

История развития систем управления беспилотных воздушных судов

Юлия Сергеевна Ценч,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник;

Рашид Курбанович Курбанов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: smedia@vim.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Беспилотные воздушные суда успешно применяются и все более востребованы во многих сферах. Современные системы управления полетом позволяют создавать и программировать беспилотные аппараты для выполнения различных задач. (*Цель исследования*) Провести ретроспективный анализ развития систем управления с времен появления первых беспилотных летательных аппаратов до полетных контроллеров современных многофункциональных дронов. (*Материалы и методы*) Выполнили сбор и обработку данных с использованием историко-аналитического метода. Исследовали оригинальные работы отечественных и зарубежных авторов по литературным источникам, статьям в научных журналах, монографиям, материалам конференций, экспозиции музеев, фотоматериалам, а также исходного кода программного обеспечения, размещенного в открытом доступе. (*Результаты и обсуждение*) Исторический процесс развития беспилотных летательных аппаратов привел к появлению множества типов конструкций, обеспечивающих лучшие полетные характеристики и новые функции благодаря созданию систем управления полетом. В конструкции беспилотных систем внедрялись передовые достижения науки, техники и технологий, использовался мировой опыт в области теории и практики авиации. Миниатюризация систем управления полетом способствовала массовому распространению беспилотных аппаратов. Появление интеллектуальных режимов управления полетом обеспечило высокую автономность действий беспилотников. (*Выводы*) В рамках исследования составлены блок-схемы систем управления беспилотными воздушными судами по мере их развития, также составлена блок-схема, обобщающая эволюцию таких систем с периодизацией отдельных этапов. Выявлены девять таких этапов, в текущий момент основным направлением является разработка систем интеллектуального управления. Установили, что активное расширение областей применения и функций беспилотных летательных аппаратов связано с развитием и улучшением технологий микроэлектромеханических систем. Отметим основные полетные контроллеры, оказавшие большое влияние на усовершенствование беспилотных воздушных судов, спрогнозировали возможные перспективы развития полетных контроллеров.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, беспилотный летательный аппарат, система управления полетом, полетный контроллер, история развития.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №3. С. 4-15. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15. EDN YLCOYB.

History of Unmanned Aircraft Flight Controller Development

Yuliya S. Tsench,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;

Rashid K. Kurbanov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: smedia@vim.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Unmanned aircraft find successful applications across various fields and continue to see increasing demand in numerous sectors. Modern flight control systems empower the creation and programming of unmanned vehicles for a diverse range of tasks. (*Research purpose*) This study aims to retrospectively analyze the evolution of drone control systems, tracing their development from the early unmanned aerial vehicles to the flight controllers of modern multifunctional drones. (*Materials and methods*) The study employs the historical-analytical method for data collection and processing. This encompasses a thorough examination of original works by both domestic and foreign authors, including literary references, scientific journal articles, monographs, conference materials, museum exhibitions, photographic archives, and open-access software source code. (*Results and discussion*) The historical process of unmanned aerial vehicle development has led to the emergence of many types of designs that provide

better flight performance and new functions through the creation of flight control systems. Designers integrated worldwide aviation expertise and the latest advancements in science, engineering, and technology to enhance unmanned systems. The miniaturization of flight control systems has facilitated the widespread adoption and application of unmanned aerial vehicle in many domains. The introduction of intelligent flight control modes has ensured a high level of autonomy in drone operations. (*Conclusions*) In the course of the research into the historical development of control systems for unmanned aerial vehicles, block diagrams illustrating these control systems were created. Additionally, a block diagram was constructed outlining the evolution of these systems, with a periodization of individual stages. The block diagram includes nine stages; with the current emphasis primarily directed towards the advancement of intelligent control systems. The findings confirm that the extensive diversification of unmanned aerial vehicle applications and functionalities is closely linked to the continuous development and enhancement of micro-electro-mechanical systems technologies. The study identifies the key flight controllers that have significantly influenced the enhancement of unmanned aircraft and have outlined potential directions for the future development of flight controllers.

Keywords: unmanned aircraft, unmanned aerial vehicle, UAV, flight control system, flight controller, development history.

■ For citation: Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. Istoriya razvitiya sistem upravleniya bespilotnykh vozdushnykh sudov [History of unmanned aircraft flight controller development]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N3. 4-15 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15. EDN YLCOYB.

В 1903 году американцы братья Уилбер и Орвилл Райт совершили первый в мире управляемый человеком полет на аппарате тяжелее воздуха с двигателем собственной конструкции. Вскоре был изготовлен и первый беспилотный летательный аппарат. С тех пор технологии в области беспилотных полетов непрерывно совершенствовались, расширялись их сферы использования.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), в обиходе получившие название «дрон» (от англ. drone – трутень), или «беспилотник», – это летательные аппараты без экипажа на борту, которые могут управляться в полете дистанционно оператором, а также полностью автоматически [1]. Согласно определению в Воздушном кодексе РФ, беспилотным считается воздушное судно, управляемое и контролируемое в полете пилотом, находящимся вне борта такого воздушного судна (п. 5 ст. 32).

Создание беспилотного воздушного судна (БВС) изначально во многом было связано с решением военных задач, прежде всего для сокращения потерь летчиков и боевой техники [2]. Примерно до середины XX века БПЛА в основном представляли собой «летающую бомбу» или аппарат самолетного типа, несущего боевой снаряд. Из-за сложной и громоздкой механической конструкции возможности их применения были ограничены.

Развитие полупроводниковой электроники и появление доступных быстродействующих микроконтроллеров позволили разрабатывать автоматизированные системы управления полетом и существенно расширить функционал, что привело к миниатюризации как гражданских, так и военных БВС.

Благодаря этому в XXI веке получили новое развитие мультикоптеры уже как беспилотные аппараты, поскольку ранее их недостатком была сложная трансмиссия и необходимость постоянной электронной стабилизации в полете. Совершенствование мульт

тикоптеров в свою очередь стимулировало развитие полетных контроллеров, в том числе в различных гражданских целях.

Прогресс в этой области авиастроения продолжает набирать обороты. Рассмотрим процесс развития систем управления беспилотников, начиная от первых прототипов БПЛА до полетных контроллеров «малых» БВС весом до 30 кг. Сейчас такие модели находятся на пике популярности, используются для фото- и видеосъемки, наблюдения за промышленными, сельскохозяйственными и другими объектами.

Система управления полетом (полетный контроллер) – это микропроцессорное устройство управления летательным аппаратом (его газом, креном, тангажом и рысканьем).

Цель исследования – провести ретроспективный анализ появления и совершенствования систем управления полетом с первых беспилотных летательных аппаратов до современных дронов.

Материалы и методы. Работа выполнена на основе литературных и других источников информации по заявленной теме с использованием историко-аналитического метода. Исследовали оригинальные работы отечественных и зарубежных авторов: статьи в научных журналах, монографии, материалы конференций, экспозиции музеев, фотоматериалы и исходный код программного обеспечения в открытом доступе.

Результаты и обсуждение. До появления самолетов и вертолетов самым простым способом совершить полет было использование летательных аппаратов легче воздуха. Эксперименты с воздухоплавательными машинами в конце XIX – начале XX века увенчались определенными успехами: из наиболее известных достижений – это первый управляемый воздушный шар Альберта Сантос-Дюмона, изобретателя и пионера авиации, а также знаменитые многочисленные дирижабли, созданные Фердинандом фон Цеппелином (*рис. 1*).

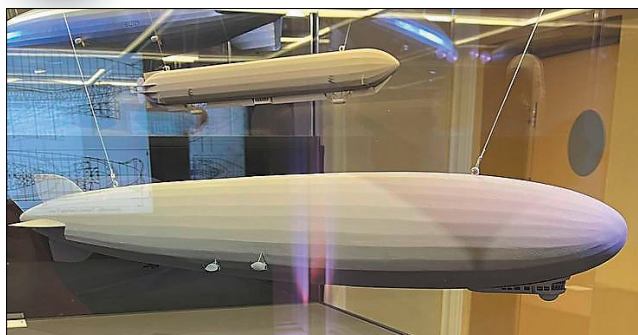


Рис. 1. Экспозиция «Граф Цеппелин и первые дирижабли» в Центре «Космонавтика и авиация» (Москва). Модели в масштабе 1:200

Fig. 1. Graf Zeppelin and the first airships on display at the Cosmonautics and Aviation Museum in Moscow. The models are scaled at 1:200

Наряду с такими аппаратами ученые и инженеры в разных странах конструировали, изготавливали и испытывали летательные аппараты, которые были тяжелее воздуха. Одним из первых был Карл Вильгельм Отто Лилиенталь, немецкий инженер, основоположник науки о планеризме, совершивший на своих планерах более 2 тысяч полетов. Мощные стимулы и большой рывок это направление получило в период мировых войн XX века [3].

1 этап – первые БПЛА. Первым летательным аппаратом, оснащенным автопилотом, стал «Автоматический аэроплан Хьюитта-Сперри», известный как «Летающая бомба Сперри» (рис. 2). Первые испытательные полеты на нем, сначала с летчиком в кабине, были совершены в 1917 году.



Рис. 2. Беспилотный аэроплан Хьюитта-Сперри
Fig. 2. Hewitt-Sperry unmanned aeroplane

Для полета аэроплана по заданному курсу заранее настраивались два бортовых гироскопа, пилот отвечал за взлет и посадку, а автопилот управлял другими этапами полета (рис. 3). Беспилотники Хьюитта-Сперри разрабатывались по заказу ВМФ США в годы Первой мировой войны, но в итоге так и не были использованы в военных операциях.

Исторически первым БПЛА считается *Kettering Beetle* («Жук Кеттеринга») [4]. Это была еще одна экспериментальная «летающая бомба» («воздушная торпеда»), разработанная и изготовленная Чарльзом Кет-

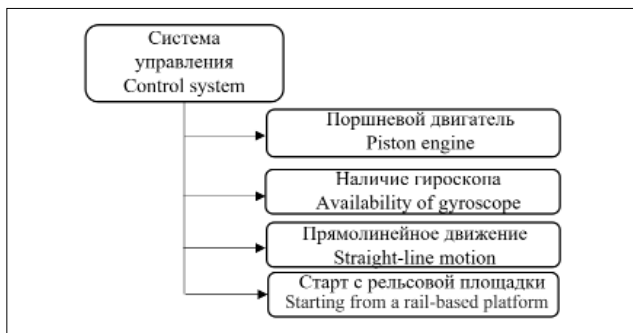


Рис. 3. Система управления Хьюитта-Сперри
Fig. 3. Hewitt-Sperry control system

терингом в 1917 году по заказу Армии США [5].

Небольшой биплан длиной 3,8 м, с размахом крыльев 4,5 м, предшественник современной крылатой ракеты, был рассчитан на дистанционное управление (рис. 4). Фюзеляж был деревянный, крылья изготовлены из плотного картона. Дешевый четырехцилиндровый двигатель мощностью 40 л.с. приводил самолет в движение.



Рис. 4. Модель Kettering Beetle в Национальном музее ВВС США
Fig. 4. Kettering Beetle model at the National Museum of the US Air Force

Перед запуском биплана устанавливали нужную скорость, направление ветра и расстояние, на которое должна доставляться бомба. Аппарат взлетал с небольшой повозки, поднявшись в воздух, летел к цели, управляемый с помощью вакуум-пневматической системы автопилотирования и подключенных к ней гироскопа и барометра. Гироскоп позволял стабилизировать заданный курс, высота полета контролировалась чувствительным барометром [6].

Система управления самолета Кеттеринга обеспечивала простейшие функции: удержание высоты и направления, измерение расстояния, выключение двигателя и сброс крыльев. Специальный механизм отсчитывал количество оборотов пропеллера, необходимое для преодоления заданной дистанции, после чего двигатель отключался, крылья отделялись и сна-

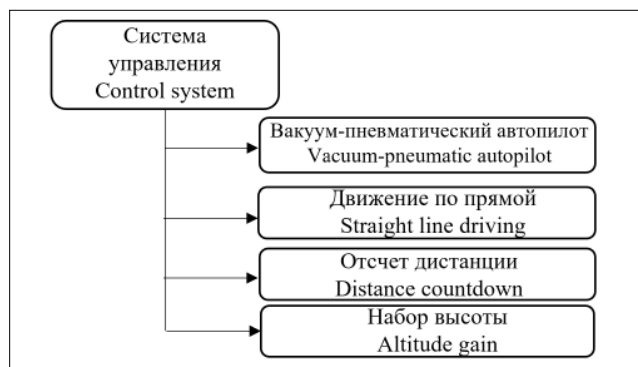


Рис. 5. Система управления автоматическим самолетом «Kettering Beetle»

Fig. 5. Control system of the Kettering Beetle unmanned airplane

ряд взрывчатим веществом падал на намеченную цель (рис. 5).

В ряде испытаний автоматический самолет показал себя хорошо, но не достаточно для того, чтобы считаться готовым оружием. Тем не менее, эта модель летательного аппарата стала важной вехой в развитии авиации и до Второй мировой войны оставалась засекреченной.

2 этап – радиоуправляемые БПЛА. Последователь Чарльза Кеттеринга, актер британского происхождения Реджинальд Денни, служивший во время Первой мировой войны в Королевских военно-воздушных силах, в 1930-е годы увлекся радиоуправляемыми самолетами. Совместно с партнерами он основал фирму *Radioplane Company*, и на предприятии в Южной Калифорнии в 1939 году был создан первый серийный БПЛА *Radioplane OQ-2* для военного применения (рис. 6).



Рис. 6. Radioplane OQ-2

Fig. 6. Radioplane OQ-2

По сути, это был первый дрон традиционной компоновки. Двухцилиндровый двигатель модели *Righter 0-15-1* развивал необходимую мощность 6 лошадиных сил, что обеспечивало максимальную скорость 137 км/ч при автономной работе примерно в течение одного часа [7]. Длина аппарата составляла 2,65 м,

размах крыльев 3,73 м, взлетный вес 47 кг.

Схема системы управления была простая – старт с катапульты и посадка с помощью автоматически срабатывающего парашюта. БПЛА был оснащен колесным шасси для смягчения удара о землю в момент приземления с парашютом. Самолет управлялся дистанционно оператором в пределах прямой видимости (рис. 7).

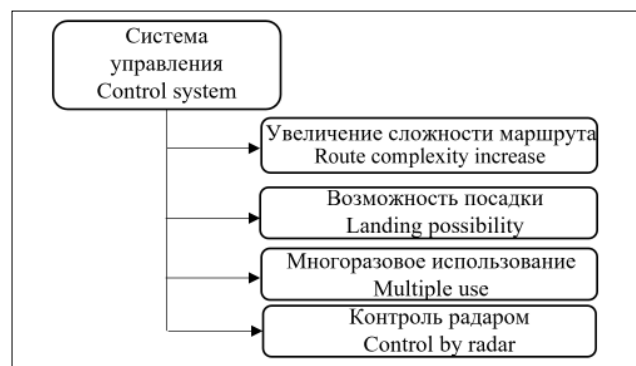


Рис. 7. Система управления полетом Radioplane OQ-2

Fig. 7. Radioplane OQ-2 control system

В основном *Radioplane OQ-2* использовался как мишень для тренировки зенитных войск. Это – первый дистанционно управляемый воздушный аппарат, поступивший в массовое производство [8]. Всего для армии и флота США было выпущено около 15 000 БПЛА. Модель послужила основой для других родственных марок беспилотников.

3 этап – летательные аппараты времен Второй мировой войны. На следующем этапе эволюции беспилотников появился боевой самолет-снаряд «Фау-1» (рис. 8).



Рис. 8. Беспилотный крылатый самолет-снаряд «Фау-1»

Fig. 8. Fi-1 unmanned cruise missile aeroplane

Модель «Фау-1» (Fi) была разработана в Германии в 1942-1944 годах как «оружие возмездия» (нем. *Vergeltungswaffe*) и стала первой неуправляемой крылатой ракетой с реактивным двигателем, которая производилась серийно и применялась в реальных боевых действиях. В ее создании важную роль сыграли изобретения более раннего периода, в частности, первый работающий импульсный двигатель, запатентованный в 1906 году русским инженером В.В. Караво-

динами, бесклапанный импульсный двигатель для применения в самолетах французского изобретателя Жоржа Марконне, запатентованный в 1908 году.

Длина «Фау-1» была около 8 м, не считая длинной выхлопной трубы реактивного двигателя, размах крыльев около 5,5 м, вес боезаряда 850 кг, скорость около 580 км/ч, средняя дальность полета 240 км. Для стабилизации полета были установлены гироскоп и стабилизаторы. Ракета летала только по прямой, перед стартом задавались параметры ее курса, высоты и дальности полета. Импульсно-реактивный двигатель не мог работать на скорости менее 240 км/ч, и ракету запускали с катапульты или самолета.

После старта снаряд летел автономно (рис. 9). Управление системой пилотирования осуществлялось с помощью пневматического устройства, которое работало на сжатом воздухе. Система управления обеспечивала заданные параметры на протяжении всего полета (рис. 10).

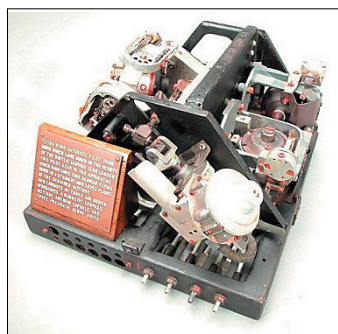


Рис. 9. Фрагмент автопилота для управления «Фау-1»
Fig. 9. Autopilot fragment for controlling Fi-1

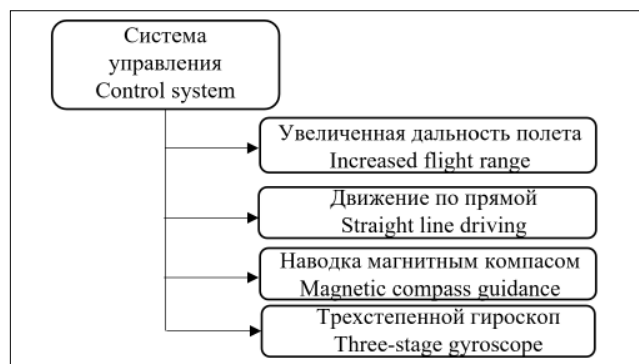


Рис. 10. Система управления «Фау-1»
Fig. 10. Fi-1 control system

Специальные регуляторы на автопилоте позволяли установить высоту полета перед запуском. Три пневматических гироскопа поддерживали курс и высоту, с помощью пневматических сервоприводов система была подключена электронным способом к компасу в носовой части для контроля изменений курса. По таймеру, приводимому в действие пропеллером, определялся момент отключения импульсно-реактивного двигателя и начала пикирования к цели [5, 9].

Всего было запущено с самолетов-носителей около 1176 ракет «Фау-1».

4 этап – беспилотный вертолет. Со временем в качестве беспилотных летательных аппаратов стали использовать вертолеты-мультикоптеры. Первым был принят на вооружение беспилотный вертолет *Gyrodyne QH-50 DASH* (рис. 11).



Рис. 11. Беспилотный вертолет Gyrodyne QH-50 DASH
Fig. 11. Gyrodyne QH-50 DASH unmanned helicopter

Gyrodyne QH-50 – дистанционно управляемый аппарат (*DASH – Drone Anti-Submarine Helicopter*) использовался ВМС США с середины 1950-х годов для обороны против подводных лодок, а позже как мишень для испытаний ракетного оружия [10]. Первый полет *Gyrodyne QH-50* был проведен в 1959 году, первое беспилотное приземление на борт корабля – 7 декабря 1960 года.

QH-50 DASH имел максимальную взлетную массу 1046 кг, развивал максимальную скорость 148 км/ч, его длина 3,9 м, высота 3 м, дальность полета 132 км, практический потолок полета 4939 м. Вертолет мог нести на борту две самонаводящиеся торпеды МК-44 [11]. Корпус представлял собой открытый двигатель без обшивки, два двухлопастных несущих винта, установленных соосно, ходовая часть была выполнена на салазках для устойчивой посадки на палубу или другую ровную поверхность.

Вертолет управлялся дистанционно с двух пультов с двух разных постов [12, 13]. Взлет и посадка контролировались визуально оператором, полет – по радиолокационным приборам (рис. 12).

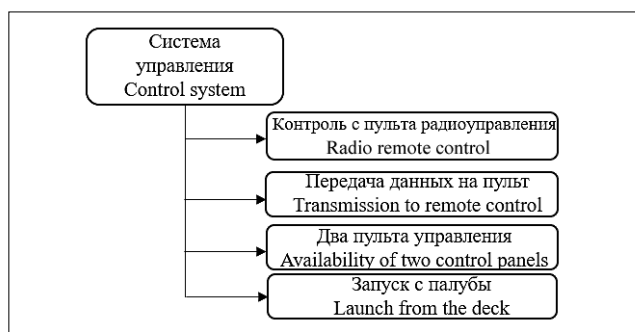


Рис. 12. Система управления Gyrodyne QH-50 DASH
Fig. 12. Gyrodyne QH-50 DASH control system

Вертолетный дрон полностью управлялся путем

изменения параметров (угла атаки) лопастей ротора и аппаратурой автоматической стабилизации. Всего было произведено 700 аппаратов *Gyrodyne QH-50* различных модификаций, в 1969 году ВМС США отказались от их применения из-за ненадежности аппаратуры управления и сокращения военного бюджета в связи с войной во Вьетнаме.

5 этап – полетные контроллеры для моделирования. В последующие 40 лет произошел стремительный рост «малых» беспилотных летательных аппаратов. В эту категорию входят военные, коммерческие и персональные БПЛА, а также системы дистанционного управления. Широкое распространение их связано с улучшением технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС). Если в прошлом гироскопы были громоздкими системами, то благодаря технологии МЭМС гироскопы и акселерометры стало возможным масштабировать как микросхемы. Претерпели ряд изменений и электродвигатели, на смену щеточных появились бесщеточные двигатели. С переходом от двигателей *inrunner* к *outrunner* отпала необходимость в редукторах, понижающих общую мощность.

Развитие БВС привело к появлению множества летательных аппаратов: это мультикоптеры, аппараты самолетного типа, гибриды, с миниатюрной системой управления и широким спектром возможностей.

Полетный контроллер представляет из себя печатную плату, оснащенную различными датчиками, которые получают команды от внешнего пилота и управляют полетом дрона. Некоторые полетные контроллеры имеют базовые датчики, такие как гироскоп и акселерометр, но в зависимости от моделей дополнительно могут комплектоваться барометром и компасом. Полетный контроллер также поддерживает подключение регуляторов двигателей, датчика *GPS/ГЛОНАСС*, светодиодов, сервоприводов, радиоприемника, телеметрии, камеры, видеопередатчика и других периферийных устройств беспилотника. По мере развития технологий полетные контроллеры становятся более компактными и функциональными, в них используются более производительные процессоры и оборудование.

История полетного контроллера дрона прослеживается с 2009 года, когда для управления был использован гироскоп и акселерометр из контроллеров *WiiMotionPlus* и *WiiNunchuk* от игровой консоли с платой *Arduino*. Это привело к развитию проекта *MultiWii* с открытым исходным кодом, в рамках которого в итоге была создана собственная плата контроллера полета (рис. 13), работающая на 8-битном процессоре *Atmel*.

На плате были установлены 8-битный микроконтроллер *ATMega328* либо *ATMega2560*, трехосевой гироскоп и трехосевой акселерометр в едином корпусе *MPU6050*, барометр *BMP085* и электронный магнит-

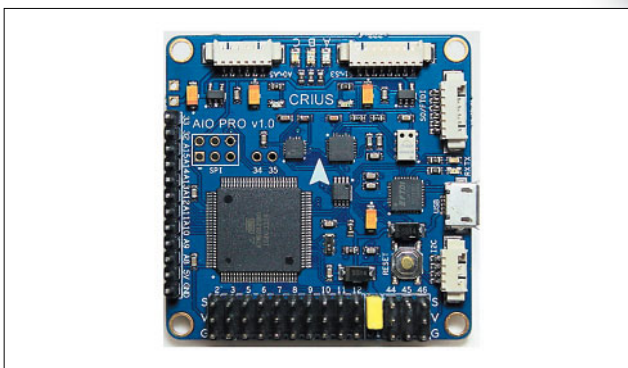


Рис. 13. Полетный контроллер *MultiWii*

Fig. 13. *MultiWii* flight controller

ный компас *HMC5883L*. Так как были любительские версии, то данные элементной базы приведены в общем виде и могут отличаться для различных версий плат. На контроллерах, выпускаемых после 2012 года, уже устанавливали 32-битный микроконтроллер (*STM32*), акселерометр *MPU6050* и барометр *MS5611*, которые, в отличие от предыдущих моделей, обеспечивали стабильный полет [14].

Используемые на плате бюджетные датчики необходимо максимально защищать от вибрации, оказывающей влияние на стабильность полета. Несмотря на всю гибкость, производительность *MultiWii* нестабильна, особенно по функции удержания высоты. В целом контроллер требует длительной настройки и поисков компромиссных решений (рис. 14).

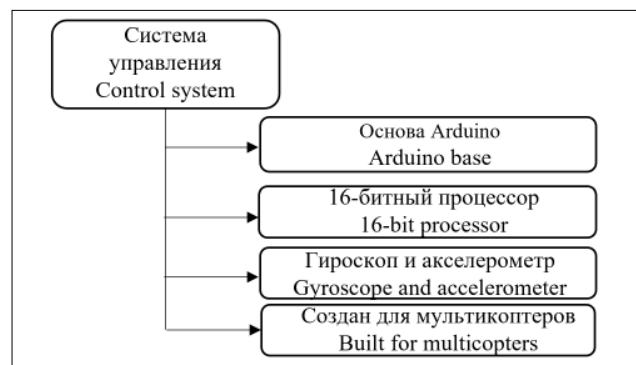


Рис. 14. Система управления полетного контроллера *MultiWii*

Fig. 14. *MultiWii* flight controller system

Хотя данный полетный контроллер считается устаревшим, существуют его современные ветви развития. Следующим шагом был переход на более производительные микроконтроллеры. В 2013 году была создана плата *Naze32* с 32-разрядным процессором, а исходный код *MultiWii* был портирован под названием «*Baseflight*» (рис. 15).

В 2014 году основатель проекта Доминик Клифтон (Гидра) модифицировал *Baseflight* и создал *Cleanflight*, что привело к бурному росту 32-битных полетных контроллеров. В 2015 году был создан *Betaflight* с использованием исходного кода *Cleanflight*

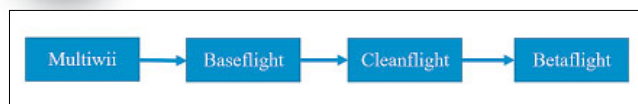


Рис. 15. Ветви развития проекта MultiWii
Fig. 15. Branches of the MultiWii project development

и внесением в него значительных изменений. *Betaflight* был в основном направлен на улучшение производительности *Cleanflight*, а также на добавление новых функций и возможностей. *Betaflight* обогнал по популярности *Cleanflight* и сейчас является самым распространенным программным обеспечением для полетных контроллеров с множеством функций и активной разработкой.

В 2009 году в рамках открытого проекта *OpenPilot* был создан полетный контроллер *CopterControl 3D* (рис. 16). *OpenPilot* – это программное обеспечение для полетных контроллеров, который создавался во многих проектах с разными разработчиками. *CopterControl 3D* (CC3D) предназначен для акробатических полетов с помощью датчика *GPS*. Программное обеспечение *OpenPilot* поддерживает плату *CC3D* и позволяет управлять БПЛА самолетного и мультироторного типов.

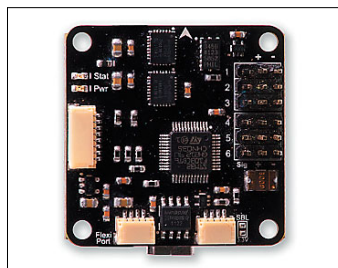


Рис. 16. Полетный контроллер *CopterControl 3D*
Fig. 16. *CopterControl 3D* flight controller

CopterControl 3D – один из самых ранних полетных контроллеров, использующий 32-битную архитектуру. На плате установлены микроконтроллер *STM32F103* и датчик акселерометр/гироскоп *MPU6000*. Плата имеет 6 портов, помеченные как входы (по одному контакту на каждый), и 6 портов, помеченные как выходы двигателя/сервопривода (по 3 контакта на каждый). Плата имеет поддержку прямого подключения к компьютеру по *USB*. Информация представлена в общем виде и может отличаться для разных версий плат (рис. 17).

У полетного контроллера были проблемы с поддержкой одновременной работы трех *MSP* портов, а также невозможность полета по *GPS* с официальной прошивкой. *OpenPilot* прекратил поддержку и более не выпускает обновления для *CopterControl 3D*. На данном контроллере были собраны многие БПЛА с функцией *FPV* (*First Person View*, «вид от первого лица»).

6 этап – решение от *ArduPilot*. Один из наиболее

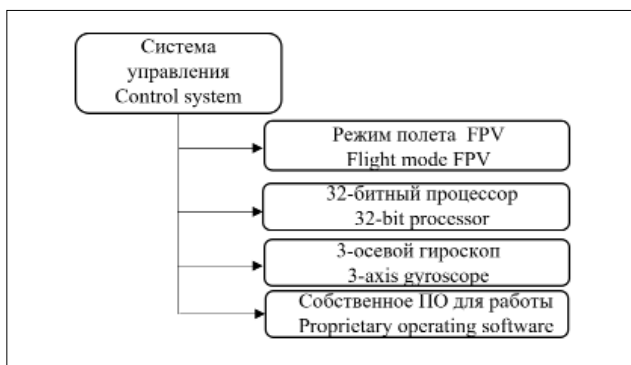


Рис. 17. Система управления *CopterControl 3D*
Fig. 17. *CopterControl 3D* control system

функциональных полетных контроллеров с открытым исходным кодом – *ArduPilot Mega* (*APM*), совместимый с *Arduino*. *ArduPilot* – это программное обеспечение с открытым исходным кодом для беспилотных аппаратов.

APM – автопилот профессионального качества, разработан на основе платформы *Arduino Mega* сообществом *DIY Drones*. *APM* работает с программным обеспечением *ArduPilot*. *DIY Drones* в 2007 году основал Крис Андерсон, а в 2009 году совместно с Хорди Муньосом была основана компания *3D Robotics* и выпущена первая плата *ArduPilot*. В 2010 году компания *3D Robotics* выпустила контроллер *APM1* (рис. 18).



Рис. 18. Полетный контроллер *ArduPilot Mega v1.0*
Fig. 18. *ArduPilot Mega v1.0* flight controller

На его базе доступна поддержка летающих, наземных и лодочных аппаратов. Полетный контроллер *ArduPilot Mega* позволяет совершать полет по точкам и обладает возможностью двухсторонней передачи телеметрических данных.

Полетный контроллер представляет собой микропроцессорное управляющее устройство. При этом алгоритмы управления реализуются программно. *ArduPilot* позволяет настроить управление и сформировать маршрут через программное обеспечение *Mission Planner*. Система управления состоит из 8-битного контроллера *ATMega2560* с датчиками *MS5611* и *MPU6000*. Барометр позволяет стабилизировать барометрическую высоту полета аппарата и автоматическую посадку в точке старта. С целью повышения

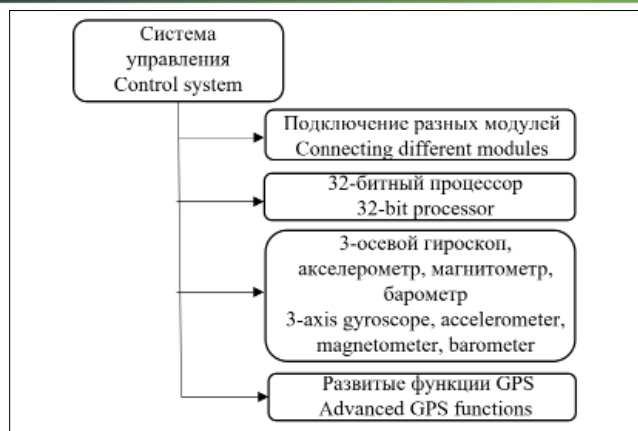


Рис. 19. Система управления ArduPilot Mega

Fig. 19. ArduPilot Mega control system

безопасности эксплуатации или выполнения специальных функций могут применяться и другие датчики (рис. 19). По сравнению с вышеописанными платами ArduPilot Mega более стабильный во время полета. Проект ArduPilot развивается, выходят другие полетные контроллеры и программное обеспечение с открытым исходным кодом, постоянно обновляется с улучшенными функциями.

7 этап – новое поколение полетных контроллеров. В поисках автономного полета Лоренц Мейер преследовал очень амбициозный план: чтобы дроны летали автономно с помощью компьютерного зрения. В 2009 году команда Pixhawk разработала полетный контроллер и выпустила свое программное обеспечение с открытым исходным кодом. Вскоре были выпущены программное обеспечение для управления полетом Pixhawk 4 (PX4), протокол связи MAVLink и программное обеспечение QGroundControl для настройки БПЛА. В начале 2013 года данная открытая аппаратная платформа начала внедряться различными компаниями, в частности 3D Robotics. Параллельно команда разрабатывала устройства первого и второго поколения (Flight Management Unit version 2: FMU v2), под названием Pixhawk (рис. 20).



Рис. 20. Полетный контроллер Pixhawk 1

Fig. 20. Pixhawk 1 flight controller

Контроллер поддерживает как летающие аппараты, так и наземные, и подводные, дополнительные модули и стандарты для их связи и получил большую популярность из-за своей универсальности (рис. 21).



Рис. 21. Система управления Pixhawk

Fig. 21. Pixhawk control system

Оригинальный Pixhawk сочетает в себе PX4 FMUv2 с платой ввода-вывода PX4 IO v2. Он работает на 32-битном процессоре STM32F427 с отказоустойчивым сопроцессором STM32F103, имеет 256 КБ ОЗУ. PX4, совместим с наземной станцией управления QGroundControl, в котором задаются и считываются различные параметры, настраивается полетное задание. Pixhawk устанавливает стандарты сборки дронов с точки зрения аппаратного обеспечения, микроконтроллеров и интерфейсов.

8 этап – готовые решения. В 2010 году была выпущена первая версия готового БВС AR. Drone компании Parrot (рис. 22).



Рис. 22. БВС Parrot AR. Drone

Fig. 22. Parrot AR. Drone unmanned aerial system (UAS)

AR. Drone быстро стал популярным благодаря открытой архитектуре, управлению с помощью планшета или смартфона. В 2012 году была выпущена обновленная версия AR Drone 2.0 с четырьмя моторами мощностью 14,5 Вт, максимальной скоростью полета 18 км/ч и массой дополнительной полезной нагрузки 150 г. Полетный контроллер был на базе 32-битного процессора ARM Cortex A8. На борту были две камеры: основная для съемки и режима FPV с разрешением 720p и дополнительная с разрешением 240p [15, 16]. Открытая архитектура проекта позволяла к готовому аппарату подключать дополнительные компоненты (рис. 23).

9 этап – интеллектуальное управление. Следующий этап становления готовых решений БВС связан с появлением уникальных разработок компании DJI. Главной среди них стал первый квадрокоптер Phantom, выпущенный в 2013 году [17, 18]. Квадрокоптер легко управлялся с планшета или смартфона.

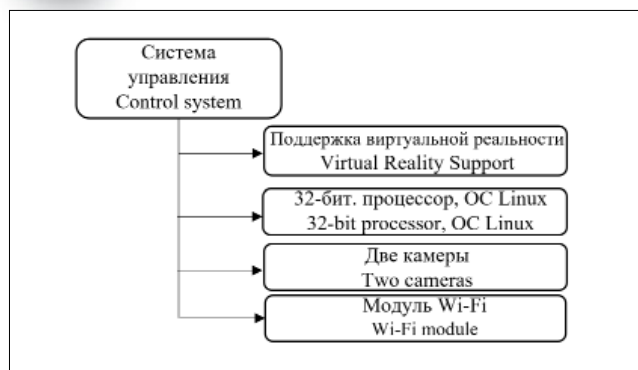


Рис. 23. Система управления Parrot AR. Drone
Fig. 23. Parrot AR. Drone control system

После успеха в том же году был выпущен *Phantom 2* различных модификаций, содержащий обновленный набор функций системы управления. Кроме квадрокоптеров компания *DJI* выпускала подвесы *Zenmuse* и другие продукты (рис. 24).



Рис. 24. БВС DJI Phantom 1 и 2

Рис. 24. DJI Phantom 1 and 2 unmanned aerial systems (UAS)

Система управления *DJI Phantom 1* и *2* основана на полетном контроллере *Naza-M Lite* с базовыми функциями стабилизации и навигации. Бортовой компьютер работает на базе аппаратной и программной платформы, разработанной *DJI* (рис. 25).

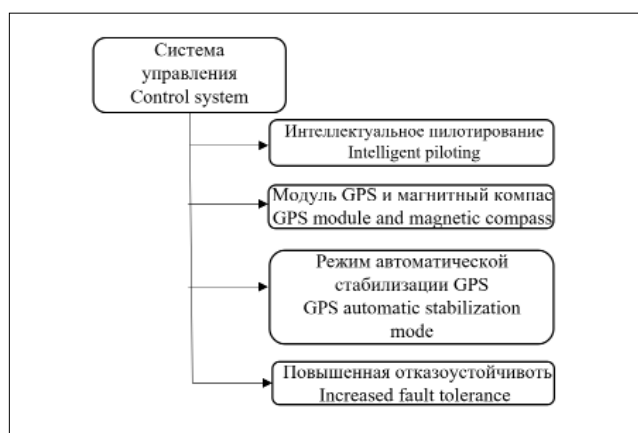


Рис. 25. Система управления DJI Phantom 1 и 2

Fig. 25. DJI Phantom 1 and 2 control system

У *DJI Phantom 2* полетный контроллер получил функцию автовозврата домой (*RTH – Return to home*). Были увеличены скорость и продолжительность полета, добавлены модуль *Wi-Fi*, возможность регулировки наклона камеры, поддержка смартфонов, план-

шетов и умных очков [19].

Выпущенный в 2015 году *Phantom 3* завоевал очередной успех. Работа компании *DJI* в направлении готовых решений продолжилась выпуском в ноябре 2016 года *Phantom 4pro* [20]. В связи с проблемой столкновения во время полета была повышена безопасность за счет системы обнаружения препятствий. Увеличились скорость и время полета. *DJI Phantom 4pro* предназначался для художественной съемки, но нашел более широкое применение, в том числе в сельском хозяйстве. С помощью специально разработанных подвесов устанавливалась мультиспектральная камера, которая позволяет получить данные о состоянии растений и спрогнозировать урожайность [15, 16] (рис. 26).



Рис. 26. БВС DJI Phantom 4 pro

Fig. 26. DJI Phantom 4 pro unmanned aerial system (UAS)

Система управления полетом *Phantom 4pro* представляет собой комбинацию аппаратных и программных компонентов, обеспечивающих пилотирование, навигацию и управление всеми аспектами полета [21]. Встроенная камера высокого разрешения с механическим затвором обеспечивает эффективную аэрофотосъемку. Интеллектуальная функция «возврат домой» позволяет ориентироваться в пространстве и, выбрав кратчайший путь, автономно возвращаться в точку взлета [22, 23]. Управление пользователем и настройка системы осуществляются через специальное

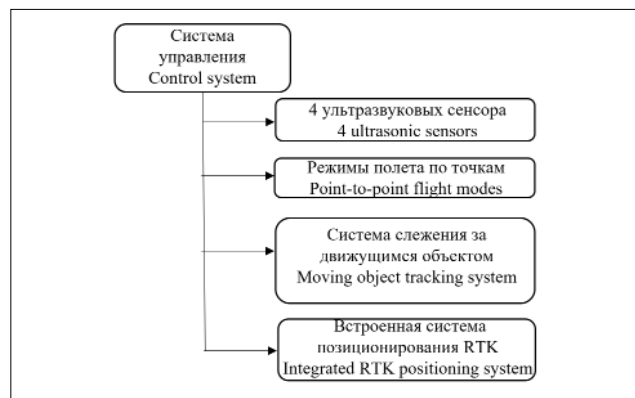


Рис. 27. Система управления DJI Phantom 3 и 4

Fig. 27. DJI Phantom 3 and 4 control system

мобильное приложение, которое одновременно облегчает потоковую передачу видео с бортовой камеры (рис. 27) [24].

В результате исторического анализа развития систем управления беспилотников была составлена блок-схема основных этапов их хронологического развития (рис. 28).

Дальнейшие перспективы. По мере развития по-

ских университетов предложили реализовывать технологию так называемого роевого интеллекта (*Swarm Intelligence*). Беспилотники с использованием технологий искусственного интеллекта смогут обучаться и адаптироваться на основе ситуации, в которой оказались. Также возрастет автономность БВС, сейчас они управляются людьми, а через несколько лет потребность в операторах исчезнет. Интеллектуальные платформенные решения будут выполнять заданные миссии самостоятельно.

Выводы

Исторический анализ развития систем управления полетом беспилотных летательных аппаратов показывает, что над ними работали несколько поколений ученых, инженеров и испытателей из разных стран. Такая работа началась еще во время Первой мировой войны. БПЛА появились в 1917 году, а система управления полетом обеспечивала минимальные возможности. В 1930-е годы появились первые образцы дистанционно пилотируемых летательных аппаратов. Система управления также была простой, а дистанционное управление осуществлялось только в пределах прямой видимости.

В период Второй мировой войны в 1942-1944 годах были созданы первые крылатые ракеты, система управления полетом которых обеспечивала увеличенную дальность полета и большую точность курса. В 1950-е годы были разработаны беспилотные радиоуправляемые вертолеты. Система управления позволяла в процессе полета контролировать вертолет по приборам радиолокационным способом, а также обеспечивала взлет и посадку с горизонтальной поверхности.

История миниатюрного полетного контроллера БПЛА начинается с 2009 года. Было выделено четыре ключевых полетных контроллера, получивших широкое распространение и повлиявших на дальнейшее развитие возможностей БПЛА. Полетные контроллеры обеспечивали множество функций, и на этом этапе был реализован автономный полет. Полетные контроллеры установили стандарты создания БПЛА и программного обеспечения для них.

В 2010 году было выпущено первое беспилотное воздушное судно как готовое решение. Квадрокоптер управлялся с помощью планшета или смартфона и обеспечивал полет в режиме FPV (вид от первого лица). С 2013 года появились БВС с интеллектуальными режимами полета и системой обнаружения препятствий.

Дальнейшее развитие систем управления полетом БВС связана с внедрением технологий искусственного интеллекта. Интеллектуальная система управления расширит функции пилотирования и автоматизации беспилотных устройств, что позволит их использовать в различных сферах.

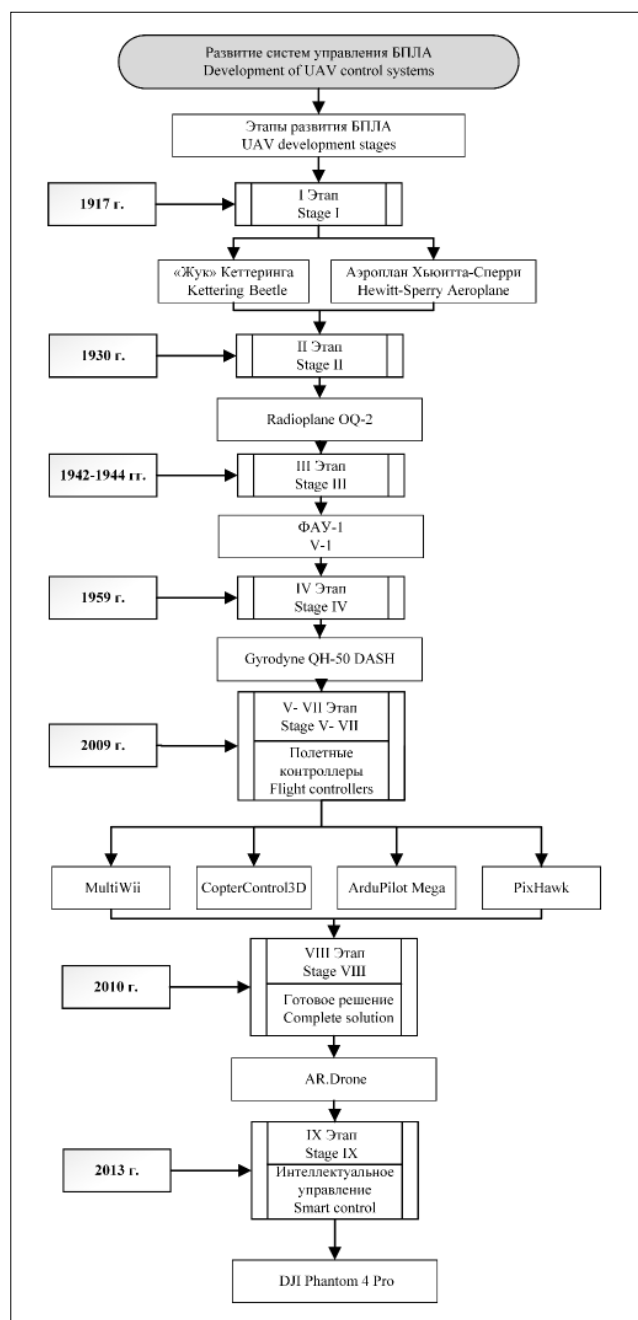


Рис. 28. Блок-схема развития систем управления БПЛА
Fig. 28. Block diagram of UAV control systems development

летных контроллеров их производительность и возможности стремительно растут. Это позволит внедрить в систему управления полетом искусственный интеллект. Исследователи из британских и француз-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авиация: Энциклопедия / Гл. ред. Г.П. Свищёв. М.: Большая российская энциклопедия, 1994. С. 108-116.
2. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45.
3. Ценч Ю.С., Маслов Г.Г., Трубилин Е.Г. К истории развития сельскохозяйственной техники // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2018. N3(47). С. 117-123.
4. Годжаев З.Д., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Ценч Ю.С., Зубина В.А. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (Прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. N4(137). С. 220-229.
5. Арзамасцев А.А. Задачи маршрутизации для беспилотных мультироторных летательных аппаратов. *Материалы и методы инновационных исследований и разработок: сб. статей Международной научно-практической конференции*. Оренбург: Аэтерна. 2018. С. 5-8.
6. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. N15(4). С. 6-10.
7. Костомахин М.Н., Курбанов Р.К., Кынев Н.Г. Точное земледелие расширяет свои границы // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2018. N3. С. 7-9.
8. Kim J., Kim I., Ha E., Choi B. UAV Photogrammetry for Soil Surface Deformation Detection in a Timber Harvesting Area. *Forests*. 2023. N14. 98-104.
9. Степанов С.В., Волков С.С., Набатчиков А.В. Моделирование системы питания БПЛА ближнего действия // *Математика и математическое моделирование: сб. материалов XVI Всероссийской молодежной научно-инновационной школы*. Саров: Интерконтакт. 2022. С. 31-32.
10. Beranek C.T., Roff A., Denholm B., et al. Trialling a real-time drone detection and validation protocol for the koala (*Phascolarctos cinereus*). *Australian Mammalogy*. 2020.
11. Yeom J., Jung J., Chang A., et al. Comparison of vegetation indices derived from UAV data for differentiation of tillage effects in agriculture. *Remote Sensing*. 2019. N11. 1548.
12. Chen A., Orlov-Levin V., Meron M. Applying high-resolution visible-channel aerial imaging of crop canopy to precision irrigation management. *Agricultural Water Management*. 2019. Vol. 216. 196-205.
13. Cholula U., da Silva J.A., Marconi T., et al. Forecasting yield and lignocellulosic composition of energy cane using unmanned aerial systems. *Agronomy*. 2020. 10(5). 718.
14. Guan S., Fukami K., Matsunaka H., et al. Assessing correlation of high-resolution NDVI with fertilizer application level and yield of rice and wheat crops using small UAVs. *Remote Sensing*. 2019. 11(2). 112.
15. Ammar A., Koubaa A. Deep-learning-based automated palm tree counting and geolocation in large farms from aerial geo-tagged images. *Agronomy*. 2021. 11(8). 1456.
16. McCraine C.D., Samiappan S., Czarnecki J.M.P., Darrin M.D. Plant density estimation and weeds mapping on row crops at emergence using low altitude UAS imagery Proceedings. Conference: *Autonomous air and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping*. 2019.
17. Przybilla H.-J., Gerke M., Dikhoff I., Ghassoun Y. Investigations on the geometric quality of cameras for UAV applications using the high precision UAV test field zollern colliery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 2019. N42(2/W13). 531-538.
18. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. N012062.
19. Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Application of vegetation indexes to assess the condition of crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. N0140411.
20. Young D.J.N., Koontz M.J., Weeks J.M. Optimizing aerial imagery collection and processing parameters for drone-based individual tree mapping in structurally complex conifer forests. *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. N13(7). 1447-1463.
21. Albeaino G., Gheisari M., Franz B.W. A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain. *Journal of Information Technology in Construction*. 2019.
22. Kim J.S., Hong Y. Accuracy Analysis of Photogrammetry Based on the Layout of Ground Control Points Using UAV. *Journal of the Korean Cartographic Association*. 2020. N20(2). 41-55.
23. Kapicioglu H.S., Hastaoglu K.O., Poyraz F., Gül Y. Investigation of topographic effect in ground control point selection in UAV photogrammetry: Gaziantep. *International conference on innovative engineering applications*. 2018. 1174-1178.
24. Tamouridou A.A., Alexandridis T.K., Pantazi X.E., et al. Application of multilayer perceptron with automatic relevance determination on weed mapping using UAV multispectral imagery. *Sensors*. 2017. N17. 2307.

REFERENCES

1. Aviatsiya: Entsiklopediya [Aviation: Encyclopedia]. Ch. Ed. G.P. Svishchyov. Moscow: Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya. 1994. 108-116 (In Russian).
2. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologiy i mashin [Digitization aspects of the system of technologies and machines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian).
3. Tsench Yu.S., Maslov G.G., Trubilin E.G. K istorii razvitiya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [To the history of agricultural machinery development]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018. N3(47). 117-123 (In Russian).
4. Godzhaev Z.D., Shevtsov V.G., Lavrov A.V., Tsench Yu.S., Zubina V.A. Strategiya mashinno-tekhnologicheskoy mod-

- ernizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii do 2030 goda (Prognoz) [Strategy of Russian agricultural machinery modernization until 2030 (forecast)]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N4(137). 220-229 (In Russian).
5. Arzamastsev A.A. Zadachi marshrutizatsii dlya bespilotnykh mul'tirotnykh letatel'nykh apparatov. Materialy i metody innovatsionnykh issledovaniy i razrabotok: sb. staty Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Routing problems for unmanned multi-rotor aircraft. Materials and methods of innovative research and development: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. Orenburg: Aeterna. 2018. 5-8 (In Russian).
 6. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Tsifrovye tekhnologii i robotizirovannye tekhnicheskie sredstva dlya sel'skogo khozyaystva [Digital technologies and robotic devices in the agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2021. N15(4). 6-10 (In Russian).
 7. Kostomakhin M.N., Kurbanov R.K., Kynev N.G. Tochnoe zemledelie rasshiryaet svoi granitsy [Technical support for modernization of AIC]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2018. N3. 7-9 (In Russian).
 8. Kim J., Kim I., Ha E., Choi B. UAV Photogrammetry for Soil Surface Deformation Detection in a Timber Harvesting Area. *Forests*. 2023. N14. 98-104 (In English).
 9. Stepanov S.V., Volkov S.S., Nabatchikov A.V. Modelirovanie sistemy pitaniya BPLA blizhnego deystviya [Modeling the power supply system of short-range UAVs]. *Matematika i matematicheskoe modelirovanie: sb. materialov XVI Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-innovatsionnoy shkoly*. Sarov: Interkontakt. 2022. 31-32.
 10. Beranek C.T., Roff A., Denholm B., et al. Trialling a real-time drone detection and validation protocol for the koala (*Phascogaleus cinereus*). *Australian Mammalogy*. 2020 (In English).
 11. Yeom J., Jung J., Chang A., et al. Comparison of vegetation indices derived from UAV data for differentiation of tillage effects in agriculture. *Remote Sensing*. 2019. N11. 1548 (In English).
 12. Chen A., Orlov-Levin V., Meron M. Applying high-resolution visible-channel aerial imaging of crop canopy to precision irrigation management. *Agricultural Water Management*. 2019. Vol. 216. 196-205 (In English).
 13. Cholula U., da Silva J.A., Marconi T., et al. Forecasting yield and lignocellulose composition of energy cane using unmanned aerial systems. *Agronomy*. 2020. 10(5). 718 (In English).
 14. Guan S., Fukami K., Matsunaka H., et al. Assessing correlation of high-resolution NDVI with fertilizer application level and yield of rice and wheat crops using small UAVs. *Remote Sensing*. 2019. 11(2). 112 (In English).
 15. Ammar A., Koubaa A. Deep-learning-based automated palm tree counting and geolocation in large farms from aerial geotagged images. *Agronomy*. 2021. 11(8). 1456 (In English).
 16. McCrae C.D., Samiappan S., Czarnecki J.M.P., Darrin M.D. Plant density estimation and weeds mapping on row crops at emergence using low altitude UAS imagery Proceedings. Conference: *Autonomous air and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping*. 2019 (In English).
 17. Przybilla H.-J., Gerke M., Dikhoff I., Ghassoun Y. Investigations on the geometric quality of cameras for UAV applications using the high precision UAV test field zollern colliery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 2019. N42(2/W13). 531-538 (In English).
 18. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. N012062 (In English).
 19. Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Application of vegetation indexes to assess the condition of crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. N0140411 (In English).
 20. Young D.J.N., Koontz M.J., Weeks J.M. Optimizing aerial imagery collection and processing parameters for drone-based individual tree mapping in structurally complex conifer forests. *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. N13(7). 1447-1463 (In English).
 21. Albeaino G., Gheisari M., Franz B.W. A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain. *Journal of Information Technology in Construction*. 2019 (In English).
 22. Kim J.S., Hong Y. Accuracy Analysis of Photogrammetry Based on the Layout of Ground Control Points Using UAV. *Journal of the Korean Cartographic Association*. 2020. N20(2). 41-55 (In English).
 23. Kapicioglu H.S., Hastaoglu K.O., Poyraz F., Gül Y. Investigation of topographic effect in ground control point selection in UAV photogrammetry: Gaziantep. *International conference on innovative engineering applications*. 2018. 1174-1178 (In English).
 24. Tamouridou A.A., Alexandridis T.K., Pantazi X.E., et al. Application of multilayer perceptron with automatic relevance determination on weed mapping using UAV multispectral imagery. *Sensors*. 2017. N17. 2307 (In English).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – научное руководство;

Курбанов Р.К. – обработка данных.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – research supervision;

Kurbanov R.K. – processing of data.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.07.2023

25.08.2023