

**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЛИНЕЙНОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА МЕСТНОСТИ
ЦИФРОВОЙ БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ЗАДАЧ ТАКСАЦИОННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ
(СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ПРОБЛЕМАТИКА, МОДЕЛИ)**

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

E-mail: ¹000342@togudv.ru, ²shevelev@sibsau.ru

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы расчетного оценивания линейного разрешения на местности, как показателя точности таксационно-дешифровочных измерений на цифровых аэрофотоснимках, полученных посредством БПЛА. Работа основана на анализе более 100 научных публикаций по теории и методологии регистрации цифровых изображений, оценки их качества и метрических свойств, общей и лесной аэрофотосъемки, лесотаксационных измерений и лесного дешифрирования, оптимизации выбора БПЛА в применении к задачам таксации леса и городского озеленения. В качестве результатов работы предложены видоизмененный вариант математической модели и расчетного алгоритма, позволяющие на основе определения линейного разрешения на местности цифровой аэрофотосъемочной системы: оценить расчетные пределы точности дешифровочной таксации для современного уровня развития БПЛА; оценить требуемую точность наземных таксационных измерений при разработке дешифровочных моделей для БПЛА-таксации; осуществить адекватный выбор БПЛА в штатной комплектации для производства таксационной аэрофотосъемки; осуществить самостоятельный подбор съемочной аппаратуры БПЛА для решения задач дешифровочной таксации леса и инвентаризации озеленения городов.

Ключевые слова: дешифровочная таксация, беспилотная аэрофотосъемка, точность таксационных измерений, линейное разрешение на местности, размер пикселя на местности, разрешающая способность, функция передачи модуляции, выбор беспилотного летательного аппарата.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 2, P. 20–26

**CALCULATED ESTIMATION OF THE LINEAR RESOLUTION ON THE GROUND
OF A DIGITAL UNMANNED AERIAL PHOTOGRAPHY SYSTEM
FOR TAXATION DECRYPTION TASKS (ISSUE STATUS, PROBLEMATICS, MODELS)**

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, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: ¹000342@togudv.ru, ²shevelev@sibsau.ru

Annotation. The article discusses the problems of calculating the linear resolution on the ground, as an indicator of the accuracy of the taxation and decryption measurements on digital aerial photographs obtained by means of UAV. The work is based on the analysis of more than 100 scientific publications on the theory and methodology of digital image registration, assessment of their quality and metric properties, general and forest aerial photography, forest taxa measurements and forest decoding, optimization of the choice of UAVs in application to the tasks of forest taxation and urban landscaping. As the results of the work, a modified version of the mathematical model and calculation algorithm are proposed, which, based on the determination of the linear resolution on the ground of a digital aerial photography system allows: to assess the estimated accuracy limits of decryption taxation for the current level of UAV development; to evaluate the required accuracy of ground-based taxation measurements when developing decryption models for UAV taxation; to make an adequate choice of UAVs in standard configuration for production of taxicab aerial photography; to carry out an independent selection of UAV filming equipment for solving the tasks of decoding forest taxation and inventory of urban landscaping.

Keywords: decryption taxation, unmanned aerial photography, accuracy of taxation measurements, linear resolution on the ground, pixel size on the ground, resolution, modulation transmission function, choice of unmanned aerial vehicle.

ВВЕДЕНИЕ

Применение данных аэрофотосъемки, полученных посредством беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), для таксационной оценки лесных насаждений практикуется в мире достаточно широко с начала 2000 гг. [8]. В европейских странах данные БПЛА считаются важным компонентом программы расширенной инвентаризации лесов (Enhanced Forest Inventory – EFI) [5]. В России также проводятся исследования по применению БПЛА для лесотаксационного дешифрирования, в том числе лесных культур [1], подроста [19], ведутся работы по созданию аллометрических моделей для оценки биомассы лесов с использованием дронов [18]. Следует констатировать, что разработки по таксации леса на основе БПЛА и создание для этих целей таксационно-дешифровочных нормативов, несмотря на их значимость, в нашей стране находятся на начальном этапе. Не менее важными являются вопросы инвентаризации озеленения городов на основе материалов БПЛА-съемок.

В качестве одного из критериев, позволяющего составить определенное суждение о пространственном разрешении цифрового изображения, сначала за рубежом, а затем и в отечественной практике, стал использоваться размер пикселя на местности – GSD (Ground Sampling Distance), представляющий собой проекцию пикселя цифровой матрицы фотокамеры на земную поверхность [12; 21]. Специалистами утверждается, что при выполнении определенных требований к съемочной аппаратуре и процессу съемки, а также при строгой фотограмметрической обработке точность полученных в результате БПЛА-съемки ортофотопланов может приближаться к единице GSD [17]. К сожалению, данный показатель часто предлагается использовать как меру точности измерений на цифровых изображениях, и соответственно на 3D-моделях, построенных на их основе, предполагая GSD в качестве «цены деления» БПЛА-снимков. Большинство производителей, а за ними и продавцов БПЛА, в рекламных целях используют GSD, как основной параметр разрешения изображений, получаемых их беспилотниками, по причине чего пользователь нередко вводит в заблуждение относительно реальных измерительных возможностей съемочных систем на основе БПЛА [4; 11; 16].

В аэрофотосъемке основным критерием точности измерений по аэрофотоснимкам является линейное разрешение на местности (ЛРМ), то есть минимальный размер объекта на поверхности Земли, который может быть дешифрирован на изображении как отдельный от других объектов [7; 10]. Также и в лесной аэрофотосъемке ЛРМ принято за величину информативности снимка, необходимую для дешифрирования лесных объектов [13]. GSD в свою очередь является всего лишь мерой той составляющей разрешения изображения, которая обусловлена структурой цифровой матрицы фотокамеры [21]. Особенностью матричного сенсора является то, что он осуществляет дискретизацию (пространственную выборку) изображения объекта, и поэтому качество формируемого им цифрового снимка определяется закономерностями восста-

новления непрерывного сигнала из его дискретных отчетов. Фундаментальное значение в теории дискретизации имеет теорема Котельникова (Найквиста), следствие которой состоит в том, что матричный сенсор передает без искажений пространственные частоты, не превышающие половины максимальной частоты, определяемой периодом расположения пикселей [4; 12; 14; 16]. Исходя из этого, оценка пространственного разрешения цифрового снимка по GSD оказывается завышенной в два раза относительно предельно возможного по теореме Котельникова [4; 12; 16]. Определение границы объекта на цифровом снимке (например, границы кроны дерева) с точностью в один GSD является событием, вероятность которого оценивается только лишь в 11 % [11], а устойчивые значения точности реальных измерений получаются значительно хуже [4] и определяются разрешающей способностью используемой цифровой аэрофотосъемочной системы (ЦАФС) с учетом всех потерь модуляции сигнала на пути атмосфера – объектив – сенсор, включая потери за сдвиг изображения в процессе движения БПЛА.

В первом приближении оценить величину ЛРМ цифровых изображений можно посредством расчетов, например, на основе определения функции передачи модуляции ЦАФС, учитывающих по крайней мере основную долю модуляционных потерь. Реальное значение ЛРМ можно адекватно оценить посредством анализа изображений, содержащих специальные тестовые объекты (миры) или путём анализа на изображениях перепадов яркости резких границ объектов [4]. Таким образом, каждая модель БПЛА, являющаяся носителем определенной ЦАФС, будет иметь при заданных параметрах съемки свое значение ЛРМ (свою точность измерений). Соответственно, создаваемые таксационно-дешифровочные модели и нормативы для дешифрирования насаждений по материалам БПЛА-съемки должны разрабатываться с опорой не на GSD, а на величину ЛРМ, которую способна обеспечить ЦАФС.

В связи с вышесказанным, в данной работе была поставлена цель провести обзор теоретических основ и методологических подходов для оценки ЛРМ для ЦАФС, и на этой базе определить варианты математических моделей и алгоритмов расчета для оценки данного параметра при известных технических характеристиках ЦАФС и заданных параметрах полета носителя в условиях БПЛА-съемки крон деревьев в оптическом диапазоне. В дальнейшем это позволит решить вопрос методики выбора оптимальной модели БПЛА или даже укрупненного модульного проектирования БПЛА для задач таксации, а также позволит осуществлять разработку таксационно-дешифровочных нормативов, имеющих заданную точность, согласованную с потенциалом измерительной точности современных цифровых БПЛА-систем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Взгляд на БПЛА, как на средство таксации, требует к нему отношения, как к инструменту для измерений, и, учитывая сложность и специфику данного инструмента, требует междисциплинарного подхода.

В исследовании рассматриваются проблемы расчетной оценки ЛРМ, как показателя точности таксационно-дешифровочных измерений на аэрофотоснимках при использовании ЦАФС, размещенных на беспилотных платформах. Работа основана на анализе научных публикаций по теории и методологии регистрации цифровых изображений, оценки их качества и метрических свойств, общей и лесной аэрофотосъемки, лесотаксационных измерений и лесного дешифрирования, оптимизации выбора БПЛА для решения прикладных и исследовательских задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

ЛРМ определяется известной формулой [7; 10]:

$$L = \frac{H}{2Rf},$$

где H – высота съемки; R – разрешающая способность ЦАФС; f – фокусное расстояние объектива фотокамеры.

Ключевым параметром здесь является разрешающая способность ЦАФС, под которой понимается способность системы раздельно отображать две близко расположенные точки или линии, и которую можно выразить количеством отдельно отображаемых линий на 1 мм изображения, полученного посредством ЦАФС [6; 7]. Существуют различные способы определения разрешающей способности, одним из которых является способ расчета функции передачи модуляции по данным о конструктивных параметрах ЦАФС и который удобно использовать в задачах оптимизации выбора состава ЦАФС.

Функцией передачи модуляции (ФПМ), являющейся частотно-контрастной характеристикой для ЦАФС, называется функция, отражающая потерю модуляции в системе или снижение контраста изображения по отношению к контрасту объекта в зависимости от пространственной частоты, выражаемая соотношением [6; 7]:

$$T(N) = \frac{K'(N)}{K_N},$$

где K' – контраст изображения; K_N – контраст объекта; N – пространственная частота.

Под пространственной частотой N понимается детальность изображения, формируемого ЦАФС, определяемая количеством штрихов тест-объекта (стандартной миры) на 1 мм изображения при условии, что все штрихи видны раздельно (разрешаются) [7, 15].

Минимальный контраст объекта, который еще может быть зарегистрирован сенсором при данных условиях съемки, называется пороговым контрастом, а соответствующая ему частота – граничной частотой, определяющей предел разрешения системы [6; 7]. Пороговый контраст сенсора зависит от пространственной частоты, и эта зависимость есть функция порогового контраста (ФПК), рассчитываемая по формуле Сэндвика [2; 15; 16]:

$$K_n(N) = \frac{N}{2R_m - N},$$

где R_m – разрешающая способность сенсора фотокамеры, определяемая при контрасте изображения, равном 1. Здесь R_m для цифровых сенсоров определяется из выражения [12; 16]:

$$R_m = \frac{1}{2p},$$

где p – размер пиксела цифрового сенсора (матрицы).

Исходя из определений разрешающей способности и порогового контраста, разрешающая способность ЦАФС может быть определена, как пространственная частота, при которой контраст изображения равен пороговому контрасту объекта, и тогда:

$$K'(N) = K_N \cdot T(N) = K_n(N) = \frac{N}{2R_m - N}.$$

Если функции $K'(N)$ и $K_n(N)$ определены, то разрешающая способность ЦАФС может быть найдена графически, как абсцисса точки пересечения кривых $K'(N)$ и $K_n(N)$ [12; 15; 16].

Контраст объекта съемки при условии, что детали объекта находятся в условиях одинакового освещения, определяется по формуле [6; 15]:

$$K_N = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{r_{\max} + r_{\min}},$$

где $r_{\max}$ и $r_{\min}$ – коэффициенты спектральной яркости самой светлой и самой темной деталей объекта фотографирования (могут использоваться r объекта и r фона).

Таким образом, задача определения разрешающей способности ЦАФС сводится к расчету результирующей ФПМ ЦАФС, которая представляет собой ряд коэффициентов, определяющих снижение интенсивности контраста изображения по отношению к контрасту объекта от влияния отдельных звеньев системы для каждого заданного значения пространственной частоты [6; 9; 15]:

$$T(N) = T(N)_a T(N)_o T(N)_m T(N)_s,$$

где $T(N)_a$ – ФПМ атмосферы; $T(N)_o$ – ФПМ аэрофотосъемочного объектива; $T(N)_m$ – ФПМ цифрового сенсора; $T(N)_s$ – ФПМ сдвига изображения.

ФПМ вышеуказанных звеньев системы можно определить следующим образом:

А) для атмосферы [9]:

$$T(N)_a = T(N)_h T(N)_v,$$

где $T(N)_h$ – ФПМ атмосферной дымки; $T(N)_v$ – ФПМ за турбулентность атмосферы.

ФПМ атмосферной дымки в случае, когда геометрическая толщина рассеивающего слоя атмосферы принимается равной высоте фотографирования, может быть рассчитана по формуле [15]:

$$T(N)_a = e^{-\mu d} \left(\sqrt{1 + \frac{N^2 d^2}{\alpha^2}} + \frac{Nd}{\alpha} \right)^{\frac{\alpha \mu}{N}}, \quad (1)$$

где μ – показатель рассеяния для атмосферного воздуха; d – геометрическая толщина рассеивающего слоя; α – параметр индикатрисы рассеяния.

За ФПМ турбулентной атмосферы можно принять [20]:

$$T(N)_v = \exp(-2\pi^2 \gamma^2 f^2 N^2), \quad (2)$$

где γ – оценка углового размера минимально разрешаемого объекта на местности, определяемая в зависимости от высоты съемки [20].

Для определения влияния рассеивающих свойств атмосферы на снижение контраста изображения вместо определения ФПМ можно ограничиваться вычислением коэффициента снижения контраста объекта, наблюдаемого сквозь слой атмосферы, предполагая его независимость от пространственной частоты [2, 15].

Б) для аэрофотосъемочного объектива [2; 15]:

$$T(N)_o = \left(1 - \frac{4}{\pi} n_0 \lambda N\right) \cdot \exp\left(-\frac{0,0035 f \cdot \text{tg}^2 \beta \cdot N}{n_0^2}\right), \quad (3)$$

где n_0 – знаменатель относительного отверстия диафрагмы; λ – опорная длина волны; β – половина угла поля изображения. Здесь β определяется по формуле [6]:

$$\beta = \arctg\left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2f}\right),$$

где a и b – размеры сторон фотоснимка, вписываемого в поле изображения (для цифровых фотокамер – линейные размеры цифрового сенсора).

ФПМ оптических систем могут быть вычислены по их конструктивным параметрам с ошибкой отклонения от экспериментальных значений $\pm 0,04$ – $0,07$ [6; 7]. Для некоторых моделей объективов в открытых источниках бывают доступны графики ФПМ от компании-производителя.

В) для цифрового сенсора:

ФПМ цифрового сенсора определяется следующими составляющими [14]:

$$T(N)_m = T(N)_g T(N)_t T(N)_d, \quad (4)$$

где $T(N)_g$ – ФПМ геометрии, учитывающая потери от влияния размеров и шага размещения пикселей на поверхности матрицы; $T(N)_t$ – ФПМ переноса, учитывающая потери от неэффективности переноса зарядов; $T(N)_d$ – ФПМ диффузии, учитывающая потери от диффузионного растекания зарядов.

Расчетные формулы составляющих ФПМ цифрового сенсора здесь не приводятся ввиду их специфики, относящейся к области электроники. Они описаны во многих специализированных работах [9; 14 и др.], и расчеты на их основе при наличии данных о параметрах структуры цифрового сенсора сложности не представляют.

Г) для сдвига изображения:

В зависимости от источника возникновения различают линейный и угловой сдвиг [6]. Тогда ФПМ сдвига:

$$T(N)_s = T(N)_w T(N)_\varphi,$$

где $T(N)_w$ – ФПМ линейного сдвига; $T(N)_\varphi$ – ФПМ углового сдвига.

Линейный сдвиг в свою очередь представлен регулярной составляющей, обусловленной поступательным движением носителя, и случайной составляющей, возникающей по причине линейного смещения носителя перпендикулярно направлению движения и вдоль вертикальной оси [6]. Кроме того, могут быть случайные ускорения БПЛА от попутного или встречного ветра. Наибольшее влияние на передачу контраста оказывает линейный регулярный сдвиг, ФПМ которого можно определить из выражения [6]:

$$T(N)_w = \frac{\sin(\pi \delta N)}{\pi \delta N} \cdot \frac{\sin\left(\pi \delta \frac{1-\eta}{\eta} N\right)}{\pi \delta \frac{1-\eta}{\eta} N}, \quad (5)$$

где δ – фотографический сдвиг изображения; η – оптический КПД затвора фотокамеры.

При фотографировании объектов, имеющих большую яркость, фотографический сдвиг мало отличается от геометрического сдвига [6], следовательно, для древесного полога в период яркой осенней окраски можно принять $\delta \approx \delta_w$; здесь δ_w – геометрический сдвиг изображения [6; 7]:

$$\delta_w = \frac{wt}{m} = wt \frac{f}{H}, \quad (6)$$

где w – линейная скорость БПЛА; t – время экспонирования (выдержка); m – знаменатель масштаба фотографирования.

Для объектов летнего ландшафта пользуются формулой [6]: $\delta \approx (0,6-0,7)\delta_w$.

Линейный регулярный сдвиг может значительно снижать разрешающую способность системы и ухудшать ее ФПМ [6].

Угловой сдвиг возникает из-за неустойчивости движения носителя в атмосфере под воздействием турбулентных потоков. В условиях БПЛА-съемки в отличие от аэрофотосъемки с использованием пилотируемых самолетов угловой сдвиг может достигать значительных величин, а для небольших БПЛА может и превышать значения линейного сдвига. Данная составляющая имеет стохастический характер и поэтому, как и случайная составляющая линейного сдвига, может быть описана, как случайный сдвиг, формула ФПМ которого имеет вид [20]:

$$T(N)_\varphi = \exp(-2\pi^2 \sigma^2 N^2), \quad (7)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение случайного сдвига в плоскости изображения [20].

Величины случайных линейных сдвигов изображения вдоль продольной (по ходу движения носителя) и поперечной осей можно также описать формулой (6) при замене линейной скорости движения БПЛА на оценку скорости случайных смещений. Величины угловых сдвигов изображения вокруг про-

дольной, поперечной и вертикальной осей определяются соответственно по формулам [6]:

$$\varphi_x = \frac{f \cdot \omega_x}{\cos^2 \beta} t; \quad \varphi_y = \frac{f \cdot \omega_y}{\cos^2 \beta} t; \quad \varphi_z = q \omega_z t,$$

где ω_x , ω_y , ω_z – угловые скорости колебаний аэрофотокамеры соответственно вокруг продольной, поперечной и вертикальной осей; q – расстояние от центра снимка до точки на изображении, для которой определяется сдвиг.

Смоделировав вероятностные распределения возможных значений равнодействующих случайных составляющих линейного и углового сдвигов в ходе полета БПЛА в заданных атмосферных условиях, можно получить оценку их σ .

Следует сказать, что существуют и более сложные подходы, учитывающие дополнительные составляющие ФПМ для решения специальных задач [3; 9 и др.].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный обзор и анализ литературных источников по теме работы (всего более 100, ключевые из которых приведены в библиографическом списке) позволяют сделать следующие выводы:

- исследования по адаптации технологии БПЛА для создания лесотаксационно-дешифровочных нормативов в нашей стране находятся на начальном этапе; подобные работы для задач инвентаризации городских насаждений практически отсутствуют;

- имеет место значительное распространение ошибочного мнения о возможности использования GSD для оценки точности таксационных измерений на цифровых аэрофотоснимках, что приводит к завышенным оценкам (более чем в два раза) с варьированием величины ошибок в зависимости от модели БПЛА и характеристик ЦАФС;

- имеющаяся теория и математические описания позволяют производить расчетную оценку ЛРМ, как критерия точности измерений на аэрофотоснимках, на основе моделирования ФПМ, однако различные подходы, уровень и временной период исследований создают в одних случаях чрезмерное упрощение предлагаемых моделей, неполное их соответствие условиям функционирования БПЛА в отличие от пилотируемых самолетов, отсутствие учета особенностей работы цифровой фототехники, а в других – их усложнение для специальных целей, что бывает малоприспособно для других прикладных задач.

В данной работе предложен видоизмененный вариант математической модели и расчетного алгоритма, учитывающий наиболее важные факторы, влияющие на ФПМ (формулы (1)–(5), (7)), и позволяющие, используя технические характеристики цифровой фотокамеры, фотообъектива, параметры полета БПЛА, спектральные характеристики атмосферы и снимаемых объектов, произвести предварительную оценку разрешающего и измерительного потенциала ЦАФС, на основе которой возможно:

- определить расчетные пределы точности дешифровочной таксации для современного уровня раз-

вития беспилотных ЦАФС (отечественных и зарубежных);

- определить требуемую точность наземных таксационных измерений при разработке дешифровочных моделей для БПЛА-таксации;

- осуществить адекватный выбор ЦАФС для производства таксационной аэрофотосъемки в штатной комплектации БПЛА, предлагаемой компаниями-производителями;

- осуществить самостоятельный подбор состава модулей ЦАФС (носитель + фотокамера + объектив) для решения задач дешифровочной таксации леса и инвентаризации озеленения городов (некоторые компании предлагают пользовательский выбор камер и объективов для своих платформ или модернизацию ЦАФС под требования заказчика).

Предложенный алгоритм может быть адаптирован для технологий аэрофотосъемки с использованием БПЛА самолетного, мультикоптерного и гибридного типов. Описанный подход имеет особенное значение для решения задач, связанных с детальным анализом цифровых аэрофотоизображений на пиксельном и субпиксельном уровнях [4]. На основе предложенных моделей и алгоритма разработана программа UAS-FP, позволяющая оптимизировать процесс расчета и делающая его доступным для реализации в производственных структурах лесного хозяйства и городского зеленого строительства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Опыт применения беспилотного летательного аппарата для инвентаризации и оценки опытных лесных культур Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области / А. С. Алексеев, Ю. И. Данилов, А. А. Никифоров [и др.] // Труды Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесн. хоз-ва. 2020. № 2. С. 46–58.

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

3. Веселов Ю. Г., Глушко В. А., Молчанов А. С. Математическая модель аэрофотосистемы, построенной на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда // Наука и образование : науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013. № 10. С. 219–232.

4. Замшин В. В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 1. С. 43–51.

5. Князева С. В., Никитина А. Д., Гаврилюк Е. А., Тихонова Е. В., Королева Н. В. Оценка биометрических параметров сосновых древостоев по спутниковым данным WorldView-3 и материалам беспилотной аэрофотосъемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. № 6. С. 93–107.

6. Кучко А. С. Аэрофотография. М. : Недра, 1974. 272 с.

7. Лаврова Н. П., Стеценко А. Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование. М. : Недра, 1981. 296 с.

8. Медведев А. А., Тельнова Н. О., Кудиков А. В., Алексеенко Н. А. Анализ и картографирование структурных параметров редкостойных северотаёжных лесов на основе фотограмметрических облаков точек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. № 1. С. 150–163.

9. Молчанов А. С. Оценка качества аэрофотосистем методом математического моделирования с использованием критерия Шадэ // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 1. С. 28–33.

10. Молчанов А. С. Методика оценки линейного разрешения на пиксель аэрофотосистем военного назначения при проведении летных испытаний // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. № 4. С. 390–396.

11. Молчанов А. С. Исследование характеристик линейного разрешения и разрешающей способности цифровых аэрофотосистем с использованием теоремы Котельникова–Найквиста–Шеннона // Инженерные решения. 2019. № 2. С. 8–14.

12. 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.

13. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В. В. Загребев, В. И. Сухих, А. З. Швиденко [и др.]. М. : Колос, 1992. 495 с.

14. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М. : Радио и связь, 1991. 264 с.

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

16. 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.

17. Сечин А. Ю., Дракин М. А., Киселева А. С. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. Ч. 2. URL: https://racurs.ru/upload/iblock/3b4/UAV_2.pdf.

18. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Часовских В. П. Модели для оценки биомассы деревьев лесообразующих видов по диаметру кроны в связи с использованием дронов // Хвойные бореальной зоны. 2023. № 4. С. 300–305.

19. Филатов А. А., Алексеев А. С., Никифоров А. А. Анализ численности и пространственного расположения подростов на вырубке на основе аэрофотосъемки // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Т. 2. СПб. : СПбГЛТУ, 2021. С. 200–203.

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

21. Leachtenauer J. C., Driggers R. G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: Modeling and performance prediction. Boston ; London : Artech House,

2001. URL: https://books.google.ru/books?id=f3zUKZZ_WjMC&dq=%22ground+sample+distance%22&pg=PA30&redir_esc=y#v=twopage&q&f=true.

REFERENCES

1. Opyt primeneniya bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya inventarizacii i ocenki opytnyh lesnyh kul'tur Lisinskoj chasti uchebno-opytного lesnichestva Leningradskoj oblasti / A. S. Alekseev, Yu. I. Danilov, A. A. Nikiforov [et al.] // Trudy Sankt-Peterburg. nauch.-issledovat. in-ta lesn. hoz-va. 2020. № 2. S. 46–58.

2. Opređenje predel'nyh uslovij aerofotos'emki v celyah vyvavleniya na snimkah elementov landshafta s izvestnymi razmerami i otrazhatel'nyimi svojstvami / I. V. Almazov, V. N. Ovechkin, A. F. Stecenko [et al.] // Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka. 1990. № 3. S. 63–71.

3. Veselov Yu. G., Glushko V. A., Molchanov A. S. Matematicheskaya model' aerofotosistemy, postroennoj na osnove fotochuvstvitel'nyh priborov s perenosom zaryada // Nauka i obrazovanie : nauch. izd. MG TU im. N. E. Bauman. 2013. № 10. S. 219–232.

4. Zamshin V. V. Metody opredeleniya linejnoj razreshayushchej sposobnosti opticheskikh i radiolokacionnyh aerokosmicheskikh izobrazhenij // Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka. 2014. № 1. S. 43–51.

5. Ocenka biometricheskikh parametrov osnovnyh drevostoev po sputnikovym dannym WorldView-3 i materialam bespilotnoj aeros'yomki / S. V. Knyazeva, A. D. Nikitina, E. A. Gavriluk [et al.] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. № 6. S. 93–107.

6. Kuchko A. S. Aerofotografiya. M. : Nedra, 1974. 272 s.

7. Lavrova N. P., Stecenko A. F. Aerofotos'emka. Aerofotos'emochnoe oborudovanie. M. : Nedra, 1981. 296 s.

8. Analiz i kartografirovaniye strukturnykh parametrov redkostojnykh severotayozhnykh lesov na osnove fotogrammetricheskikh oblakov toček / A. A. Medvedev, N. O. Tel'nova, A. V. Kudikov, N. A. Alekseenko // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. № 1. S. 150–163.

9. Molchanov A. S. Ocenka kachestva aerofotosistem metodom matematicheskogo modelirovaniya s ispol'zovaniem kriteriya Shade // Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka. 2017. № 1. S. 28–33.

10. Molchanov A. S. Metodika ocenki linejnogo razresheniya na piksel' aerofotosistem voennogo naznacheniya pri provedenii letnykh ispytaniy // Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka. 2018. № 4. S. 390–396.

11. Molchanov A. S. Issledovanie harakteristik linejnogo razresheniya i razreshayushchej sposobnosti cifrovyyh aerofotosistem s ispol'zovaniem teoremy Kotel'nikova–Najkvista–Shennona // Inzhenernye resheniya. 2019. № 2. S. 8–14.

12. Molchanov A. S. Metodika rascheta porogovoj modulyacionnoj harakteristiki cifrovyyh optiko-elektronnykh sistem distancionnogo zondirovaniya Zemli // Izv. TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2020. Vyp. 9. S. 328–336.

13. Obshchesoyuznye normativy dlya taksacii lesov / V. V. Zagreev, V. I. Suhii, A. Z. Shvidenko [et al.]. M. : Kolos, 1992. 495 s.
14. Press F. P. Fotochuvstvitel'nye pribory s zaryadovoy svyaz'yu. M. : Radio i svyaz', 1991. 264 s.
15. Savinyh V. P., Kuchko A. S., Stecenko A. F. Aerokosmicheskaya fotos'emka. M. : Kartgeocentr – Geodezizdat, 1997. 378 s.
16. Sviridov K. H., Tyulin A. E. Razreshayushchaya sposobnost' i linejnoe razreshenie dlya ocenki kachestva i proektirovaniya aerokosmicheskikh sistem distancionnogo zondirovaniya Zemli // Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy. 2022. № 1. S. 9–29.
17. Sechin A. Yu., Drakin M. A., Kiseleva A. S. Bespilotnyj letatel'nyj apparat: primeneniye v celyah aerofotos'emki dlya kartografirovaniya (chast' 2). URL: https://racurs.ru/upload/iblock/3b4/UAV_2.pdf.
18. Usol'cev V. A., Cepordej I. S., Chasovskih V. P. Modeli dlya ocenki biomassy derev'ev lesoobrazuyushchih vidov po diametru krony v svyazi s ispol'zovaniem dronov // Hvojnye boreal'noj zony. 2023. № 4. S. 300–305.
19. Filatov A. A., Alekseev A. S., Nikiforov A. A. Analiz chislennosti i prostranstvennogo raspolozheniya podrosta na vyrubke na osnove aerofotos'emki // Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie : materialy VI Vseros. nauch.-tekhn. konf. T. 2. SPb. : SPbGLTU, 2021. S. 200–203.
20. Frizer H. Fotograficheskaya registraciya informacii. M. : Mir, 1978. 670 s.
21. Leachtenauer J. C., Driggers R. G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: Modeling and performance prediction. Boston ; London : Artech House, 2001. URL: https://books.google.ru/books?id=f3zUKZZ_WjMC&dq=%22ground+sample+distance%22&pg=PA30&redir_esc=y#v=twopage&q&f=true.

© Сомов Е. В., Шевелев С. Л., 2025

Поступила в редакцию 09.01.2025
Принята к печати 25.04.2025