

РАЗРЕШАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ЦИФРОВЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ НА РОССИЙСКИХ VTOL-ПЛАТФОРМАХ ДЛЯ ДЕШИФРОВОЧНОЙ ТАКСАЦИИ**Е. В. Сомов¹, С. Л. Шевелев²**¹Тихоокеанский государственный университет

Российская Федерация, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

¹E-mail: 000342@togudv.ru, ²E-mail: shevelev@sibsau.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разрешающего потенциала прототипов цифровых беспилотных аэрофотосъемочных систем на VTOL-платформах российских производителей для дешифровочной таксации леса и городского озеленения. Произведен обзор и анализ основных технических и экономико-эксплуатационных характеристик беспилотных авиационных VTOL-платформ и цифровых мало- и среднеформатных фотокамер с разрешением от 24–150 Мп, применяющихся для беспилотной аэрофотосъемки. Апробирована математическая модель для определения оценок линейного разрешения на местности на основе моделирования функции передачи модуляции системы и ее разрешающей способности. Определены расчетные оценки линейного разрешения на местности для рассматриваемых прототипов беспилотных систем для диапазона высот фотографирования 100–700 м с градацией 100 м. Выбранные границы высоты съемки позволяют для принятых значений фокусного расстояния получать аэрофотоснимки в диапазоне масштабов от 1:2000 до 1:10000. Получены прогнозные значения ширины полосы съемки на местности, позволяющие определять производительность аэрофотосъемочных работ. Предложен оптимальный вариант беспилотной аэрофотосъемочной системы по соотношению цена фотоаппаратуры/точность/производительность для аэрофотосъемки лесных насаждений и городского озеленения, обеспечивающей линейное разрешение на местности получаемых снимков: для высоты съемки 100 м – около 2 см при ширине полосы съемки 70 м; для высоты съемки 400 м – около 4,5 см при ширине полосы съемки 214 м; для высоты съемки 700 м – около 10 см при ширине полосы съемки 470 м.

Ключевые слова: дешифровочная таксация, беспилотная аэрофотосъемка, точность таксационных измерений, линейное разрешение на местности, размер пикселя на местности, функция передачи модуляции, разрешающая способность, ширина полосы съемки, выбор беспилотной авиационной системы.

*Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 2, P. 13–21***THE RESOLUTION POTENTIAL OF DIGITAL UNMANNED AERIAL PHOTOGRAPHY SYSTEMS ON RUSSIAN VTOL PLATFORMS FOR DECRYPTION TAXATION****E. V. Somov¹, S. L. Shevelyov²**¹Pacific National University

136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

¹E-mail: 000342@togudv.ru, ²E-mail: shevelev@sibsau.ru

Abstract. The article discusses the issues of the resolution potential of prototypes of digital unmanned aerial photography systems on VTOL platforms of Russian manufacturers for decryption taxation of forests and urban landscaping. The review and analysis of the main technical and cost-performance characteristics of unmanned aircraft VTOL platforms and digital small- and medium-format cameras with a resolution of 24–150 megapixels used for unmanned aerial photography is carried out. A mathematical model has been tested to determine estimates of linear resolution on the ground based on modeling the modulation transmission function of the system and its resolution. Calculated estimates of the linear resolution on the ground for the considered prototypes of unmanned systems for the range of heights of photographing 100–700 m with a gradation of 100 m have been determined. The selected shooting height limits make it possible to obtain aerial photographs in the scale range from 1:2000 to 1:10000 for the accepted focal length values. The predicted values of the width of the survey band on the ground have been obtained, which make it possible to determine the productivity of aerial photography. The optimal variant of an unmanned aerial photography system is proposed in terms of the ratio of camera price/accuracy/productivity for aerial photography of forest stands

and urban landscaping, providing linear resolution on the terrain of the images taken: for a shooting height of 100 m – about 2 cm with a shooting band width of 70 m; for a shooting height of 400 m – about 4.5 cm with a shooting band width of 214 m; for a shooting height of 700 m, it is about 10 cm with a shooting band width of 470 m.

Keywords: *decryption taxation, unmanned aerial photography, accuracy of taxation measurements, linear resolution on the ground, pixel size on the ground, modulation transmission function, resolution, width of the shooting band, choosing an unmanned aircraft system.*

ВВЕДЕНИЕ

Таксация леса и городского озеленения на основе дешифрирования материалов беспилотной аэрофотосъемки является одним из современных и перспективных технологических направлений, позволяющих значительно снизить трудоёмкость, стоимость и повысить производительность таксационных и инвентаризационных работ. Развитие беспилотных систем в настоящее время происходит с огромной скоростью, в том числе посредством интеграции их с системами машинного обучения, компьютерного зрения, адаптивными системами навигации и искусственного интеллекта. В связи с этим, прикладная таксационная наука должна быть готова к этому новому этапу развития техники, в том числе в направлении разработки и уточнения лесотаксационных моделей и нормативов, адаптированных к беспилотным цифровым технологиям.

Учитывая потребность как в лесном хозяйстве, так и в сфере городского зеленого строительства, в осуществлении аэрофотосъемки значительных площадей, основными рассматриваемыми типами беспилотных авиационных систем (БАС) должны быть носители, способные поддерживать съемку в самолетном режиме: планеры с крыльями жесткой конструкции, fixed-wing type (рис. 1, а), а также гибридные модели – VTOL, vertical take-off and landing (рис. 1, б), представляющие собой самолет с наличием роторов, обеспечивающих вертикальный взлет и посадку.

В последние несколько лет наблюдается своеобразный бум отечественного дроностроения, одним из ключевых направлений которого является производство VTOL-платформ. Использование VTOL по сравнению с классическим самолетом может приводить к некоторому удорожанию системы, а также снижению дальности полета, массы полезной нагрузки и очевидно устойчивости полета, однако при этом позволяет отказаться от использования взлетной площадки и посадочного парашюта (в конструкциях самолетов дополнительно к парашюту может использоваться и баллонет), что значительно упрощает эксплуатацию VTOL по сравнению с БАС самолетного типа и принципиально расширяет возможности их применения в условиях леса и городской ситуации. Для сравнения, требуемая площадка для взлета и посадки при размахе крыла 3–4 м: VTOL – 10×10 м; самолетный тип – около 200 м (с учетом требуемого пространства для набора высоты при взлете и возможного сноса БАС на парашюте при посадке в условиях воздействия ветра).

Принимая во внимание ранее отмеченное нами распространение не всегда адекватного мнения в отношении возможностей пространственного разрешения изображений, полученных посредством беспилотных съемок [15], в данной работе была поставлена

цель: дать расчетные оценки потенциала линейного разрешения на местности (ЛРМ) цифровых беспилотных аэрофотосъемочных систем (ЦАФС) на VTOL-платформах российских производителей с использованием наиболее распространенных в настоящее время фотокамер для беспилотной аэрофотосъемки для последующего определения возможных пределов точности дешифровочной таксации на современном уровне развития цифровой фотоаппаратуры и отечественных БАС.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обзор и анализ российских VTOL-платформ осуществлялся в отношении изделий с максимальной взлетной массой до 30 кг (малый тип БАС [4]), способных нести полезную нагрузку от 2,5 кг (фотокамера, фотообъектив, гиросtabilизирующая платформа и др.). Основные технические характеристики носителей, удовлетворяющих данным требованиям, получены на основе материалов официальных сайтов производителей, представлены в табл. 1, где упорядочены по типу маршевого двигателя и максимальной дальности полета со штатной полезной нагрузкой. Цены и гарантийный срок эксплуатации приведены по состоянию на январь 2026 г. по данным маркетплейса Налетай.рф [10].

Обзор фотокамер и соответствующих фотообъективов, имеющих применение в беспилотной аэрофотосъемке, производился в отношении комплекта аппаратуры с максимальной массой до 2 кг. Основные технические характеристики фотооборудования, удовлетворяющего данным требованиям, получены также на основе материалов официальных сайтов и рекламных проспектов производителей, представлены в табл. 2, где упорядочены по типу затвора и разрешению цифрового сенсора.

Определение расчетных оценок линейного разрешения на местности для прототипов ЦАФС осуществлялось в соответствии с ранее предложенным алгоритмом [15]. При расчетах в целях дальнейшего сравнения вариантов ЦАФС использовались следующие параметры аэрофотосъемки:

- путевая скорость носителя: 90 км/ч – принята как медиана значений крейсерской скорости рассматриваемых вариантов VTOL-платформ, которая обеспечивает наибольшую дальность полета при минимальном километровом расходе топлива (электроэнергии);

- минимальная граница высоты фотографирования (высоты полета над средней плоскостью) задавалась исходя из того, что условия проведения аэрофотосъемки городского озеленения должны обеспечивать безопасность полетов над застроенной террито-

рией, по аналогии, например, с кадастровой аэрофото-съемкой. Для этого высоту полета рекомендуется устанав-ливать с превышением не менее 50 м от максималь-ной высоты объектов (рельеф, элементы застройки и т. д.) в районе проведения съемок [16]. Этого же принципа, как правило, стоит придерживаться и при аэрофото-съемке лесных территорий, может быть за исключением проведения специальных обследований;

- тип объектива фотокамеры: нормально-уголь-ный [8] (во избежание «развала» деревьев на краях снимка, препятствующего стереоскопическому де-шифрированию [5]);

- фокусное расстояние объектива: принималось обеспечивающим угол зрения для нормальных объек-тивов: для полнокадровых камер (full frame) – 50 мм; для камер с кроп-фактором больше 1 (тип сенсора Sony APS-C) – 35 мм, что соответствует эквивалент-ному фокусному расстоянию для полного кадра – 53,7 мм; для среднеформатных – 70 мм;

- допустимый сдвиг изображения (продольный и поперечный): 0,3 пикс – принят в соответствии с дей-ствующей лесоустроительной инструкцией [11];

- выдержка (фактическая): 1/1250 (солнечная по-года, бесснежный период) – принята исходя из реко-мендаций по настройке аэрофотокамер, предлагаемых производителями БАС [3], а также с учетом имеюще-гося опыта применения БАС в других областях [16]. При расчетах использовалась эффективная выдержка – часть фактической выдержки, обеспечиваемая опти-ческим КПД затвора (принят для современных фото-камер – 95 % [8]);

- диафрагма (знаменатель относительного отвер-стия объектива), оценочно: 4,5 для полнокадровых ка-мер и камер с кроп-фактором больше 1 – принята ис-ходя из анализа метаданных изображений реальной VTOL-съемки (солнечная погода, бесснежный период), а также на основе рекомендаций по предполетной на-стройке фотокамер некоторых БАС [3]; 5,6 для сред-неформатных камер, как максимальный предел или единственный вариант для рассматриваемых моделей.

Разрешающая способность ЦАФС определялась графически, как абсцисса точки пересечения кривых контраста изображения – $K'(N)$ и порогового контра-ста объекта – $K_n(N)$ [9; 13; 14]. Уточнение получен-ных по графику значений осуществлялось посредст-вом программного пересчета значений K' и K_n в диа-пазоне пространственной частоты $N = 1 \text{ мм}^{-1}$ от гра-фического значения, принятого в качестве левой гра-ницы диапазона уточнения, с градацией $0,1 \text{ мм}^{-1}$ и последующим определением N , для которой расхож-дение между K' и K_n по модулю минимально.

Для расчета величины контраста объекта, в усло-виях одинакового освещения его деталей, использова-лись справочные значения коэффициентов спектраль-ной яркости для опорной длины волны $0,550 \text{ мкм}$ [7]: объект съемки – зеленая крона сосны ($r_{об} = 0,054$ – спелый древостой, полный лист); фон – кроны лист-венных древесных пород в осенний период ($r_{ф} = 0,168$ – для 4-го типа кривых отражательной способности лесных насаждений).

Для учета влияния атмосферной дымки на сниже-ние контраста изображения вместо определения функ-ции передачи модуляции (ФПМ) использовался коэф-фициент передачи модуляции, предполагая его незави-симость от пространственной частоты [1; 8; 13], опре-деляемый как отношение модуляции в изображении к модуляции в объекте с учетом коэффициента задым-ленности атмосферы для конечных высот [8].

При расчете ФПМ за турбулентность атмосферы оценка углового размера минимально разрешаемого объекта на местности принималась равной $2,5 \times 10^{-6}$ рад (для хороших условий наблюдения, вниз, через сво-бодную атмосферу, с высоты менее 1700 м) [17].

Поскольку считается, что ФПМ современных цифровых сенсоров не приводит к существенному снижению разрешающей способности съемочной сис-темы и данной составляющей ФПМ ЦАФС можно пренебречь без значимого ущерба для точности рас-четных оценок [6], расчет ФПМ сенсора не произво-дился.

Учитывая, что величина случайной составляющей линейного и углового сдвига изображения в реальных условиях подвержена постоянным колебаниям, то для целей сравнения вариантов ЦАФС было решено огра-ничиться расчетом только ФПМ регулярной состав-ляющей линейного сдвига, тем самым помещая срав-няемые варианты ЦАФС в одинаковые условия ки-нетического воздействия атмосферы. Впоследствии, на этапе анализа расчетного ЛРМ с эксперименталь-ными значениями, можно учитывать случайные со-ставляющие сдвига от движения самолета в комплек-се с другими неучтенными факторами (например, сдвиг изображения от вибрации силовой установки) посредством введения коэффициента запаса разре-шающей способности, по аналогии с подобной прак-тикой, существующей в инженерных (например, прочностных) расчетах.

Расчет размера пикселя на местности (GSD) про-изводился по известной формуле [18]. По этой же формуле рассчитывалась ширина полосы съемки на местности при замене размера пикселя на размер длинной стороны сенсора.

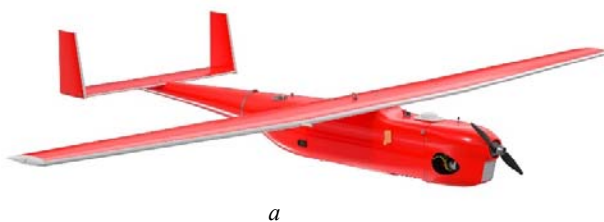


Рис. 1. Типы БАС, способные поддерживать аэрофото-съемку в самолетном режиме:
а – самолетный; б – гибридный (VTOL)

Таблица 1

Основные характеристики российских VTOL-платформ (макс. взлетная масса до 30 кг)

БАС	Аист	Supercam SX350	VolJet VT7	Ласточка / OG-25	Легионер E29	Рассвет-35Э	IRBIS 536E	ОМДЖЕТ 04	Аякс V300
Дальность полета (max), км	150	160	200	200	220	250	290	350	450
Крейсерская скорость, км/ч	100	80	80	100	87,5	101	115	72	≈ 70
Грузоподъемность, кг	5	2,5	9	10	3	5	7	3	6
Высота полета (max), км	3	5	1,5	5,5	3	2	5	1,8	4
Размах крыла, м	3,6	3,2	3,2	4,5	4	3,5	3,6	3,7	3
Тип маршевого двигателя	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД
Дальность линии связи, км	100	50	40	200	50	15	120	40	100
Срок гарантии, лёт.ч/лет	75/1	100/1	50/0,5	500/1	200/1	–/1	500/1	150/1	–/1
Цена, млн руб.	н/д	4,3	1,7	6,9	11,0	2,5	6,0	3,4	н/д

Продолжение табл. 1

БАС	InnoVtol-3s	Патруль-30	G25 12VVP	ARA-PRO-WM3-ICE	SIGMA-m3	Легионер G29s	Беркут-30	ДИАМ 20К	Рассвет-37Г
Дальность полета (max), км	300	300	350	400	500	550	650	800	900
Крейсерская скорость, км/ч	80	90	79	90	86,6	90	90	85	101
Грузоподъемность, кг	7	7	4,7	7	5	4	5	5	10
Высота полета (max), км	2,5	н/д	3	3	3	3,5	3	2	2
Размах крыла, м	3	3,9	2,6	3,7	4	4	3	3,9	3,7
Тип маршевого двигателя	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
Дальность линии связи, км	40	н/д	30	н/д	100	50	100	100	15
Срок гарантии, лёт.ч/лет	240/1	–/1	100/–	–/1	300/1	200/1	50/-	420/1	–/1
Цена, млн руб.	7,9	8,0	2,3	3,5	6,7	11,7	4,0	10,2	3,6

Примечание: ЭД – электродвигатель; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; н/д – нет данных.

Таблица 2

Основные технические характеристики некоторых фотокамер для БАС-съемки

Фотокамера	Sony ZV-E10	Sony A6000	Sony ILCE-7RM2	Sony ILCE-7RM3	Sony A7R IV	Sony ILX-LR1	Fujifilm GFX 100S II	Sony DSC-RX1RM2
Разрешение сенсора, Мпикс	24,0	24,0	42,2	42,2	60,2	60,2	101,8	42,2
Размер сенсора, мм	23,5×15,6	23,5×15,6	35,9×24,0	35,9×24,0	35,7×23,8	35,7×23,8	44,0×33,0	35,9×24,0
Размер изображения, пикс	6000×4000	6000×4000	7952×5304	7952×5304	9504×6336	9504×6336	11648×8736	7952×5304
Диапазон ISO (базовый)	100-32000	100-25600	100-25600	100-32000	100-32000	100-32000	80-12800	100-25600
Тип затвора	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ц
Минимальная выдержка, с	1/4000	1/4000	1/8000	1/8000	1/8000	1/8000	1/32000	1/4000
Скорость съемки, кадр/с	3-11	2,5-11	2,5-5	3-10	3-10	2,5-8	2-7	2,5
Масса (с объективом), кг	0,497	0,498	0,799	0,831	0,839	0,417	1,663	0,561
Фокусное расстояние, мм	35	35	50	50	50	50	55	50
Диафрагма	1,8-22	1,8-22	2,5-22	2,5-22	2,5-22	2,5-22	2,8-4	2,5-22

Продолжение табл. 2

Фотокамера	CHCNAV C5	RIEBO-R4P	RIEBO-R6P	CHCNAV C6	Phase One IXU-RS180	Phase One iXM-RS100F	RIEBO R10Pro	Phase One iXM-RS150F
Разрешение сенсора, Мпикс	44,7	44,7	60,8	61,0	80,2	101,1	101,8	151,3
Размер сенсора, мм	36,0×24,0	35,9×23,9	35,9×23,9	36,0×24,0	53,7×40,4	53,4×40	43,8×32,8	53,4×40
Размер изображения, пикс	8184×5460	8192×5456	9552×6368	9564×6376	10328×7760	11608×8708	11648×8736	14204×10652
Диапазон ISO (базовый)	100-3200	50-6400	50-6400	100-3200	35-800	50-6400	100-6400	50-6400
Тип затвора	Ц	Ц	Ц	Ц	Ц	Ц	Ц	Ц
Минимальная выдержка, с	1/2000	1/2000	1/2000	1/2000	1/2500	1/2500	1/2000	1/2500
Скорость съемки, кадр/с	1	2	2	1	1,25	1,6	2	2
Масса (с объективом), кг	0,29	0,345	0,345	0,29	1,51	1,58	0,355	1,58
Фокусное расстояние, мм	35	40	40	35	70	70	50	70
Диафрагма	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6-22	5,6	5,6-22

Примечание: Ш – шторно-щелевой затвор, Ц – центральный затвор.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ российских VTOL-платформ (табл. 1) показывает, что в настоящее время на рынке представлен достаточно широкий их ассортимент, производство которого осуществляется различными по типу и величине предприятиями: от малых частных фирм до крупных компаний, входящих в состав государственных корпораций. Основные технические характеристики, имеющие значение для аэрофотосъемки, находятся в следующих диапазонах: грузоподъемность (максимальная масса полезной нагрузки): 2,5–10 кг; максимальная дальность полета (по типам маршевого двигателя): 150–450 км для ЭД, 300–900 км для ДВС; причем дальность изменяется в зависимости от массы полезной нагрузки, например (ориентировочно), для ДИАМ 20К: 765 км – 1,5 кг; 595 км – 3 кг; 425 км – 5 кг; для VolJet VT7: 200 км – 1 кг; 160 км – 5 кг; крейсерская скорость: 70–115 км/ч; максимальная высота полета: 1,5–5,5 км; дальность действия линии связи: 15–200 км.

Некоторые стоимостно-эксплуатационные характеристики:

- цены за платформу варьируют в широких пределах: от 1,7 до 11,7 млн руб., что ставит вопрос о качестве изготовления отдельных моделей, их надежности, возможном сроке эксплуатации, а также о наличии и эффективности сервисной службы; с другой стороны, опыт использования БАС в смежных областях показывает, что небольшие клиенто-ориентированные частные компании, реализующие продуктовый подход, вполне могут конкурировать с крупными предприятиями, работающими на госзаказ, как по качеству и функциональности продукции, так и по ее стоимости;

- гарантийный срок эксплуатации: от 50 до 500 летних часов; кроме того, отдельные производители указывают возможный срок службы изделия, например, для БАС Легионер (ООО «ГК Тихие крылья») – 2800 летних часов или 5 лет.

Большинство производителей предлагают возможность интеграции со своими платформами съемочной аппаратуры заказчика (в качестве специальной опции).

Анализ линейки фотокамер, имеющих применение в беспилотной аэрофотосъемке, показывает достаточно широкий их ассортимент. В основном это аппаратура иностранного производства, однако встречаются также отечественные сборки аэрофотокамер и сопутствующего оборудования на основе зарубежных комплектующих. Базовые технические характеристики, имеющие значение для аэрофотосъемки, следующие: формат сенсора: малый, средний; разрешение сенсора: 24–60 Мп (для малоформатных), 80–150 Мп (для среднеформатных); тип затвора: центральный, шторно-щелевой; минимальная выдержка: 1/2000–1/32000 с; скорость съемки: 1–11 кадр/с; масса (с объективом): 0,290–1,663 кг.

Для изучения влияния разрешения цифрового сенсора фотокамеры на ЛРМ выбрано шесть вариантов (прототипов) ЦАФС на основе аэрофотокамер с разрешением от 24 до 150 мегапикселей. Расчетные оценки ЛРМ, GSD, а также ширины полосы съемки на

местности для сравниваемых вариантов ЦАФС на различных высотах фотографирования при заданных параметрах аэрофотосъемки приведены в табл. 3. Поскольку изменение диафрагмы между 4,5 и 5,6 для рассматриваемых параметров аэрофотосъемки приводит лишь к незначительным изменениям ЛРМ (0,1–0,2 см), то совокупность можно считать однородной и пригодной для сравнительного анализа. Выбранные границы высот фотографирования составляют 100–700 м с градацией 100 м, что позволяет для принятых значений фокусного расстояния получать аэрофотоснимки в диапазоне масштабов от 1:2000 до 1:10000 [2; 12].

Анализ полученных данных показывает:

- 1) увеличение ЛРМ (уменьшение значений) с увеличением разрешения цифрового сенсора фотокамеры с 24 Мп до 150 Мп: при Н = 100 м – с 2,4 см до 1,6 см; при Н = 400 м – с 8,6 см до 4,6 см; при Н = 700 м – с 15,3 см до 8,0 см;

- 2) уменьшение ЛРМ (увеличение значений) с увеличением высоты фотографирования со 100 м до 700 м: для 24 Мп – с 2,4 см до 15,3 см; для 60 Мп – с 1,9 см до 10,6 см; для 150 Мп – с 1,6 см до 8,0 см;

- 3) увеличение ширины полосы съемки на местности с увеличением высоты фотографирования со 100 м до 700 м, в среднем: с 73,2 м до 513 м.

Наиболее оптимальным прототипом ЦАФС по соотношению цена фотоаппаратуры/точность/производительность, на наш взгляд, является VTOL-платформа с разрешением сенсора фотокамеры 60 Мп (сегмент малоформатных полнокадровых камер): при Н = 100 м ЛРМ снимков составит около 2 см; при достаточности ЛРМ снимков 10 см (например, как точность измерения крон деревьев) ЦАФС позволяет производить съемку шириной полосы порядка 470 м за один маршрут (Н = 700 м). Для сравнения, ЦАФС с разрешением сенсора 150 Мп (среднеформатная камера) при стоимости порядка \$25000 (Phase One iXM-RS150F), дает прирост ЛРМ, с учетом увеличения фокусного расстояния до 70 мм: при Н = 100 м только на 0,3 см (15,8 %), при Н = 700 м на 2,5 см (25 %), что может быть достаточно просто компенсировано использованием фотокамеры меньшего разрешения за счет снижения высоты фотографирования и, соответственно, некоторого уменьшения ширины полосы съемки (производительности работ).

Оценки пространственного разрешения по GSD, как и предполагалось, получаются завышенными по сравнению с оценками по ЛРМ, примерно в два раза и более, что объяснялось ранее [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований для прототипов ЦАФС на основе VTOL-платформ российских производителей, оснащенных мало- и среднеформатными аэрофотокамерами с разрешением сенсора от 24–150 Мп, получены следующие результаты:

- апробирована математическая модель (расчетный алгоритм) для определения оценок ЛРМ (данные согласуются с теоретическими положениями);

- получены значения ЛРМ для диапазона высот фотографирования 100–700 м с градацией 100 м (при заданных параметрах аэрофотосъемки);

Таблица 3

Расчетные оценки параметров разрешения аэрофотоснимков для прототипов ЦАФС

Модель фотокамеры для прототипа ЦАФС	Sony ZV-E10	Sony DSC-RX1RM2	Sony ILX-LR1	Phase One IXU-RS180	Phase One iXM-RS100F	Phase One iXM-RS150F
Разрешение сенсора, Мп	24	42	60	80	101	150
Размер пикселя сенсора, мкм	3,9	4,5	3,8	5,2	4,6	3,8
Фокусное расстояние, мм / диафрагма	35/4,5	50/4,5	50/4,5	70/5,6	70/5,6	70/5,6
Высота фотографирования 100 м						
ЛРМ / GSD, см	2,4 / 1,1	2,1 / 0,9	1,9 / 0,8	1,9 / 0,7	1,8 / 0,7	1,6 / 0,5
Ширина полосы съемки, м	67	72	71	77	76	76
Высота фотографирования 200 м						
ЛРМ / GSD, см	4,4 / 2,2	3,6 / 1,8	3,2 / 1,5	3,1 / 1,5	2,8 / 1,3	2,5 / 1,1
Ширина полосы съемки, м	134	144	143	153	153	153
Высота фотографирования 300 м						
ЛРМ / GSD, см	6,5 / 3,4	5,3 / 2,7	4,6 / 2,3	4,4 / 2,2	4,0 / 2,0	3,5 / 1,6
Ширина полосы съемки, м	201	215	214	230	229	229
Высота фотографирования 400 м						
ЛРМ / GSD, см	8,6 / 4,5	7,0 / 3,6	6,0 / 3,0	5,8 / 3,0	5,3 / 2,6	4,6 / 2,1
Ширина полосы съемки, м	269	287	286	307	305	305
Высота фотографирования 500 м						
ЛРМ / GSD, см	10,8 / 5,6	8,7 / 4,5	7,6 / 3,8	7,3 / 3,7	6,6 / 3,3	5,7 / 2,7
Ширина полосы съемки, м	336	359	357	384	381	381
Высота фотографирования 600 м						
ЛРМ / GSD, см	13,0 / 6,7	10,5 / 5,4	9,1 / 4,5	8,7 / 4,5	8,0 / 3,9	6,8 / 3,2
Ширина полосы съемки, м	403	431	428	460	458	458
Высота фотографирования 700 м						
ЛРМ / GSD, см	15,3 / 7,8	12,3 / 6,3	10,6 / 5,3	10,2 / 5,2	9,3 / 4,6	8,0 / 3,8
Ширина полосы съемки, м	470	503	500	537	534	534

– получены прогнозные данные о ширине полосы съемки на местности, позволяющие определять производительность аэрофотосъемочных работ для лесных и городских территорий;

– предложен оптимальный вариант ЦАФС по соотношению цена фотоаппаратуры/точность/производительность для беспилотной аэрофотосъемки лесных насаждений и городского озеленения.

Дальнейшее развитие исследований необходимо вести в направлении сравнения расчетных оценок с экспериментальными значениями ЛРМ в целях уточнения используемой модели для ЦАФС с различными техническими характеристиками платформы-носителя и аэрофотосъемочного оборудования при разных параметрах съемки. Осуществление тестовых аэрофотосъемок предполагается проводить в том числе с использованием радиальных мир сниженного контраста (приближенного к диапазону контрастов крон древесных насаждений) при сравнении полученных результатов с реальными значениями точности таксационных измерений крон деревьев на таксационно-дешифровочных участках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Алмазов И. В., Овечкин В. Н., Стеценко А. Ф., Филиппов В. И., Фимин Р. И. Определение предельных условий аэрофотосъемки в целях выявления на снимках элементов ландшафта с известными размерами и отражательными свойствами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1990. № 3. С. 63–71.

2. Аэрофотосъемочные работы: справочник аэрофотосъемщика / А. А. Попов, Ю. И. Полетаев, Ю. В. Евдокимов и др. М. : Транспорт, 1984. 200 с.

3. Геоскан 701. Руководство по эксплуатации (версия от 19.12.2025 г.). URL: https://download.geoscan.ru/site-files/701/Geoscan_701_Manual.pdf (дата обращения: 09.01.2026).

4. ГОСТ Р 57258–2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения. Введ. 01.06.2017. М. : Стандартинформ, 2016. 8 с.

5. Дмитриев И. Д., Мурахтанов Е. С., Сухих В. И. Лесная аэрофотосъемка и авиация. М. : Лесная промышленность, 1981. 344 с.

6. Жиганов И. Ю. Метрологические основы дистанционных телевизионных методов измерения геометрических параметров объектов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. № 3. С. 117–121.

7. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М. : Изд-во Академии наук СССР, 1947. 272 с.

8. Кучко А. С. Аэрофотография и специальные фотографические исследования. М. : Недра, 1988. 236 с.

9. Молчанов А. С. Методика расчета пороговой модуляционной характеристики цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 9. С. 328–336.

10. Налетай.рф : сайт. URL: https://налетай.рф/catalog/bespilotniki/samolet?takeoff_weight_type=light&launch_method=ac023d9c&sort=popular&page=1 (дата обращения: 09.01.2026).

11. Об утверждении Лесоустроительной инструкции [Электронный ресурс] : приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 5 августа 2022 г. № 510. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/32729?items=1&page=1> (дата обращения: 09.01.2026).

12. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В. В. Загребев, В. И. Сухих, А. З. Швиденко, Н. Н. Гусев, А. Г. Мошкалев. М. : Колос, 1992. 495 с.

13. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. М. : Картгеоцентр – Геодезиздат, 1997. 378 с.

14. Свиридов К. Н., Тюлин А. Е. Разрешающая способность и линейное разрешение для оценки качества и проектирования аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022. № 1. С. 9–29.

15. Сомов Е. В., Шевелев С. Л. Расчетная оценка линейного разрешения на местности цифровой беспилотной аэрофотосъемочной системы для задач таксационного дешифрирования (состояние вопроса, проблематика, модели) // Хвойные бореальной зоны. 2025. № 2. С. 20–26.

16. СТО 11468812.011-2025. Выполнение аэрофотосъемки беспилотными авиационными системами в кадастровой деятельности. Методы и технологии определения местоположения объектов недвижимости с использованием беспилотных авиационных систем. Введ. 21.10.2025. М. : Национальная палата кадастровых инженеров, 2025. 103 с.

17. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. М. : Мир, 1978. 670 с.

18. Leachtenauer J. C., Driggers R. G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: Modeling and performance prediction. Boston ; London : Artech House, 2001. URL: https://www.google.ru/books/edition/Surveillance_and_Reconnaissance_Imaging/f3zUKZZ_WjMC?hl=ru&gbpv=1&pg=PA31&printsec=frontcover (дата обращения: 09.01.2026).

REFERENCES

1. Almazov I. V., Ovechkin V. N., Stecenko A. F., Filippov V. I., Fimin R. I. Opredelenie predel'nykh usloviy aehrofotos'emki v celyah vyyavleniya na snimkakh ehlementov landshafta s izvestnymi razmerami i otrazhatel'nyimi svoystvami // Izv. vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka. 1990. № 3. S. 63–71.

2. Aehrofotos'emochnye raboty: spravochnik aehrofotos'emshchika / A. A. Popov, Yu. I. Poletaev, Yu. V. Evdokimov i dr. M. : Transport, 1984. 200 s.

3. Geoskan 701. Rukovodstvo po ehkspluatacii (versiya ot 19.12.2025 g.). URL: https://download.geoscan.ru/site-files/701/Geoscan_701_Manual.pdf (data obrashcheniya: 09.01.2026).

4. GOST R 57258–2016. Sistemy bespilotnye aviacionnye. Terminy i opredeleniya. Vved. 01.06.2017. M. : Standartinform, 2016. 8 s.

5. Dmitriev I. D., Murahtanov E. S., Suhih V. I. Lesnaya aehrofotos'emka i aviaciya. M. : Lesnaya promyshlennost', 1981. 344 s.

6. Zhiganov I. Yu. Metrologicheskie osnovy distanconnykh televizionnykh metodov izmereniya geometri-

cheskih parametrov ob'ektov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2009. № 3. S. 117–121.

7. Krinov E. L. Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnih obrazovanij. M. : Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1947. 272 s.

8. Kuchko A. S. Aehrofotografiya i special'nye fotograficheskie issledovaniya. M. : Nedra, 1988. 236 s.

9. Molchanov A. S. Metodika rascheta porogovoj modulyacionnoj harakteristiki cifrovih optiko-ehlektronnyh sistem distancionnogo zondirovaniya Zemli // Izv. TulGU. Tehnicheskie nauki. 2020. Vyp. 9. S. 328–336.

10. Naletaj.rf. URL: https://naletaj.rf/catalog/bespilotniki/samolet?takeoff_weight_type=light&launch_method=ac023d9c&sort=popular&page=1 (data obrashcheniya: 09.01.2026).

11. Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noj instrukcii : prikaz Ministerstva prirodnih resursov i ehkologii RF ot 5 avgusta 2022 goda № 510. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/32729?items=1&page=1> (data obrashcheniya: 09.01.2026).

12. Obshchesoyuznye normativy dlya taksacii lesov / V. V. Zagreev, V. I. Suhiih, A. Z. Shvidenko, N. N. Gusev, A. G. Moshkalev. M. : Kolos, 1992. 495 s.

13. Savinyh V. P., Kuchko A. S., Stecenko A. F. Aehrokosmicheskaya fotosemka. M. : Kartgeocentr – Geodezizdat, 1997. 378 s.

14. Sviridov K. H., Tyulin A. E. Razreshayushchaya sposobnost' i linejnoe razreshenie dlya ocenki kachestva i proektirovaniya aehrokosmicheskikh sistem distancionnogo zondirovaniya Zemli // Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy. 2022. № 1. S. 9–29.

15. Somov E. V., Shevelev S. L. Raschetnaya ocenka linejnogo razresheniya na mestnosti cifrovoj bespilotnoj aehrofotos'emochnoj sistemy dlya zadach taksacionnogo deshifirovaniya (sostoyanie voprosa, problematika, modeli) // Hvojnye boreal'noj zony. 2025. № 2. S. 20–26.

16. STO 11468812.011-2025. Vypolnenie aehrofotos'emki bespilotnymi aviacionnymi sistemami v kadaastrovoj deyatel'nosti. Metody i tehnologii opredeleniya mestopolozheniya ob'ektov nedvizhimosti s ispol'zovaniem bespilotnyh aviacionnyh sistem. Vved. 21.10.2025. M. : Nacional'naya palata kadaastrovyh inzhenerov, 2025. 103 s.

17. Frizer H. Fotograficheskaya registraciya informacii. M. : Mir, 1978. 670 s.

18. Leachtenauer J. C., Driggers R. G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: Modeling and performance prediction. Boston ; London : Artech House, 2001. URL: https://www.google.ru/books/edition/Surveillance_and_Reconnaissance_Imaging/f3zUKZZ_WjMC?hl=ru&gbpv=1&pg=PA31&printsec=frontcover (data obrashcheniya: 09.01.2026).

© Сомов Е. В., Шевелев С. Л., 2026

Поступила в редакцию 10.01.2026

Принята к печати 27.04.2026