

EDN: JPLEGX

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19



Научная статья

УДК 656.7.076



Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения

Юлия Сергеевна Ценч,

доктор технических наук, главный научный сотрудник;

Рашид Курбанович Курбанов,

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

Наталья Ивановна Захарова,

младший научный сотрудник,

e-mail: smedia@vim.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Развитие технологий БПЛА позволяет совершать фото- и видеосъемку и при этом не отвлекаться на процесс управления полетом. (*Цель исследования*) Выполнить ретроспективный анализ совершенствования систем управления полетом и развития аппаратуры для аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель с середины XIX века по настоящее время. (*Материалы и методы*) Выполнили систематический обзор литературы с помощью историко-аналитического метода. Изучили оригинальные работы отечественных и зарубежных авторов: монографии, научные журналы, материалы конференций, экспозиции музеев, фотоматериалы и исходный код программного обеспечения в открытом доступе. (*Результаты и обсуждение*) Выделено по шесть этапов развития средств аэрофотосъемки и систем управления полетом. Полученная периодизация основана на изменении вида камер, типа системы управления и конструкций летательных аппаратов. В каждом из этапов рассмотрены основные камеры, системы управления и летательные аппараты, используемые для выполнения задач в сельском хозяйстве. (*Выводы*) Установили параметры средств аэрофотосъемки, менявшиеся за 165 лет: фотоматериал, пространственное разрешение изображений, спектральное разрешение, масса и крепление камер, тип затворов и их приводы, инерциальный блок управления, встроенный GPS/ГЛОНАСС приемник, сенсор освещенности. Выявили параметры системы управления полетом беспилотного летательного аппарата, менявшиеся за 106 лет: тип управления полетом, число датчиков для стабилизации полета, система обнаружения препятствий, размер системы управления полетом, режимы полета, метод взлета/посадки, интерфейсы для навесного оборудования. Предположили, что дальнейшая интеллектуализация и миниатюризация систем управления полетом и аэросъемочной аппаратуры приведет к повышению производительности работы БПЛА и уменьшению экономических затрат на проведение мониторинга сельскохозяйственных биообъектов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, аэрофотосъемка, аэрофотография, аэрофотоаппарат, фотограмметрия, система управления полетом, полетный контроллер, дистанционное зондирование, история развития.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19. EDN: JPLEGX.

Scientific article

Evolution of Flight Control Systems and Aerial Photography in Unmanned Agricultural Aircraft

Yuliya S. Tsench,

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;

Rashid K. Kurbanov,

Ph.D.(Eng.), leading researcher;

Natalia I. Zakharova,

junior researcher,

e-mail: smedia@vim.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The advancement of UAV technologies has enabled the automated capture of photos and videos, eliminating the need for manual intervention in flight control. (*Research purpose*) This research aims to conduct a retrospective analysis of the evolution of flight control systems and the development of aerial photography equipment for agricultural land, covering the period from the mid-19th century to present. (*Materials and methods*) A systematic literature review was conducted using the historical-analytical

method. The paper examines original works by both domestic and international authors, including monographs, scientific journals, conference proceedings, museum exhibitions, photographic archives, and open-source software code. (*Results and discussion*) The paper identifies six distinct phases in the development of aerial photography and flight control systems. The classification is based on key innovations in camera types, control systems, and aircraft designs. Each phase highlights the predominant cameras, control systems, and aircraft utilized for agricultural applications. (*Conclusions*) Over the past 165 years, notable changes have occurred in aerial photography parameters, including the type of photographic material, image spatial and spectral resolution, camera weight and mounting, shutter types and their mechanisms, inertial control units, integrated GPS/GLONASS receivers, and light sensors. In terms of flight control systems for UAVs, significant developments over the last 106 years include variations in flight control types, the number of flight-stabilizing sensors, obstacle detection systems, size of the flight control units, flight modes, and takeoff/landing techniques, along with interfaces for attachments. It is anticipated that future intellectualization and miniaturization of flight control systems will not only boost UAV performance but also reduce the economic costs associated with the aerial monitoring of agricultural biological assets.

Keywords: unmanned aerial vehicle, aerial photography, aerial cameras, photogrammetry, flight control system, flight controller, remote sensing, developmental history.

■ **For citation:** Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19. EDN: JPLEGX.

Крупномасштабное картографирование территорий России и европейских стран в XVIII веке базировалось на методе триангуляции [1]. Для создания топографических карт использовали мензурную съемку местности. Стремление человека продвинуться в области картографии привело к поиску новых технологий исследования сложных рельефов.

В 1783 г. официально запатентовано успешное испытание воздушного шара [2]. Позже летательные аппараты легче воздуха стали применяться для наблюдения с высоты птичьего полета. 7 января 1839 г. во Французской академии наук был представлен доклад о новом способе создания изображения, именно этот день считается официальной датой изобретения фотографии [3]. А первые аэрофотографии были получены уже в середине XIX века [4]. Процесс развития технологий расширил сферу применения средств воздухоплавания. В 1903 г. совершен первый в мире управляемый человеком полет на аппарате тяжелее воздуха. Каждый год интерес к аэрофотосъемке только возрастал [5]. Аэрофотосъемка стала неотъемлемой частью дистанционного зондирования и в последнее десятилетие активно используется в сельском хозяйстве [6]. Развитие микроэлектроники способствовало миниатюризации аэрофотосъемочного оборудования и современных систем управления полетом, что позволило создавать беспилотные аппараты для выполнения различных задач, в том числе в сельском хозяйстве [7].

Цель исследования – выполнить ретроспективный анализ совершенствования систем управления полетом и развития аппаратуры для аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель с середины XIX века по настоящее время.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Проведен систематический обзор литературы путем применения историко-аналитического метода, чтобы описать развитие систем управления полетом беспилотных летательных аппаратов и аппаратуры для аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель. Объекты исследования – оригинальные работы отечественных и зарубежных авторов: монографии, научные журналы, материалы конференций, экспозиции музеев, фотоматериалы и исходный код программного обеспечения в открытом доступе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. История аэрофотосъемки берет начало в 1858 г., когда французский фотограф Гаспар Феликс Турнашон сделал первую в мире аэрофотографию с привязного воздушного шара. В то время для фиксации изображений использовались мокрые коллодионные пластины. Внедрение технологии с применением сухой пластины уже не требовало наличия фотолаборатории в корзине воздушного шара. В следующие несколько лет фотографические технологии продолжали развиваться, разработаны камеры с увеличенным размером пластины (1886 г.) и выдержкой (1908 г.). В это время фотографы использовали различные технические средства для поднятия камеры в воздух: воздушных змеев, птиц, ракеты [8], при этом воздушные шары оставались основным средством (*рис. 1*).

Прогресс в области авиастроения способствовал развитию аэрофотоаппаратов. В 1908 г. впервые записано видео с пилотируемого самолета братьев Райт. В России фотоаппарат был установлен на борт самолета в 1910 г. В аэрофотоаппарате конструкции Сергея Алексеевича Ульянина использовались кассеты из шести стеклянных пластин. Снимок фиксировался на стеклянной пластине разме-



Рис. 1. Пример воздушного шара XIX века. Экспозиция Центрального музея Военно-Воздушных Сил РФ. Фото из архива авторов

Fig. 1. Example of a 19th century balloon displayed at the Central Museum of the Russian Air Force. Photographs from the authors' archive

ром 13×13 см, шесть пластин входили в одну кассету. Камера устанавливалась на биплан «ПТА № 1».

В том же году изобретатель Чарльз Кеттеринг, вдохновленный успехами братьев Райт, предложил создать летательный аппарат, управляемый не человеком, а часовым механизмом. В 1917 г. был разработан экспериментальный образец, названный «Жук Кеттеринга», который считается исторически первым беспилотным летательным аппаратом (БПЛА). Средства аэрофотосъемки на данный БПЛА еще не устанавливались.

Создание первого пленочного полуавтоматического аэрофотоаппарата в 1911 г. позволило создавать топографические карты достаточно высокого качества. Аэрофотоаппарат Владимира Филипповича Потте имел перематываемую пленку и мог записать 50 последовательных снимков размером 13×18 см. Объектив имел фокусное расстояние 210 мм, размер диафрагмы составлял 1:4,5. Аэрофотоаппарат применялся для военных целей [9].

В Первую мировую войну фотография широко использовалась как средство документирования военных действий. Развитие аэрофотосъемки позволило по-новому увидеть и оценить тактику боя, а также продвинуться в области картографии. Были созданы первая специализированная аэрофотокамера (1915 г.) и фотоаппарат с центральным затвором внутри объектива (1916 г.).

С 1921 г. накопленный опыт аэрофотосъемки стали применять для картирования сельскохозяйственных полей. В 1926 г. в Нижегородской губер-

нии были успешно применены самолеты гражданской авиации для обнаружения очагов возгорания лесных массивов [10].

В 1936 г. в США была поставлена задача: создать полную и систематическую аэрофотосъемку сельскохозяйственных угодий страны (рис. 2) [11]. В том же году впервые была осуществлена цветная аэрофотосъемка одновременно в СССР и Канаде.



Рис. 2. Аэрофотография фермы в Луизиане, США. 1936 г.

Fig. 2. Aerial photograph of a farm in Louisiana, USA. 1936. <https://www.alamy.com/aerial-view-of-louisiana-us-department-of-agriculture-experimental-pecan-farm-1936-image594348791.html>

В этот период советскими учеными под руководством Ю.В. Рябушкина были разработаны аэрофотоаппараты «АФА-13», «АФА-33», «АФА-3С», «АФА-И», «НАФА-19», сменившие камеру Потте. Камеры «АФА» отличались по размеру кадра, фокусному расстоянию, типу затвора (шторный и центральный) и применялись для плановой, перспективной и широкоформатной съемки. Семейство камер «АФА-33» было самым востребованным среди всех аэрофотоаппаратов и имело самый массовый выпуск (рис. 3).

К 1931 г. Советский Союз опередил остальную Европу по площади своей территории, сфотографированной с неба. С огромным технологическим прогрессом в области пилотируемой авиации, аэрофотоаппаратуры, картографирования в первой половине XX века аэрофотосъемка быстро стала инструментом реализации широкого круга операций в сельском хозяйстве [12].

В начале XX века БПЛА имели сложную и громоздкую механическую конструкцию, которая ограничивала возможности их применения. Система управления полетом БПЛА была механическая, отвечала за удержание высоты и направления, включение двигателей и выбрасывание парашюта для посадки. В 1939 г. создан первый дистанционно управляемый воздушный аппарат *Radioplane OQ-2*, который в основном использовался в каче-



Рис. 3. Советские аэрофотоаппараты 1930-х годов: а – «АФА-33/75»; б – «НАФА-3с/50». Экспозиция Центрального музея Военно-Воздушных Сил РФ. Фото из архива авторов

Fig. 3. Soviet aerial cameras of the 1930s: a – AFA-33/75; b – NAFA-3c/50. Displayed at the Central Museum of the Russian Air Force. Photographs from the authors' archive

стве мишени для тренировки среди военных и аэрофотоаппаратура не устанавливалась [13].

После Второй мировой войны возобновился выпуск фотоаппаратов для гражданской сферы, применялся опыт и улучшались технологии, разработанные в ходе военных действий. Официально первым снимком Земли, сделанным из космоса, считается изображение, полученное 24 октября 1946 г. ВВС США. Оно было снято на 35-миллиметровую кинокамеру, прикрепленную к ракете «Фау-2». Управление системой пилотирования осуществлялось с помощью пневматического устройства, которое работало на сжатом воздухе. Система управления обеспечивала заданные параметры на протяжении всего полета.

В период восстановления СССР (1949-1955 гг.) после Второй мировой войны активно осваивались и развивались целинные земельные ресурсы. В эти годы авиация выполняла большой объем работ в агропромышленном комплексе, и было введено понятие «ПАНХ» – применение авиации в народном хозяйстве. В сельском хозяйстве выделялись восемь основных направлений использования авиационной техники [10]:

- аэрофотосъемка местности и отдельных участков сельского и лесного хозяйства;
- срочная доставка сельскохозяйственных грузов;
- пассажирская перевозка работников;
- химическое опрыскивание для борьбы с вредителями, болезнями растений и с сорной и нежелательной растительностью;
- разбрасывание удобрений;
- аэросев;
- орошение посевов;
- обнаружение и борьба со степными и лесными пожарами.

Для решения топографических задач были усовершенствованы и созданы новые камеры семейства «АФА»: «АФА-41» и «АФА-42» [14]. Их разработкой занимались специалисты отдела Ю.В. Рябушкина Красногорского завода им. С.А. Зверева.

Активное использование авиационной техники требовало ее дальнейшего развития. В 1950-е годы в качестве беспилотных летательных аппаратов стали использовать вертолеты-мультикоптеры. Беспилотный вертолет *Gyrodyne* выпускался в различных комплектациях, в том числе с телевизионной камерой, работающей в режиме реального времени. Вертолет управлялся дистанционно с двух разных пультов. Операторы контролировали взлет и посадку, а полет проходил по радиолокационным приборам.

Развитие космических технологий во второй половине XX века способствовало интенсивной разработке аппаратуры для аэросъемки и их носителей. Первый искусственный спутник Земли «Спутник-1» был запущен в 1957 г. в Советском Союзе [15]. Цветное фотографирование стало новым средством изучения поверхности Земли и происходящих на ней явлений [16]. Появился термин «дистанционное зондирование» (1960-е годы), так как понятие «аэрофотосъемка» больше не являлось адекватным термином для описания потоков данных, генерируемых новыми технологиями.

В 1960 г. появился первый в мире образец аналитического фотограмметрического прибора. В 1972 г. был запущен первый искусственный спутник Земли для дистанционного зондирования *Landsat-1*. На нем было установлено различное оборудование, в том числе четырехканальный мультиспектральный сканер для получения радиометрических изображений Земли с пространственным разрешением 80 м/пиксель. Данные собирались в диапазоне 500-1100 нм. В сельском хозяйстве начали применять эти данные для создания вегетационных карт [17]. С их помощью решались задачи аграрного производства:

- мониторинг и контроль сельскохозяйственных полей;
- оценка земельных ресурсов;
- оценка загрязнения окружающей среды;
- прогнозирование урожайности.

Наряду со спутниковыми изображениями проводилась аэрофотосъемка с самолетов. На портале *Earth Explorer* собраны данные аэрофотосъемки земель США, начиная с 1985 г. (рис. 4). В Великобритании также использовали аэрофотосъемку для исследования состояния сельскохозяйственных культур [18].

К 1980-м годам достижения в области камер, их цифровизация, миниатюризация и другие технологии увеличили доступность и широкое использо-



Рис. 4. Аэрофотосъемка сельскохозяйственных полей штата Техас, США. 31 марта 1985 г.

Fig. 4. Aerial photography of agricultural fields in Texas, USA, March 31, 1985. Earth Explorer <https://earthexplorer.usgs.gov/scene/metadata/full/5e83d8e4870f4473/ARIVFJGC0010002>

вание аэрофотосъемки. Наиболее значительными достижениями в технологии беспилотных камер стали разработка цифровых камер (1981 г.) с записью изображений в цифровом виде на кассету и позже на *sd*-карту, подвесных систем стабилизации (1988-1988 гг.), матрицы нового поколения – *CMOS* (1990-е годы), а также стандарта сжатия изображений – *jpeg* (1992 г.). К началу 2000-х годов разработанные технологии позволили устанавливать камеры на беспилотные аппараты взлетной массой до 30 кг.

Период 1960-2000 гг. отмечен стремительным ростом «малых» беспилотных летательных аппаратов. Широкое распространение их связано с улучшением технологий микроэлектроники. Зарождение современных беспилотных летательных аппаратов мультикоптерного типа началось с разработки миниатюрного полетного контроллера в 2009 г. Тогда для управления БПЛА применяли гироскоп и акселерометр от игровой консоли с платой *Arduino*. Это привело к развитию проекта *MultiWii* с открытым исходным кодом. С 2009 по 2015 г. происходило развитие полетных контроллеров. В основном они использовались для моделирования, также выпускались готовые беспилотники. Первая готовая версия БПЛА была выпущена в 2010 г.

Следующий этап становления готовых решений БПЛА связан с появлением уникальных разработок компании *DJI*. Именно она в январе 2013 г. выпустила первый серийный коммерческий квадрокоптер *Phantom 1* с установкой камеры *GoPro*. Контроль полетом осуществлялся с помощью пульта дистанционного управления, а система автопилота возвращала и обеспечивала посадку БПЛА в точку взлета. В октябре 2013 г. *DJI* выпустила *Phantom 2*

Vision, который называли «летающей камерой». Квадрокоптер имел интегрированную камеру, управление осуществлялось с помощью пульта через полетный контроллер. В последующие годы были выпущены 14 модификаций данной модели, управляемых с пульта дистанционного управления и смартфона.

В ноябре 2016 г. был представлен БПЛА *DJI Phantom 4pro*, имеющий встроенную камеру с механическим затвором, которая крепилась с помощью трехосевого подвеса. Камера с механическим затвором позволяет уменьшить дисторсию и смазанность изображений по сравнению с электронным затвором при аэрофотосъемке. *DJI Phantom 4pro* стал одним из самых востребованных квадрокоптеров для аэрофотосъемки, в том числе в геодезии и сельском хозяйстве [19]. Он оснащен встроенными датчиками: барометром, акселерометром, магнитометром, гироскопом, датчиком визуального позиционирования, инфракрасным и ультразвуковым датчиками. Данный коптер имеет интеллектуальное управление с использованием навигационной системы *GPS/ГЛОНАСС*, включающее полет челночным методом, систему датчиков для облета препятствий, возврата домой и автоматической посадки. Управление и настройка системы осуществляются через специальное мобильное приложение, которое одновременно обеспечивает потоковую передачу видео с бортовой камеры.

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2017 г. стал применяться *DJI Phantom 4pro* для мониторинга сельскохозяйственных угодий. На данную модель БПЛА разработан подвес для крепления миниатюрной мультиспектральной камеры *Parrot Sequoia* и получен патент *RU2728846C1*. Камера имеет датчик *IMU*, четыре спектральные камеры и одну *RGB* с электронным затвором, сенсор освещенности с встроенным *GPS/ГЛОНАСС* приемником. С помощью разработанного решения были проведены исследования селекционных посевов (рис. 5) [20].

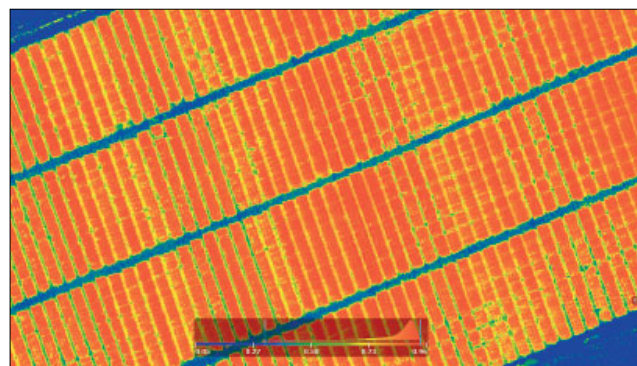


Рис. 5. Вегетационная карта NDVI селекционных посевов сои, Рязанская область, 14 июня 2018 г.

Fig. 5. NDVI vegetation map of soybean breeding crops, Ryazan region, June 14, 2018

В 2019 г. был выпущен промышленный серийный квадрокоптер *DJI Matrice 200 v2*, который стал наиболее востребованным. Он обеспечивал стабильный полет в сложных полевых условиях, поддерживал интеллектуальные режимы полета и дополнительные интерфейсы для навесного оборудования в виде различных камер, лазерных сканеров и бортовых компьютеров (рис. 6).



Рис. 6. БВС *DJI Matrice 200 V2* над полем картофеля, Московская область, 3 августа 2022 г.

Fig. 6. UAV *DJI Matrice 200 V2* over a potato field, Moscow region, August 3, 2022

В наше время развитие камер направлено на уменьшение их габаритов и увеличение пространственного и спектрального разрешения. Установка бортовых компьютеров с обученными нейронными сетями способствует анализу фото- и видеоматериала в режиме реального времени.

Усовершенствование аэрофотоаппаратов и методов их крепления на воздушное судно позволило повысить качество и детализацию аэрофотографий. В 1980-е годы начали развиваться геоинформационные системы, предназначенные для хранения и анализа данных аэрофотосъемки. В настоящее время платформы *EarthExplorer*, *Google Earth Engine* позволяют работать с изображениями, полученными за последние 40 лет. В США многие штаты оцифровали аэрофотоснимки полученные начиная с 1930-х годов (рис. 7).

Проведенный ретроспективный анализ показывает, что процесс развития систем управления полетом и средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель происходил скачкообразно, что связано с политическими, социальными и экономическими факторами, влиявшими на общий уровень технологического прогресса. В развитии средств аэрофотосъемки выделены шесть этапов, связан-



Рис. 7. Фрагменты аэрофотографий полей штата Нью-Джерси: а – 1930; б – 2020, Географическая информационная сеть Нью-Джерси, США

Fig. 7. Fragments of aerial photographs of New Jersey fields: а – 1930; б – 2020. <https://njgin.nj.gov/njgin/edata/imagery/index.html>

ных с изменением типа камер и летательных аппаратов, на которые они устанавливались. В развитии систем управления полетом выделено также шесть этапов, которые связаны с изменением типа системы управления и конструкцией БПЛА.

На основе таблицы создан график, показывающий ключевые этапы установки камеры на борт БПЛА (рис. 8). В 1940-е годы замечен скачок в развитии систем управления полетом БПЛА, позволивший установить камеру на борт и сделать изо-

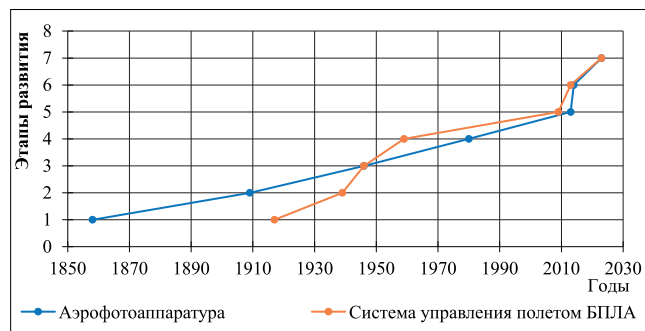


Рис. 8. Развитие систем управления полетом БПЛА и средств аэрофотосъемки

Fig. 8. Advancements in UAV flight control systems and aerial photography equipment

Таблица		Table	
ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОТОМ И СРЕДСТВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ EVOLUTIONARY STAGES OF FLIGHT CONTROL SYSTEMS AND AERIAL PHOTOGRAPHY EQUIPMENT			
Развитие средств аэрофотосъемки		Развитие систем управления полетом БПЛА	
1858-1908	Первые экспериментальные разработки аэрофотоаппаратуры	—	
1909-1945	Оборудование для аэрофотосъемки с самолетов	1917	Первые БПЛА
		1939	Радиоуправляемые БПЛА
		1939-1945	Летательные аппараты времен Второй мировой войны
1946-1979	Начало развития дистанционного зондирования Земли	1959	Беспилотный вертолет
1980-2012	Развитие цифровых аэрофотоаппаратов для съемки с борта БПЛА	2009	Полетные контроллеры для моделирования
Январь 2013	Установка миниатюрной камеры на квадрокоптер взлетной массой до 30 кг	2013	Готовые решения с интеллектуальным управлением
Октябрь 2013	Интегрированная камера в квадрокоптер взлетной массой до 30 кг		

бражения на большой высоте. Дальнейшее развитие системы управления полетом и средств аэрофотосъемки позволяло безопасно совершать полеты и управлять камерой, но эти процессы выполнялись изолированно.

В начале 2013 г. миниатюрные камеры устанавливались на БПЛА, но все еще не было возможности управлять камерой с пульта управления беспилотника. С конца 2013 г. интеграция камеры в систему управления полетом позволила акцентировать внимание внешнего пилота на фото- и видеосъемку и не отвлекаться на управление БПЛА.

По мере развития полетных контроллеров их производительность и возможности стремительно растут. В ближайший период (2025-2030 гг.) это позволит внедрить в систему управления полетом искусственный интеллект. Беспилотники с использованием технологий искусственного интеллекта смогут обучаться и адаптироваться на основе ситуации, в которой оказались. Интеллектуальные платформенные решения будут выполнять заданные миссии самостоятельно.

Тенденции развития камер свидетельствуют о дальнейшем увеличении пространственного разрешения и их гибридизации. Разработка подобных платформ будет способствовать увеличению производительности БПЛА, снижению стоимости съемки гектара сельскохозяйственных полей и стремительному распространению технологии цифрового дистанционного зондирования в аграрной сфере.

Выводы

За 165 лет (1858-2023 гг.) развития средства аэрофотосъемки претерпели многочисленные изменения:

- фотоматериал, на который фиксировалось изображение, прошел шесть этапов развития (мокрые и сухие коллоидонные пластины, стеклянные пластины, пленка, кассета, *sd*-карта);

- повысилось пространственное разрешение изображений (от сотен метров до нескольких сантиметров на пиксель);

- увеличилось спектральное разрешение камер (черно-белые, цветные *RGB*, инфракрасные, спектральные изображения);

- уменьшился вес камер (от нескольких килограммов до граммов);

- усовершенствовались крепление камер (в руках фотографа, жесткое крепление к борту самолета, системы стабилизации камер — одно-, двух-, трехосевые подвесы);

- изменился тип затворов и их приводы (шторный, центральный и механический, электронный);

- появился *IMU* (инерциальный блок управления);

- появился встроенный *GPS*/ГЛОНАСС приемник;

- появился сенсор освещенности у мультиспектральных камер.

Системы управления полетом беспилотного летательного аппарата появились 106 лет назад в 1917 г., при этом основное развитие получили в последние десять лет (2013-2023 гг.):

- улучшился тип управления полетом (механическое, с пульта дистанционного управления, со смартфона);

- увеличилось число датчиков, с помощью которых стабилизируется полет (барометр, гироскоп, акселерометр, магнитометр, лазерный дальномер, инфракрасный, ультразвуковой и видео-поточный датчики);

- появилась система обнаружения препятствий;

- уменьшился размер системы управления полетом (от нескольких метров до сантиметров);

- улучшились режимы полета (ручной режим, полет с видом от первого лица, автоматический и интеллектуальный режимы полета);

- усовершенствовался метод взлета/посадки (с рельсовой площадки, с парашюта, в ручном, автоматическом и интеллектуальном режимах);

• появление интерфейсов для навесного оборудования (камеры, лазерные сканеры и бортовые компьютеры).

Дальнейшее развитие систем управления полетом и аэросъемочной аппаратуры будет способство-

вать повышению производительности и эффективности работы БПЛА, уменьшению экономических затрат на проведение аэрофотосъемки сельскохозяйственных биообъектов и распространению технологии в аграрной сфере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанченко А.Л. Виды картографических произведений, созданных по результатам межевания земель России в середине XIX века // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2018. Т. 62. N2. С. 152-156. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-2-152-156.
2. Kim M.G. Balloon mania: news in the air. *Endeavour*. 2004. 28(4). 149-155. DOI: 10.1016/j.endeavour.2004.04.010.
3. Сергиенко Д. Дагеротип – «зеркало с памятью» // *Троцкий вариант – Наука*. 2020. N14(308). С. 12-13.
4. Краснопевцев Б.В. Основные события истории фотограмметрии и воздушной съемки до 1918 года // *Геодезия и картография*. 1998. N8. С. 55-59.
5. Collier P. Photogrammetry and aerial photography. *International Encyclopedia of Human Geography* (second edition). 2020. 91-98. DOI: 10.1016/B978-0-08-102295-5.10583-9.
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. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
7. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 4-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
8. Skoog A.I. The Alfred Nobel rocket camera. An early aerial photography attempt. *Acta Astronautica*. 2010. 66(3-4). 624-635. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.06.011.
9. Кусов В.С. История аэрофотосъемки в фотографиях: славянский вклад // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 1992. N6. С. 54-61.
10. Галушина П.С., Кравчук А.А. Применение авиации в сельском хозяйстве Российской Федерации // *Аграрное образование и наука*. 2023. N2. С. 8. EDN: VZXBAU.
11. Monmonier M. Aerial photography at the Agricultural Adjustment Administration: acreage controls, conservation benefits, and overhead surveillance in the 1930s. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2002. Vol. 68. N12. 1257-1261.
12. Bondarev V., Ruday O., Baryshnikova O. Aviation in the agricultural sector: experiments with aviation in the USSR in the 1930-s. *E3S*. 2021. 273. 07016. DOI: 10.1051/e3s-conf/202127307016.
13. Куатов Б.Ж., Макаев Т.З. История развития беспилотных летательных аппаратов // *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2017. Т. 1. С. 137-139.
14. Научно-технический центр. История продолжается. К 70-летию НТЦ-ЦКБ. Под общей редакцией А.Ю. Чистилина. М.: КЕМ, 2018. 208 с.
15. Бычкова И.А. История развития аэрометодов в России в 1880-1950-х годах // *Метеорологический вестник*. 2010. Т. 3. N1. С. 54-68. EDN: LLOZJJ.
16. Гольдман Л.М. Применение цветной аэросъемки для изучения местности (дешифрирование цветных аэроснимков) // *Труды Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии*. М.: Геодезиздат, 1960. С. 57-63.
17. Mulla D.J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering, Special Issue: Sensing Technologies for Sustainable Agriculture*. 2014. Vol. 114. N4. 358-371. DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2012.08.009.
18. Curran P.J. Aerial photography for the assessment of crop condition: a review. *Applied Geography*. 1985. 5 (4). 347-360. DOI: 10.1016/0143-6228(85)90012-8.
19. Guo Z., Wang T., Liu S., et al. Biomass and vegetation coverage survey in the Mu Us sandy land - based on unmanned aerial vehicle RGB images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. 94. 102239. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102239.
20. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2020. 012062. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012062.

REFERENCES

1. Stepanchenko A.L. Types of cartographic products created using the data of land-surveying of Russia in the middle of the XIX century. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geodesy and Aerial Photography*. 2018. Vol. 62. N2. 152-156 (In Russian). DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-2-152-156.
2. Kim M.G. Balloon mania: news in the air. *Endeavour*. 2004. 28(4). 149-155 (In English). DOI: 10.1016/j.endeavour.2004.04.010.
3. Sergienko D. Daguerreotype – «the mirror with a memory». *Troitsk Variant – Science*. 2020. N14(308). 2-13 (In Russian).
4. Krasnopevtsev B. V. Milestones in the history of photogrammetry and aerial photography prior to 1918. *Geodesy*

- and Cartography*. 1998. N8. 55-59 (In Russian).
5. Collier P. Photogrammetry and aerial photography. *International Encyclopedia of Human Geography* (2nd ed.). 2020. 91-98 (In English). DOI: 10.1016/B978-0-08-102295-5.10583-9.
 6. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
 7. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. History of unmanned aircraft flight controller development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 4-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
 8. Skoog A.I. The Alfred Nobel rocket camera. An early aerial photography attempt. *Acta Astronautica*. 2010. 66(3-4). 624-635 (In English). DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.06.011.
 9. Kusov V. S. History of aerial photography in photographs: Slavic contribution. *Proceedings of higher educational establishments. Geodesy and Aerial Photography*. 1992. N6. 54-61 (In Russian).
 10. Galushina P., Kravchuk A. The use of aviation in agriculture of the Russian Federation. *Agrarian Education and Science*. 2023. N2. 8 (In Russian). EDN: VZXBAU.
 11. Monmonier M. Aerial photography at the Agricultural Adjustment Administration: acreage controls, conservation benefits, and overhead surveillance in the 1930s. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2002. Vol. 68. N12. 1257-1261 (In English).
 12. Bondarev V., Ruday O., Baryshnikova O. Aviation in the agricultural sector: experiments with aviation in the USSR in the 1930-ies. *E3S*. 2021. 273. 07016 (In English). DOI: 10.1051/e3sconf/202127307016.
 13. Kumatov B. Zh., Makaev T.Z. A History of Unmanned Aerial Vehicle Development. *Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. 2017. Vol. 1. 137-139. EDN: ZDGQTP.
 14. Scientific and Technical Center. The Story Goes On. To the 70th anniversary of the STC-CDB. Ed. by A.Yu. Chistilina. Troitsk Variant – Science. Moscow: KEM. 2019. 208.
 15. Bychkova I.A. Evolution of Aerial Methods in Russia from the 1880s to the 1950s. *Meteorological Bulletin*. 2010. Vol. 3. N1. 54-68 (In Russian). EDN: LLOZJJ.
 16. Goldman L.M. Application of color aerial photography for terrain analysis (Interpretation of color aerial photographs). *Proceedings of the Central Scientific Research Institute of Geodesy, Aerial Photography and Cartography*. Moscow: Geodesizdat. 1960. 57-63 (In Russian).
 17. Mulla D.J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering, Special Issue: Sensing Technologies for Sustainable Agriculture*. 2014. Vol. 114. N4. 358-371 (In English). DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMS.2012.08.009.
 18. Curran P.J. Aerial photography for the assessment of crop condition: a review. *Applied Geography*. 1985. 5(4). 347-360 (In English). DOI: 10.1016/0143-6228(85)90012-8.
 19. Guo Z., Wang T., Liu S. et al. Biomass and vegetation coverage survey in the Mu Us sandy land - based on unmanned aerial vehicle RGB images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. 94. 102239 (In English). DOI: 10.1016/j.jag.2020.102239.
 20. Kurbanov R., Litvinov M. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2020. 012062. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012062.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – научное руководство, формирование задач исследования;
 Курбанов Р.К. – обработка данных;
 Захарова Н.И. – сбор и анализ материалов по теме исследования, подготовка статьи.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – scientific guidance, defining research tasks;
 Kurbanov R.K. – data processing;
 Zakharova N.I. – collection and analysis of materials on the research topic; manuscript preparation.
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

04.03.2024
 03.05.2024