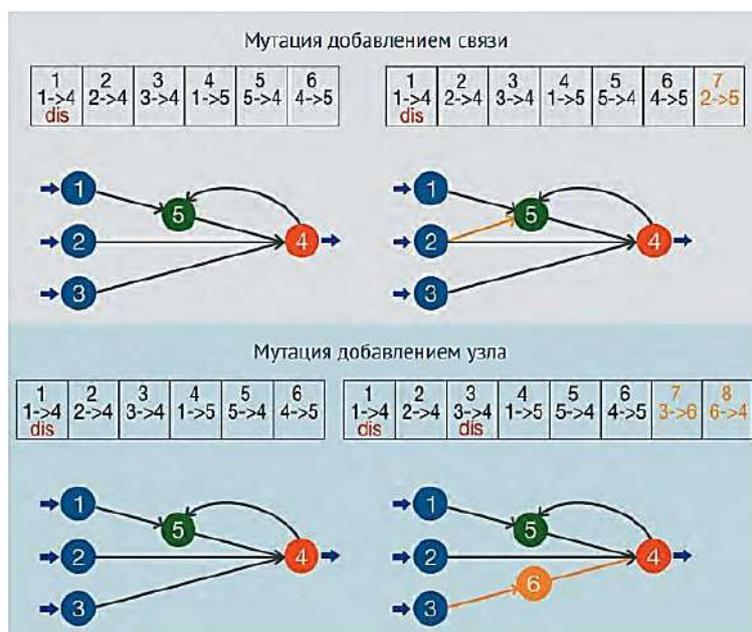


Рис. 7. Структурные мутации алгоритма NEAT
Fig. 7. Structural mutations of the NEAT algorithm

нейронной сети. Кроме того, существуют гены узлов, которые кодируют информацию о сетевых узлах, такую как идентификатор узла, тип узла и тип функции активации. Ген связи кодирует следующие параметры связи между узлами:

- идентификатор входного узла;
- идентификатор выходного узла;
- сила (вес) связи;
- бит, который указывает, включена (экспрессирована) связь или нет;
- номер обновления, который позволяет сопоставлять гены во время рекомбинации.

Специфический для NEAT оператор мутации может изменить силу (вес) связи и структуру сети. Существует два основных типа структурных мутаций: добавление новой связи между узлами; добавление нового узла в сеть. Структурные мутации алгоритма NEAT схематически изображены на рис. 7.

Когда оператор мутации применяется к геному NEAT, вновь добавленному гену (гену связи или гену узла) присваивается очередной номер обновления. В ходе эволюционного процесса геномы организмов в популяции постепенно становятся больше, и образуются геномы различных размеров. Этот

процесс приводит к тому, что в одинаковых позициях в геноме находятся разные гены связей, что делает процесс сопоставления между генами одного и того же происхождения чрезвычайно сложным.

Результаты исследования

Разработана концепция БПЛА типа биплан для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области. Конструктивные особенности аппарата позволят ему эффективно выполнять широкий класс задач в условиях неблагоприятных климатических условий. Создана компьютерная трехмерная модель и чертежи с помощью системы автоматизированного проектирования Autodesk Fusion 360. Реализован тестовый образец БПЛА и тестовое программное обеспечение к нему с использованием генетического алгоритма.

Заключение

Таким образом, проект БПЛА готов к тестированию своих летных качеств и программного обеспечения. Перед этим он прошел все этапы прототипирования: от идеи до тестовой модели.

Список литературы

1. Birkhoff G. Lattice Theory. N.Y. : American Mathematical Society, 1967. 418 p.
2. Fire Detection in Trains Using Image Analysis: A Survey and a Novel Approach. URL: https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/142862/3/2018_10_CINAR_DILARA.pdf (дата обращения: 15.01.2021).
3. Kuzmin O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Development of special mathematical software using combinatorial numbers and lattice structure analysis // Advances and Applications in Discrete Mathematics. 2018. Vol. 19, Iss. 3. P. 229–242.
4. Kuzmin O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structures // Advances and Applications in Discrete Mathematics. 2018. Vol. 19, Iss. 3. P. 183–193.
5. Mesarovic M., Mako D., Takahara Y. Theory of Hierarchical Multilevel Systems. New York : Academic Press, 1970. 294 p.

6. Ле Динь Дат, Руденко М.Г., Данеев А.В. БПЛА для проведения мониторинга объектов нефтегазовой промышленности // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2018. Т. 1. С. 75–77.
7. Лесные пожары в России. Статистика и антирекорды. URL: <https://tass.ru/info/6712527> (дата обращения: 20.02.2021).
8. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.
9. Stanley R.P. *Enumerative Combinatorics*. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 335 p.
10. Zakharov D.V., O.V. Kuzmin The application of relational interactive logic in control operation problems by the example of monitoring the server equipment of transport systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 760. P. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/0120589.
11. Балагура А.А., Кузьмин О.В. Обобщенная пирамида Паскаля и частично упорядоченные множества // *Обозрение прикладной и промышленной математики*. 2007. Т. 14, Вып. 1. С. 88–91.
12. Классификация БПЛА и системы их интеллектуального управления / С.И. Федоров, А.В. Хаустов, Т.М. Крамаренко и др. // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2016. № 74. С. 12–21.
13. Кузьмин О.В., Старков Б.А. Иерархические структуры типа треугольника Паскаля и построение навигационных маршрутов // *Актуальные проблемы науки Прибайкалья* : сб. ст. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2020. Вып. 3. С. 119–123.
14. Кузьмин О.В. Обобщенные пирамиды Паскаля и их приложения. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 2000. 294 с.
15. Кузьмин О.В., Серёгина М.В. Плоские сечения обобщенной пирамиды Паскаля и их интерпретации // *Дискретная математика*. 2010. Т. 22, Вып. 3. С. 83–93.
16. Лавлинская А.А., Филь Г.А., Камнев М.Д. Создание модели квадрокоптера-эколога // *Прикладные вопросы дискретного анализа* : сб. науч. тр. / под ред. О.В. Кузьмина. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2020. Вып. 5. С. 78–83.
17. Кузьмин О.В. Роль дискретной математики в научной работе старшеклассников // *Компьютер в школе*. 2000. № 2 (16). С. 12–14.
18. Кузьмин О.В., Лавлинская А.А., Филь Г.А., Камнев М.Д. Обнаружение лесных пожаров с помощью беспилотных летательных аппаратов // *Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО-20)* : материалы VII Междунар. конф. Улан-Удэ : Изд-во ВСГУТУ. 2020. С. 134–136.
19. Пеллинен В.А., Светлаков А.А. Применение беспилотников при анализе криогенных форм рельефа долины реки Сенца Окинского плоскогорья // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле*. 2020. Т. 31. С. 58–67.
20. Пятаева А.В. Сегментация областей задымления на видеопоследовательности // *Вестник СибГАУ*. 2016. № 3. С. 625–630.
21. Стасенко А.Л. *Физика полета*. М. : Наука, 1988. 144 с. (Б-чка «Квант». Вып. 70.). С. 18–22.
22. Хмельницкая К.А. Распознавание пламени с помощью оптоэлектронных систем в судостроении // *Тр. Крылов. гос. науч. центра*. 2019. Спец. вып. 2. С. 277–281.
23. Обнаружение лесных пожаров с помощью беспилотных летательных аппаратов / О.В. Кузьмин, А.А. Лавлинская, Г.А. Филь и др. // *Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО'20)* : материалы VII Междунар. конф. г. Улан-Удэ, 2020. С. 134–136.

References

1. Birkhoff G. *Lattice Theory*. N.Y. : *American Mathematical Society*, 1967. 418 p.
2. Fire Detection in Trains Using Image Analysis: A Survey and a Novel Approach. URL: https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/142862/3/2018_10_CINAR_DILARA.pdf Accessed: January 15, 2021.
3. Kuzmin O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Development of special mathematical software using combinatorial numbers and lattice structure analysis. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, 2018, Vol. 19, Issue 3, pp. 229–242.
4. Kuzmin O.V., Khomenko A.P., Artyunin A.I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structures. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, 2018, Vol. 19, Issue 3, pp. 183–193.
5. Mesarovi M., Mako D., Takahara Y. *Theory of Hierarchical Multilevel Systems*. New York: Academic Press, 1970. 294 p.
6. Le Dinh Dat, Rudenko M.G., Daneev A.V. BPLA dlya provedeniya monitoringa ob"yektov neftegazovoy promyshlennosti [UAVs for monitoring oil and gas facilities]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskiiy progress [Modern technologies and scientific and technical progress]*, 2018, Vol. 1, pp. 75–77.
7. Lesnyye pozhary v Rossii. Statistika i antirekordy [Forest fires in Russia. Statistics and anti-records]. URL: <https://tass.ru/info/6712527> Accessed: February 20, 2021.
8. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.
9. Stanley R.P. *Enumerative Combinatorics*. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 335 p.
10. Zakharov D.V., Kuzmin O.V. The application of relational interactive logic in control operation problems by the example of monitoring the server equipment of transport systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 760, pp. 1-8. DOI: 10.1088 / 1757-899X / 760/1/0120589.
11. Balagura A.A., Kuzmin O.V. Obobshchennaya piramida Paskalya i chastichno uporyadochennyye mnozhestva [Generalized Pascal pyramid and partially ordered sets]. *Obzreniye prikladnoy i promyshlennoy matematiki [Review of applied and industrial mathematics]*, 2007, Vol. 14, No. 1, pp. 88–91.
12. Fedorov S.I., Khaustov A.V., Kramarenko T.M. et al. Klassifikatsiya BPLA i sistemy ikh intellektual'nogo upravleniya [Classification of UAVs and their intelligent control systems]. *Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii*

[*Open information and computer integrated technologies*], 2016, No. 74, pp. 12–21.

13. Kuzmin O.V., Starkov B.A. Iyerarkhicheskiye struktury tipa treugol'nika Paskalya i postroyeniye navigatsionnykh marshrutov [Hierarchical structures of the Pascal triangle type and the construction of navigation routes]. *Aktual'nyye problemy nauki Pribaykal'ya* [Actual problems of science in the Baikal region]. Irkutsk: IGU Publ., 2020, pp. 119–123.

14. Kuzmin O.V. Obobshchennyye piramidy Paskalya i ikh prilozheniya [Generalized Pascal pyramids and their applications]. Novosibirsk: Nauka. Sib. izd. firma RAN, 2000. 294 p.

15. Kuzmin O.V., Seregina M.V. Ploskiye secheniya obobshchennoy piramidy Paskalya i ikh interpretatsii [Plane sections of the generalized Pascal pyramid and their interpretations]. *Diskretnaya matematika* [Discrete Mathematics], 2010, Vol. 22, No. 3, pp. 83–93.

16. Lavlinskaya A.A., Fil G.A., Kamnev M.D. Sozdaniye modeli kvadroptera-ekologa [Creation of a model of a quadcopter-ecologist]. *Prikladnyye voprosy diskretnogo analiza : sb. nauch. tr. Pod red. O.V. Kuz'mina* [Applied questions of discrete analysis: collection of articles. scientific. tr. In O.V. Kuzmina (ed.)]. Irkutsk: IGU Publ., 2020, Issue 5, pp. 78–83.

17. Kuzmin O.V. Rol' diskretnoy matematiki v nauchnoy rabote starsheklassnikov [The role of discrete mathematics in the scientific work of high school students]. *Komp'yuter v shkole* [Computer at school], 2000, No. 2(16), pp. 12–14.

18. Kuzmin O.V., Lavlinskaya A.A., Fil G.A., Kamnev M.D. Obnaruzheniye lesnykh pozharov s pomoshch'yu bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Detection of forest fires using unmanned aerial vehicles]. *Matematika, yeye prilozheniya i matematicheskoye obrazovaniye (MPMO-20). Materialy VII Mezhdunar. konf.* [Mathematics, its applications and mathematical education (MPMO-20). Materials of the VII International Conference]. Ulan-Ude: VSGUTU Publ., 2020, pp. 134–136.

19. Pellinen V.A., Svetlakov A.A. Primeneniye bespilotnikov pri analize kriogennykh form rel'yefa doliny reki Sentsa Okinskogo ploskogor'ya [The use of unmanned aerial vehicles in the analysis of cryogenic landforms of the Sentsa river valley of the Okinsky plateau]. // *Izv. Irkut. gos. un-ta. Ser. Nauki o Zemle* [Bulletin of the Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2020, Vol. 31, pp. 58–67.

20. Pyataeva A.V. Segmentatsiya oblastey zadymleniya na videoposledovatel'nosti [Segmentation of areas of smoke on the video sequence]. *Vestnik SibGAU* [Bulletin of SibGAU], 2016, No. 3, pp. 625–630.

21. Stasenko A.L. Fizika poleta [Physics of flight]. Moscow: Nauka Publ. Ch. ed. physical-mat. lit., 1988. 144 p. (B-chka "Quant". Iss. 70.), pp. 18–22.

22. Khmel'nitskaya K.A. Raspoznavaniye plameni s pomoshch'yu optoelektronnykh sistem v sudostroyenii [Flame recognition using optoelectronic systems in shipbuilding]. *Tr. Krylov. gos. nauch. tseotra* [Proceedings of the Krylov State Scientific Center], 2019, Special Issue 2, pp. 277–281.

23. Kuzmin O.V., Lavlinskaya A.A., Fil G.A. et al. Obnaruzheniye lesnykh pozharov s pomoshch'yu bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Detection of forest fires using unmanned aerial vehicles]. *Matematika, yeye prilozheniya i matematicheskoye obrazovaniye (MPMO'20) : materialy VII Mezhdunar. konf.* [Mathematics, its applications and mathematical education (MPMO'20). Materials of the VII International Conference]. Ulan-Ude, 2020, pp. 134–136.

Информация об авторах

Кузьмин Олег Викторович – д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой теории вероятностей и дискретной математики Института математики и информационных технологий, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, e-mail: quzminov@mail.ru.

Лавлинский Максим Викторович – аспирант Института математики и информационных технологий, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, e-mail: lavlinskimv@mail.ru

Information about the authors

Oleg V. Kuz'min – Dr.Sc.In Physics and mathematics, Head of Subdepartment of Probability Theory and Discrete Mathematics in the Institute of Mathematics and Information technologies, Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: quzminov@mail.ru

Maksim V. Lavlinskyi – Ph.D.student of Subdepartment in the Institute of Mathematics and Information technologies, Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: lavlinskimv@mail.ru