

EDN: CWVCUM

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95



Научная статья

УДК 631.3



Основные тенденции в развитии технологии аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий

Рашид Курбанович Курбанов,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник;
Юлия Сергеевна Ценч,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник;

Наталья Ивановна Захарова,
младший научный сотрудник,
e-mail: smedia@vim.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Аэрофотосъемка для сельского хозяйства стала важным инструментом, позволяющим фермерам и агрономам получать актуальную информацию о состоянии сельскохозяйственных угодий. (*Цель исследования*) Выполнить ретроспективный анализ совершенствования технологии аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий для формирования периодизации развития аэрофотосъемочного оборудования и воссоздания целостной картины их эволюции. (*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 четыре основных этапа в развитии аэрофотосъемочного оборудования. Периодизация основана на изменении типа камер и летательных аппаратов, на которые они устанавливались. Проведено сравнение аэрофотоаппаратов для аэрофотосъемки, начиная с камер, использующих мокрые коллодиевые пластины, до современных цифровых аэрофотоаппаратов, устанавливаемых на беспилотные воздушные суда. (*Выводы*) Процесс разработки и создания аппаратуры для аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель происходил скачкообразно. В настоящее время актуально использовать беспилотные воздушные суда с камерами видимого диапазона и мультиспектральными камерами при аэрофотосъемке сельскохозяйственных угодий. Предположили, что дальнейшее развитие цифровых камер для аэрофотосъемки будет направлено на повышение пространственного разрешения, их гибридизацию и интеллектуализацию.

Ключевые слова: сельское хозяйство, аэрофотосъемка, аэрофотография, аэрофотоаппарат, дистанционное зондирование, анализ развития, точное земледелие, беспилотная аэрофотосъемка.

■ **Для цитирования:** Курбанов Р.К., Ценч Ю.С., Захарова Н.И. Основные тенденции в развитии технологии аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №1. С. 86-95. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95. EDN: CWVCUM.

Scientific article

Major Trends in the Development of Aerial Photography Technology for Agricultural Lands

Rashid K. Kurbanov,
Ph.D.(Eng.), leading researcher;
Yuliya S. Tsench,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;

Natalia I. Zakharova,
junior researcher,
e-mail: smedia@vim.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Aerial photography has become an essential tool in agriculture, allowing farmers and agronomists to monitor the condition of agricultural land in real time. (*Research purpose*) This study aims to conduct a retrospective analysis of the evolution of aerial photography technology in agriculture, establish a chronological framework for its development, and provide a comprehensive overview of its advancements. (*Materials and methods*) A systematic literature review was conducted using a historical-analytical approach. The analysis included original works by both domestic and international authors, including monographs, scientific journals, conference proceedings, museum exhibits, photographic materials, and publicly available software source codes. (*Results and discussion*) Four key stages in the development of aerial photography equipment were identified based on advancements in

camera technology and the aerial platforms on which they were mounted. A comparative analysis of aerial photography devices was conducted, tracing the evolution from wet collodion plate cameras to modern digital aerial cameras mounted on unmanned aerial vehicles (UAVs). (*Conclusions*) The development of aerial photography equipment for agricultural land mapping has progressed in leaps rather than through gradual increments. Currently, UAVs equipped with visible-spectrum and multispectral cameras are the most relevant for agricultural applications. Future advancements in digital aerial photography cameras will focus on improving spatial resolution, hybridization, and intelligent functionalities.

Keywords: agriculture, aerial photography, aerial imaging, aerial camera, remote sensing, development history, precision agriculture, unmanned aerial photography.

For citation: Kurbanov R.K., Tsench Yu.S., Zakharova N.I. Major trends in the development of aerial photography technology for agricultural lands. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 86-95 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95. EDN: CWVCUM.

Беспилотные воздушные суда активно используются в сельском хозяйстве [1, 2]. Их применение с аэросъемочным оборудованием позволяет проводить мониторинг состояния растений и контролировать их развитие [3]. Развитие аэрофотосъемочного оборудования расширило возможности их применения и спектр решаемых задач [4]. К 2030 г. прогнозируется значительный рост мирового рынка аэрофотосъемочного оборудования для беспилотных воздушных судов (БВС).

Современные технические решения на базе беспилотных воздушных судов и цифровых камер представляют собой наукоемкую, высокотехнологичную область и одно из наиболее перспективных сегодня направлений развития авиации сельскохозяйственного назначения [5]. История создания, совершенствования и тенденции развития средств аэрофотосъемки актуальны в мире и влияют на производство и применение аэрофотоаппаратуры в комплексе с беспилотными воздушными судами для мониторинга сельскохозяйственных угодий. История развития аэрофотосъемки позволяет понять, как создавались такие технологии, какие инновации и открытия способствовали их улучшению, а также предоставляет ценные знания и контекст, которые помогают спрогнозировать вектор развития технологии в аграрном секторе.

Цель исследования – выполнить ретроспективный анализ совершенствования технологии аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий для формирования периодизации развития аэрофотосъемочного оборудования и воссоздания целостной картины их эволюции.

Материалы и методы. Выполнен комплексный обзор литературы с использованием историко-аналитического метода для описания развития технологии аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий. Рассмотрены оригинальные работы отечественных и зарубежных авторов: монографии, научные журналы, материалы конференций, музейных выставок и фотоматериалы, находящиеся в открытом доступе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В период с 1858 по 1908 г. использование аэрофотосъемки представляло собой экспериментальную работу и было неэффективным до появления более устойчивых воздушных платформ и более совершенных средств аэрофотосъемки. В это время начинаются разработки портативных камер и их креплений к различным носителям, создаются первые аэрофотоснимки [6].

Значительный вклад в развитие аэрофотосъемки внесли воздухоплаватели, фотографы, изобретатели и экспериментаторы:

- Гаспар Феликс Турнашон – создатель первой в мире аэрофотографии;
- Джеймс Уоллес Блэк – первый аэрофотоснимок в Соединенных Штатах Америки (США);
- Уолтер Бентли Вудбери – разработка фотоаппарата, управляемого с земли через электрический кабель;
- Жан Никола Трушелю – первые аэрофотографии с использованием сухих пластин;
- Сесил Виктор Шэдболт – аэрофотосъемка с воздушного шара в Великобритании (*рис. 1*);
- Вячеслав Измайлович Срезневский – первая аэрофотосъемка специализированным фотоаппаратом в России;
- Александр Матвеевич Кованько – аэрофотосъемка Санкт-Петербурга;
- Эдмунд Дуглас Арчибалд и Артур Батут – аэрофотосъемка с воздушных змеев;
- Альфред Нобель и Альфред Мауль – аэрофотосъемка с ракет;
- Юлиус Густав Нойброннер – камеры для голубей.

На этом этапе технологические возможности аэрофотосъемки не позволяли их применять в сельском хозяйстве в связи с непостоянством получаемых данных.

При создании изображений использовались различные модели камер, отличающиеся по техническим и технологическим параметрам. Для аэрофотосъемки применяли мокрые коллодиевые пластины, сухие и стеклянные пластины. Размеры



Рис. 1. Сесил Шедболт (слева) и Уильям Дейл (справа) у воздушного шара с прикрепленной к корзине камерой (Исторический архив Англии) Historic England Archive (<https://historicengland.org.uk/images-books/photos/item/CVS01/01/023>)

Fig. 1. Cecil Shadbolt (left) and William Dale (right) posed in the basket of a gas balloon with a camera attached to the side of the basket. Historic England Archive. (<https://historicengland.org.uk/images-books/photos/item/CVS01/01/023>)

используемых пластин определяли формат изображения, который значительно варьировался в зависимости от модели камеры. На рисунке 2 представлены результаты анализа используемых форматов изображений в период первых экспериментальных разработок аэрофотоаппаратуры. Из диаграммы видно, что использовались как небольшие форматы изображений (8×8 и 6×9 см), так и крупные (24×24 и 20×25 см). Были определены форматы 18,5×16,7 и 24×24 см, соответствующие тем, которые были распространены в области аэрофотосъемки пленочными аэрофотоаппаратами в XX в.

Во время экспериментальных разработок в области аэрофотосъемочного оборудования была проведена первая съемка с воздуха, ставшая важной вехой в развитии технологии аэрофотосъемки. Одновременно в разных странах мира, в том числе в Российской империи, Франции и США, работали над созданием портативных камер и их креплений к воздушным шарам, воздушным змеям, ракетам и птицам. Развитие технологии было обусловлено рядом факторов, включая повышение чувствительности камер и надежности пластин, улучшение качества изображений и снижение стоимости фотоматериалов. В результате аэрофотосъемка стала больше подходить для использования в авиации.

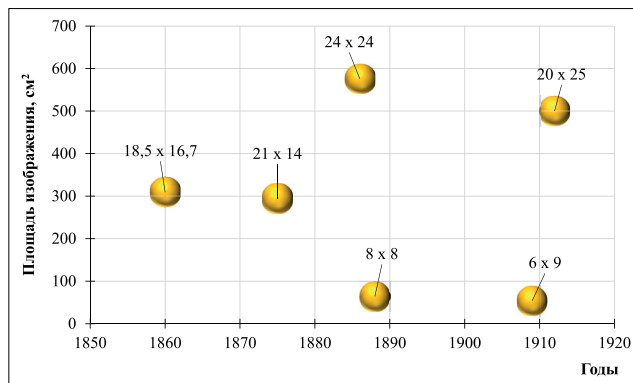


Рис. 2. Форматы изображений, которые использовались в начальный период экспериментов по созданию аэрофотоаппаратов

Fig. 2. Image formats used in the early experimental stages of aerial camera development

Развитие аэрофотосъемки привело к основанию Международного фотограмметрического общества (ISP) в 1910 г. профессором Венского технологического университета Эдуардом Долежалем. Советский союз вступил в эту организацию в 1968 г., на тот момент в нее входили 50 стран. В 1980 г. на конгрессе в Гамбурге ISP было переименовано в Международное общество фотограмметрии и дистанционного зондирования (ISPRS), данное название сохранилось до нашего времени.

В России фотоаппарат был установлен на борт самолета в 1910 г. В аэрофотоаппарате конструкции Сергея Алексеевича Ульянина использовались кассеты из шести стеклянных пластин размером 13×13 см. Появление первого пленочного полуавтоматического аэрофотоаппарата позволило создавать топографические карты достаточно высокого качества [8]. Аэрофотоаппарат Владимира Филипповича Потте имел перематываемую пленку и мог записать 50 последовательных снимков размером 13×18 см.

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. С 1921 г. накопленный опыт аэрофотосъемки стали применять в мирных целях, в том числе для картирования сельскохозяйственных полей [9].

В 1926-1928 гг. Государственное техническое бюро «Аэрофотосъемка» по заданию Центрального управления лесами Наркомзема РСФСР в масштабе 1:10 000 и 1:8 000 провело съемку в Марийской автономной области лесного массива площадью около 900 000 га к востоку от Козьмодемьянского кантона. Попутно проводилась аэрофотосъемка русла реки Волга. В эти годы Бюро вело аэрофотосъемку лесных территорий в Чувашской АССР.

Была частично проведена контурная аэрофотосъемка лесной площади Сурского массива и крестьянских земель, расположенных по границе и внутри массива, Бузулукского бора в Самарской губернии, хлопковых полей в Андижанском районе по заданию Узбекского хлопкового комитета [10]. При этом существовали сложности с организацией и проведением полетов, созданием и обработкой полученных изображений.

Цветная аэрофотосъемка впервые была выполнена в 1936 г. одновременно в СССР и в Канаде. И в том же году в США была поставлена задача создать полную и систематическую аэрофотосъемку сельскохозяйственных угодий страны [11].

В это время советскими учеными были разработаны аэрофотоаппараты АФА-33, сменившие камеру В.Ф. Потте. С огромным технологическим прогрессом в области пилотируемой авиации, аэрофотоаппаратуры, картографирования в первой половине XX в. аэрофотосъемка быстро стала инструментом реализации широкого круга операций, в том числе в сельскохозяйственном секторе [12].

Во время Второй мировой войны аэрофотосъемка стала обычным делом. Снимки, сделанные с неба, часто появлялись в газетах и журналах и были основным источником визуальной документации передвижения войск и состояния населенных пунктов. Кроме того, аэрофотосъемка сыграла ключевую роль в создании кинохроники и пропагандистских материалов. Для выполнения задач разведки, наблюдения и рекогносцировки стали использовать более компактные и быстрые самолеты. Прогресс в развитии технологии аэрофотосъемки позволил получать изображения на больших высотах и с большей скоростью, что расширило возможности сбора и использования полученной информации. В это время немецкие самолеты-разведчики регулярно проводили аэрофотосъемку советских городов и прилежащих территорий. Использовались пленочные аэрофотоаппараты немецкой компании *Carl Zeiss*. На изображениях 1942 г. легко различимы городские поселения, а также контуры сельскохозяйственных полей и лесных массивов (рис. 3).

В период с 1909 по 1945 г. произошел стремительный и значительный прогресс, обусловленный сменой военного и мирного времени. Были созданы пленочные камеры, работающие на высоких скоростях, и жесткие крепления для их установки на самолеты, что обеспечило необходимый угол съемки. Технологические достижения позволили применять аэрофотосъемку в различных сферах, включая решение сельскохозяйственных задач.

Во второй половине XX века Советский Союз активно развивал производство пленочных аэрофотоаппаратов [13]. В процессе развития технологии разработки камер произошел переход от черно-белой к



Рис. 3. Аэрофотосъемка с немецкого самолета недалеко от г. Серпухов, 1942 г.

Ресурсы сервиса RetroMap (<https://retromap.ru/>)

Fig. 3. Aerial photograph taken from a German airplane near the city of Serpukhov, 1942.

RetroMap service: <https://retromap.ru/>

цветной (RGB), инфракрасной и спектральной съемке. Одновременно с этим изменилась масса камер и были разработаны системы креплений и стабилизации камер на борту самолетов. Совершенствование средств аэрофотосъемки было направлено на повышение разрешения и точности изображений. Появление электронных приводов затвора ознаменовало значительный прогресс в разработке аэрофотоаппаратуры. Автоматизация оптических систем способствовала более точной фокусировке, экспозиции и наведению камер, что значительно повысило эффективность работы операторов и качество получаемых изображений. Одновременно с этим в качестве стандартов стали использоваться форматы кадра 18×18 и 23×23 см.

В результате исследования отмечена тенденция увеличения количества кадров на пленке вплоть до середины 1960-х г. (рис. 4). Это было обусловлено увеличением длины аэрофотопленки, изменением массогабаритных характеристик камер, совершенствованием технологии перфорации и закрепления пленки. Однако в 1970-1990-х гг. количество кадров на пленке аэрофотоаппарата уменьшилось. Это снижение было вызвано уменьшением размеров и массы камер в результате замены механических элементов на электронные.

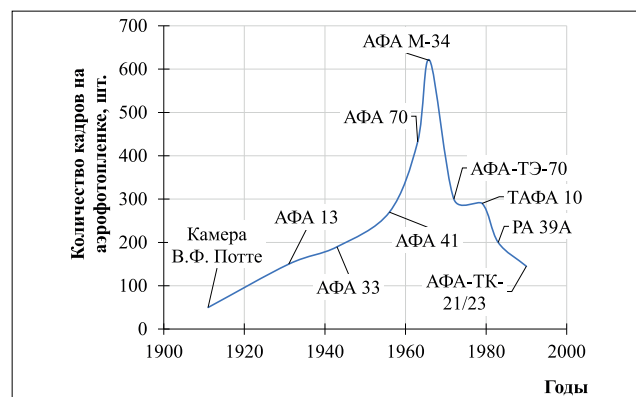


Рис. 4. Изменение количества кадров на аэрофотопленке
Fig. 4. Change in the number of frames on the aerial photographic film

Вместе с прогрессом в авиастроении и разработке аэрофотосъемочного оборудования развивались приборы и методы навигации при аэросъемке. На самолетах использовались приборы, позволяющие создавать аэросъемочные маршруты. В 1939 г. стали использовать дистанционный фотоэлектрический фотосъемочный компас, в 1948-1950 гг. – солнечно-теневые указатели, на смену которым пришли курсовые системы со специальными программными устройствами разворота [7].

Развитие космических технологий во второй половине XX в. способствовало интенсивной разработке аппаратуры для аэросъемки и их носителей. Цветное фотографирование стало новым средством изучения поверхности Земли и происходящих на ней явлений [14]. Появился термин «дистанционное зондирование», который предложила Эвелин Прюитт, так как понятие «аэрофотосъемка» больше не являлось адекватным термином для описания потоков данных, генерируемых новыми технологиями. В сельском хозяйстве начали применять спутниковые снимки (рис. 5), данные мультиспектральной аэросъемки, создавать вегетационные карты для оценки состояния растений [15].



Рис. 5. Карта сельскохозяйственного поля по спутниковым данным: слева съемка 1964 г.; справа – 1980 г. Ресурсы сервиса RetroMap: <https://retromap.ru/>
Fig. 5. Map of an agricultural field based on satellite data: left – image from 1964; right – image from 1980. RetroMap service: <https://retromap.ru/>

Для оценки растительности в 1969 г. был предложен относительный вегетационный индекс (*Ratio Vegetation Index – RVI*) [16]. Для его расчета необходимо определить отношение значений исследуемого участка в инфракрасном спектральном канале к значениям в красном канале. Чем выше полученное значение, тем больший процент растительности присутствует на исследуемом участке. Почва принимает значения близкие к 1.

К 1980-м годам достижения в области камер, их цифровизация, миниатюризация и другие технологии позволили увеличить доступность и расширить использование аэрофотосъемки. Наиболее значительными достижениями в технологии беспилотных камер стали разработка цифровых камер, подвесных систем стабилизации, матрицы нового

поколения (*CMOS*), а также стандарта сжатия изображений (*jpeg*).

К началу 2000-х годов разработанные технологии позволили устанавливать камеры на беспилотные воздушные суда взлетной массой до 30 кг. Такое техническое решение стали использовать для мониторинга сельскохозяйственных угодий (рис. 6).

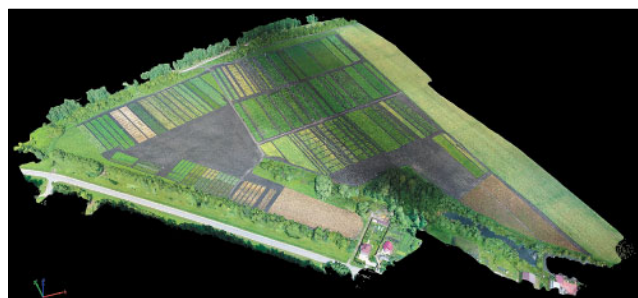


Рис. 6. Триангуляционная модель селекционного поля по данным аэрофотосъемки с БВС DJI Matrice 200 v2 и RGB камеры DJI Zenmuse X4S, 26 июля 2022 г., Орловская область. Фото из архива авторов
Fig. 6. Triangulation model of a plant breeding field based on aerial photography data captures by a DJI Matrice 200 v2 UAV equipped with a DJI Zenmuse X4S RGB camera, July 26, 2022, Oryol Region. Photo from the authors' archive

Проанализировано изменение разрешения цифровых камер видимого диапазона, устанавливаемых на квадрокоптерные БВС взлетной массой менее 30 кг, с 2012 года (рис. 7). За точку отсчета была выбрана камера GoPro, которую устанавливали на квадрокоптере DJI Phantom 1 в начале 2013 г. На графике видно, что за исследуемый период разрешение цифровых камер увеличилось в пять раз. Современные камеры DJI Zenmuse P1 с разрешением 45 Мп и Topodrone P61 с разрешением 61 Мп позволяют собирать высокодетализированные изображения при высоте полета 100-150 м. Увеличение

Проанализировано изменение разрешения цифровых камер видимого диапазона, устанавливаемых на квадрокоптерные БВС взлетной массой менее 30 кг, с 2012 года (рис. 7). За точку отсчета была выбрана камера GoPro, которую устанавливали на квадрокоптере DJI Phantom 1 в начале 2013 г. На графике видно, что за исследуемый период разрешение цифровых камер увеличилось в пять раз. Современные камеры DJI Zenmuse P1 с разрешением 45 Мп и Topodrone P61 с разрешением 61 Мп позволяют собирать высокодетализированные изображения при высоте полета 100-150 м. Увеличение

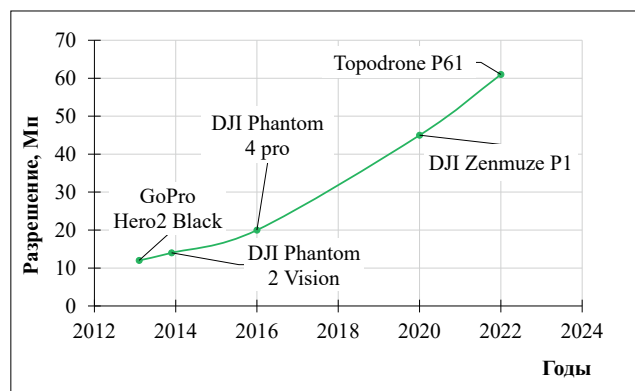


Рис. 7. Разрешение цифровых RGB камер, устанавливаемых на квадрокоптерные БВС взлетной массой менее 30 кг, в XXI веке
Fig. 7. Resolutions of digital RGB cameras for installation on quadcopter UAVs with a takeoff weight of less than 30 kg



высоты полета БВС и расстояния между смежными пролетами повышает производительность БВС до 100-120 га за один вылет.

Развитие микроэлектроники, цифровых носителей, аппаратного и программного обеспечения для управления камерой, создания и записи изображений значительно повлияло на развитие цифровых камер. В то же время камеры с механическим затвором сохранили свою востребованность в области аэрофотосъемки. Высокодетализированные цифровые карты, в том числе вегетационные карты, все больше используются вместе с технологиями искусственного интеллекта для решения сельскохозяйственных задач, например для оценки состояния растений [17], распознавания заболеваний растений [18], картирования сорной растительности [19], прогнозирования урожайности [20, 21], фенотипирования селекционных сортов [22, 23], подсчета растений [24] и др.

Анализ развития фотоносителей показал наличие схожих тенденций увеличения количества изображений в начале XX и начале XXI веков (рис. 8). В XIX – начале XX века аэрофотосъемка развивалась как новое направление, а с XXI века она развивается с помощью миниатюрных цифровых камер. В начале XX века замечено резкое увеличение количества изображений на фотоносителе, связанное с усовершенствованием пластин и конструкций камер. Это было обусловлено сочетанием технологических инноваций (развитие химической промышленности, механизация производства фото-

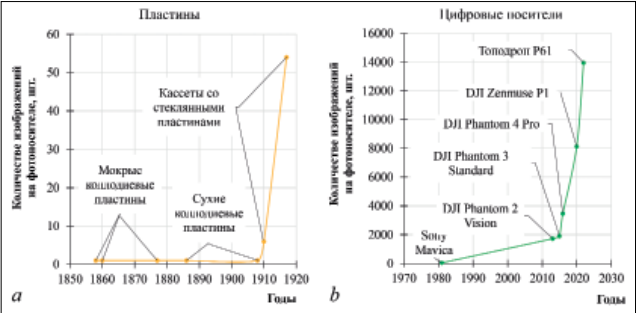


Рис. 8. Изменение количества изображений на фотоносителе: а – XIX – начало XX века; б – конец XX – начало XXI века

Fig. 8. Change in the number of images on the photographic media: a – 19th to early 20th century; b – late 20th to early 21st century

тографических материалов и камер, разработка новых типов объективов), научных открытий (исследования в области фотохимии, развитие теории оптики), экономических и социальных изменений (рост спроса на фотографию, развитие средств массовой информации). В начале XXI века тенденция на увеличение количества изображений связана с развитием полупроводниковых технологий, улучшением алгоритмов обработки изображений, интеграцией с искусственным интеллектом, а также научными исследованиями в области оптики, фотоники и нанотехнологий. Проведено сравнение средств аэрофотосъемки, используемых в XIX-XXI веках. (табл. 1).

Таблица 1 СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АППАРАТОВ ДЛЯ АЭРОФОТОСЪЕМКИ / COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF AERIAL PHOTOGRAPHY DEVICES				
Период использования	Преимущества	Недостатки	Примеры использования	Основные модели камер
Аэрофотоаппараты с мокрыми коллодиевыми пластинами				
Середина XIX в.	Высокое качество изображения, детализация	Сложность и необходимость немедленной обработки, хрупкость	Г.Ф. Турнашот, Д.У. Блэк	Камеры, изготовленные изобретателями
Аэрофотоаппараты с сухими пластинами				
Конец XIX – начало XX в.	Удобство использования по сравнению с мокрыми пластинами, возможность заранее подготовить пластины	Качество изображения ниже, чем с мокрыми пластинами, тяжесть, хрупкость, сложность обработки	А. Нобель, А.М. Кованько, У. Райт	Камера Ж.Н. Трушелло, Камера В.И. Срезневского
Пленочные аэрофотоаппараты				
Середина XX в.	Легкие, компактные, удобство использования, возможность съемки множества кадров без замены пленки	Ограниченное разрешение, необходима химическая обработка пленки	Бюро «Госаэрофотосъемка» в СССР Компания Aerofilm Ltd	АФА-33/75, Fairchild Aerial Camera (США), Carl Zeiss (Германия), S.F.O.M. (Франция)
Цифровые аэрофотоаппараты				
Конец XX – начало XXI в.	Высокое разрешение, удобство использования, возможность мгновенного просмотра и обработки данных, интеграция с геоинформационными системами	Высокая стоимость оборудования, необходимость программного обеспечения для обработки данных	БВС DJI Phantom, DJI Matrice	Камеры компаний DJI, Sony

Фотоаппараты для аэрофотосъемки претерпели значительные изменения за последние 166 лет (1858-2024 гг.) от использования мокрых коллоидных пластинок до современных цифровых камер, устанавливаемых на БВС. Каждый тип камер имеет свои преимущества и недостатки. Усовершенствование конструкций камер, фотоматериалов, метода фиксации и сохранения изображений способствовало развитию технологии аэрофотосъемки и расширило сферы применения получаемых данных.

Использование данных аэрофотосъемки для решения сельскохозяйственных задач началось с применения пленочных аэрофотоаппаратов, установленных на самолеты. Современные технологии позволяют с помощью миниатюрных камер, устанавливаемых на БВС, получать массив данных об исследуемых сельскохозяйственных биообъектах [25].

Ретроспективный анализ развития аэрофотоаппаратуры сельскохозяйственных земель показывает, что развитие происходило скачкообразно и было связано с политической, социальной и экономической ситуацией в стране и мире, уровнем развития технологий в смежных областях.

Выделено четыре основных этапа развития, связанных с изменением типа камер и летательных аппаратов, на которые они устанавливались (табл. 2, рис. 9).

На этапе первых экспериментальных разработок для аэрофотосъемки использовались различные летательные аппараты и объекты (воздушные шары и змеи, ракеты, птицы). На них устанавливали камеры, зачастую изготовленные самими экспериментаторами, разных конструкций, форматов и способов крепления.

Второй этап ознаменовался разработкой специализированных аэрофотоаппаратов, предназначен-



Рис. 9. Этапы развития средств аэрофотосъемки
Fig. 9. Stages of aerial photography equipment development

ных для установки на самолеты. Военные события в первой половине XX века ускорили развитие технологий аэрофотосъемки. Повсеместно стали использовать серийно выпускаемые пленочные аэрофотоаппараты. Опыт и успехи применения аэросъемки в боевых условиях интенсивно внедрялись при решении мирных задач, в том числе в сельском хозяйстве.

На третьем этапе развития средств аэрофотосъемки появился термин «дистанционное зондирование», так как «аэрофотосъемка» больше не являлась адекватным понятием для описания потоков данных, генерируемых новыми технологиями. На этом этапе произошло распространение и внедрение цветной и спектральной аэрофотосъемки, были запущены искусственные спутники Земли, оснащенные камерами. В сельском хозяйстве начали применять данные мультиспектральной аэросъемки, создавать вегетационные карты для оценки состояния растений.

Для четвертого этапа характерно использование цифровых камер. Значительный прогресс в разви-

Таблица 2			Table 2
ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ АЭРОФОТОАППАРАТУРЫ / STAGES OF DEVELOPMENT OF AERIAL PHOTOGRAPHY EQUIPMENT			
Годы		Период	
1858-1908		Первые экспериментальные разработки аэрофотоаппаратуры	
1909-1945		Проведение аэрофотосъемки с самолетов	
	1909-1918	Первая аэрофотосъемка с самолета и период Первой мировой войны	
	1919-1938	Развитие аэрофотосъемки в гражданских целях	
	1939-1945	Интенсификация аэрофотосъемки в период Второй мировой войны	
1946-1979		Становление дистанционного зондирования Земли	
	1946-1971	Развитие цветной аэрофотосъемки	
	1972-1979	Начало спутникового зондирования Земли	
1980-2024		Развитие цифрового аэрофотоаппарата и беспилотных технологий	
	1980-2012	Установка камер на самолётный тип БВС	
	Январь-сентябрь 2013	Установка миниатюрной камеры на квадрокоптер взлетной массой до 30 кг	
	Октябрь 2013-2024	Интегрирование камеры в квадрокоптер взлетной массой до 30 кг	

тии средств аэрофотосъемки был достигнут в 2010-х годах с началом массового выпуска миниатюрных камер. В 2013 г. они были установлены на квадрокоптеры со взлетной массой менее 30 кг, но управление камерой с пульта управления дрона все еще было невозможно. В конце 2013 г. камера была интегрирована в систему управления полетом БВС, что повысило точность получаемых изображений.

Дальнейшее развитие цифровых камер возможно в области их гибридизации, увеличения разрешающей способности и внедрения технологий искусственного интеллекта для анализа состояния сельскохозяйственных биообъектов в режиме реального времени. Совершенствование аэрофотоаппаратуры будет способствовать увеличению производительности БВС, снижению стоимости съемки гектара сельскохозяйственных полей и стремительному распространению технологии цифрового мониторинга в аграрной сфере.

Выводы. За 166 лет развития средства аэрофотосъемки претерпели множество изменений, включая изменение фотоносителя, пространственное и спектральное разрешение, массы и методов их крепления и стабилизации, типы и приводы затворов, появились инерциальный блок управления, встроенные приемники GPS/ГЛОНАСС, сенсоры освещенности у мультиспектральных камер.

По результатам ретроспективного анализа выделено четыре основных этапа развития средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных земель: 1858-1908 годы – первые экспериментальные разработки аэрофотоаппаратуры; 1909-1945 годы –

проведение аэрофотосъемки с самолетов, включая (1909-1918) первая аэрофотосъемка с самолета и период Первой мировой войны, (1919-1938) развитие аэрофотосъемки в гражданских целях, (1939-1945) интенсификация аэрофотосъемки в период Второй мировой войны; 1946-1979 годы – становление дистанционного зондирования Земли, включая (1946-1971) развитие цветной аэрофотосъемки, (1972-1979) начало спутникового зондирования Земли.

Период с 1980 г. по настоящее время отмечен развитием цифрового аэрофотоаппарата и беспилотных технологий, включая (1980-2012) установку камер на самолетный тип БВС (январь-сентябрь 2013) установку миниатюрной камеры на квадрокоптер взлетной массой до 30 кг, (октябрь 2013 г. по настоящее время) интегрирование камеры в квадрокоптер взлетной массой до 30 кг.

Установлено, что в настоящее время в аграрной сфере наиболее эффективным инструментом для мониторинга сельскохозяйственных угодий рассматриваются цифровые аэрофотоаппараты, в частности камеры видимого диапазона и мультиспектральные камеры.

Тенденции развития камер свидетельствуют о дальнейшем увеличении пространственного разрешения и их гибридизации, интеграция технологий искусственного интеллекта. Разработка и продвижение таких технологических решений будет способствовать повышению эффективности и доступности БВС, а также ускорит распространение технологии цифрового дистанционного зондирования в сельскохозяйственной сфере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Deng L., Mao Z., Li X. et al. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: a comparison between different cameras. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. N146. 124-136. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008.
2. 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.
3. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве (окончание) // *Техника и оборудование для села*. 2022. N4(298). С. 2-6. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
4. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электро-технологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45. EDN: RLCDHO.
5. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 26-35. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
6. Skoog A.I. The Alfred Nobel rocket camera. An early aerial photography attempt. *Acta Astronautica*. 2010. N66 (3-4). 624-635. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.06.011.
7. Лаврова Н.П., Стеценко А.Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование. М.: Недра, 1981. 296 с.
8. Кусов В.С. История аэрофотосъемки в фотографиях: славянский вклад // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 1992. N6. С. 54-61.
9. Галушина П.С., Кравчук А.А. Применение авиации в сельском хозяйстве Российской Федерации // *Аграрное образование и наука*. 2023. N2. С. 8.
10. Бонч-Бруевич М.Д. Аэрофотосъемка на службе социалистического хозяйства. М.; Л.: Главная редакция общетехнических дисциплин, 1934. 135 с.
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-s. *E3S Web of Conferences*. 2021. 273. 07016. DOI: 10.1051/e3sconf/202127307016.
 13. Евдокимов Ю.В., Кузьмин В.М. Развитие аэрофото-съемочных работ в России (СССР) в 60-х-90-х гг. // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэро-фотосъемка*. 1992. N 6. С. 172-176. EDN: WWPCKD.
 14. Валях В.М. Аэрофотографические и методы при ин-женерно-геологических исследованиях. М.: Недра, 1982. 261 с.
 15. Mulla D.J. Twenty five years of remote sensing in preci-sion agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering, special issue: Sensing Tech-nologies for Sustainable Agriculture*. 2014. N114(4). 358-371. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.
 16. Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Environmental Science. Ecology*. 1969. N50(4). 663-666. DOI:10.2307/1936256.
 17. Курбанов Р.К., Захарова Н.И., Захарова О.М., Горшков Д.М. Оценка перезимовки всходов селекционной ози-мой пшеницы с помощью БПЛА // *Инновации в сель-ском хозяйстве*. 2019. N3(32). С. 133-139. EDN: YYRCTL.
 18. Kouadio L., Jarroudi M., Belabess Z. et al. A review on UAV-based applications for plant disease detection and monitoring. *Remote Sensing*. 2023. N15(17). 4273. DOI: 10.3390/rs15174273.
 19. Zhao J., Berge T.W., Geipel J. Transformer in UAV image-based weed mapping. *Remote Sensing*. 2023. N15(21). 5165. DOI: 10.3390/rs15215165.
 20. Maimaitijiang M., Sagan V., Sidike P. et al. Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning. *Remote Sensing of Environment*. 2020. N237. 111599. DOI:10.1016/j.rse.2019.111599.
 21. Rodriguez-Sanchez J., Li C., Paterson A.H. Cotton yield estimation from aerial imagery using machine learning approaches. *Frontiers in Plant Science*. 2022. N26(13). 870181. DOI: 10.3389/fpls.2022.870181.
 22. Xie C., Yang C. A review on plant high-throughput phenotyping traits using UAV-based sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. N178. 105731. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105731.
 23. Roth L., Barendregt C., Bétrix C.A. et al. High-through-put field phenotyping of soybean: spotting an ideotype. *Remote Sensing of Environment*. 2022. N269. 112797. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112797.
 24. Zhang J., Zhao B., Yang C. et al. Rapeseed stand count estimation at leaf development stages with UAV imagery and convolutional neural networks. *Frontiers in Plant Science*. 2020. N11. 617. DOI: 10.3389/fpls.2020.00617.
 25. Личман Г.И., Коротченя В.М., Смирнов И.Г., Курба-нов Р.К. Концепция точного земледелия на основе по-нятий идеального поля и цифрового двойника // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. N67. 3(40). С. 81-86. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-3-81-86.

REFERENCES

1. Deng L., Mao Z., Li X., et al. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: a comparison between different cameras. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. N146. 124-136 (In English). DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008.
2. 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.
3. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shoge-nov Yu.Kh. The results of scientific research of agro-engineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2022. N4(298). 2-6 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
4. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Digitiza-tion aspects of the system of technologies and machines. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agri-culture*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian). EDN: RLCDHO.
5. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural Engineering*. 2021. N1 (101). 26-35. (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
6. Skoog A.I. The Alfred Nobel rocket camera. An early aerial photography attempt. *Acta Astronautica*. 2010. N66(3-4). 624-635 (In English). DOI: 10.1016/j.actaas-tro.2009.06.011.
7. Lavrova N.P., Stetsenko A.F. Aerial photography. *Aerial photography equipment*. Moscow: Nedra. 1981. 296 (In Russian).
8. Kusov V.S. History of aerial photography in photographs: Slavic contribution. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aero-photosurveying*. 1992. N6. 54-61 (In Russian).
9. Galushina P.S., Kravchuk A.A. The use of aviation in ag-riculture of the Russian Federation. *Agrarian education and science*. 2023. N2. C. 8 (In Russian).
10. Bonch-Bruevich M.D. Aerial photography in the socia-list economy. 1934. 135 (In Russian).
11. Monmonier M. Aerial photography at the Agricultural Adjustment Administration: acreage controls, conserva-tion 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-s. *E3S Web of Conferences*. 2021. 273. 07016 (In English). DOI: 10.1051/e3sconf/202127307016.
13. Evdokimov Yu.V., Kuz'min V.M. Development of aerial

- photography in Russia (USSR) in the 60s-90s. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 1992. N6. 172-176 (In Russian). EDN: WWPCKD.
14. Valyakh V.M. Aerial Photographic and scanner-based aerial methods in engineering geological studies. Moscow: Nedra. 1982. 261 (In Russian).
 15. 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. N114(4). 358-371 (In English). DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.
 16. Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Environmental Science. Ecology*. 1969. N50(4). 663-666 (In English). DOI: 10.2307/1936256.
 17. Kurbanov R.K., Zakharova N.I., Zakharova O.M., Gorshkov D.M. Assessment of seedlings breeding winter wheat after overwintering using UAVS. *Innovations in Agriculture*. 2019. N3(32). 133-139 (In Russian). EDN: YYRCTL.
 18. Kouadio L., Jarroudi M., Belabess Z. et al. A review on UAV-based applications for plant disease detection and monitoring. *Remote Sensing*. 2023. N15(17). 4273 (In English). DOI: 10.3390/rs15174273.
 19. Zhao J., Berge T.W., Geipel J. Transformer in UAV image-based weed mapping. *Remote Sensing*. 2023. N15(21). 5165 (In English). DOI: 10.3390/rs15215165.
 20. Maimaitijiang M., Sagan V., Sidike P. et al. Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning. *Remote Sensing of Environment*. 2020. N237. 111599 (In English). DOI:10.1016/j.rse.2019.111599.
 21. Rodriguez-Sanchez J., Li C., Paterson A.H. Cotton yield estimation from aerial imagery using machine learning approaches. *Frontiers in plant science*. 2022. N26(13). 870181 (In English). DOI:10.3389/fpls.2022.870181.
 22. Xie C., Yang C. A review on plant high-throughput phenotyping traits using UAV-based sensors. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. N178. 105731 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2020.105731.
 23. Roth L., Barendregt C., Bétrix C.A. et al. High-throughput field phenotyping of soybean: spotting an ideotype. *Remote sensing of environment*. 2022. N269. 112797 (In English). DOI: 10.1016/j.rse.2021.112797.
 24. Zhang J., Zhao B., Yang C. et al. Rapeseed stand count estimation at leaf development stages with UAV imagery and convolutional neural networks. *Frontiers in Plant Science*. 2020. N11. 617 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2020.00617.
 25. Lichman G.I., Korotchenya V.M., Smirnov I.G., Kurbanov R.K. A concept of precision farming based on the notions of the ideal field and digital twin. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2020. N67. 3(40). 81-86 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-3-81-86.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

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

Coauthors' contribution:

Kurbanov R.K. – data processing;
 Tsench Yu.S. – scientific supervision, formulation of research objectives;
 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

03.12.2024
 20.02.2025