



## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДПОЛЕТНОЙ ОРИЕНТАЦИИ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ МОНИТОРИНГЕ МОЛОДЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Дмитрий Н. Демидов<sup>1</sup>✉, dnd.vgltu@mail.ru,  0000-0002-1395-3631

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

Изучение пространственно-временных характеристик автоматизированного технического средства для аэромониторинга (АТСАЭМ) на базе беспилотного летательного аппарата четырехроторной аэродинамической схемы необходимо для повышения точности дистанционной оценки биометрических параметров молодых деревьев на экспериментальном участке. Экспериментальный участок имеет прямоугольную форму с фиксированными по углам плано-высотными реперными точками и образован пересаженными в линейные борозды глубиной 0.2-0.4 м контейнерными сеянцами сосны обыкновенной (*I+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation, Pinus sylvestris* L.). Разработана методика оценки геометрических и семантических параметров единичных растительных объектов молодых лесных насаждений сосны обыкновенной. С помощью аппарата дескриптивной статистики оценены начальная выставка средств управления (среднеквадратическая ошибка оценивания прецессии, нутации и собственного вращения  $0.003584$  рад), широта ( $51,82765 \pm 0,00005^\circ$ ), долгота ( $39,36442 \pm 0,00035^\circ$ ) и высота НУМ ( $122,951 \pm 0,155$  м) полета автоматизированного технического средства для аэромониторинга.

**Ключевые слова:** автоматизированное техническое средство для аэромониторинга, предполетная ориентация, молодые лесные насаждения, средства управления АТСАЭМ, лесовосстановление, методика оценки высоты единичного дерева.


**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы ВГЛТУ (регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 121092000080-7). Автор благодарит работников учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ за ценные замечания и организационно-методическую помощь в проведении исследований. Автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Демидов Д. Н. Исследование алгоритма оценки параметров предполетной ориентации средств управления беспилотного летательного аппарата при мониторинге молодых лесных насаждений / Д. Н. Демидов // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 100–111. – Библиогр.: с. 108–111 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/9>.

**Поступила:** 01.12.2021 **Принята к публикации:** 28.12.2021 **Опубликована онлайн:** 30.12.2021

## INVESTIGATION OF THE ALGORITHM FOR ESTIMATING THE PARAMETERS OF THE PREFLIGHT ORIENTATION OF THE CONTROLS OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE WHEN MONITORING YOUNG FOREST STANDS

Dmitriy N. Demidov <sup>1</sup>✉, [dnd.vgltu@mail.ru](mailto:dnd.vgltu@mail.ru),  0000-0002-1395-3631

<sup>1</sup>*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation*

### Abstract

The study of the spatio-temporal characteristics of an automated technical means for aero-monitoring (ATSAEM) based on an unmanned aerial vehicle is necessary to improve the accuracy of remote assessment of biometric parameters of young trees at the experimental site. The experimental site has a rectangular shape with plan-height reference points fixed at the corners and is formed by container seeds of Scots pine outplanted into linear furrows 0.2-0.3 m deep (*I+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation, Pinus sylvestris L.*). A methodology for assessing the geometric and semantic parameters of single plant objects of young forest stands of Scots pine has been developed. With the help of descriptive statistics, the initial exhibition of controls (mean square error of precession, nutation and proper rotation estimation 0.003584 rad), latitude ( $51.82765 \pm 0.00005^\circ$ ), longitude ( $39.36442 \pm 0.00035^\circ$ ) and altitude NUM ( $122.951 \pm 0.155$  m) of the flight of an automated technical means for aero-monitoring were estimated.

**Keywords:** *automated technical means for aero-monitoring (ATSAEM), preflight orientation, young forest stands, ATSAEM management tools, reforestation, methods for estimating the single tree height.*

**Acknowledgments:** The research was carried out within the framework of the VSUFT Research Work Agreement (EGISU R&D registration number 121092000080-7). The author thanks the employees of the VSUFT educational and experimental forestry enterprise for valuable comments and organizational and methodological assistance in conducting research. The author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**For citation:** Demidov, D.N. (2021) Investigation of the algorithm for estimating the parameters of the preflight orientation of the controls of an unmanned aerial vehicle when monitoring young forest stands. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 100-111 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/9>.

**Received:** 01.12.2021    **Revised:** 18.12.2021    **Accepted for publication:** 28.12.2021    **Published online:** 30.12.2021

### Введение

Технологический процесс дистанционной оценки [1] биометрических параметров деревьев [2] на ювенильной стадии онтогенеза [3] – АЭромониторинг Молодых Лесных Насаждений (АЭМЛН), – осуществляемый на восстанавливаемой лесной площади [4], входит в «*группу операций мониторинга: ...контроля биометрических параметров лесных культур, реализованных на базе беспилот-*

*ного летательного аппарата вертолетного, самолетного или гибридного типов* [5]».

Одним из экономически эффективных способов сбора разнообразных экологических данных о протяженных линейных растительных структурах является дистанционное зондирование [6]. Данные дистанционного зондирования предлагают гибкие и эффективные возможности для автоматизированного извлечения, анализа и моделирования полученных результатов. В качестве перспективных методов в

мировой науке рассматривается использование изображений, полученных дистанционно с использованием Автоматизированного Технического Средства для АЭроМониторинга (АТСАЭМ). АТСАЭМ может эффективно контролировать молодые лесные насаждения (МЛН) как с позиции эффективного управления МЛН [7–9], так как они могут нести лидарные датчики и мультиспектральные камеры с высоким пространственным разрешением [7], создавая фотограмметрические мозаики и цифровые модели поверхности (Digital Surface Models – DSM) [10]. Основными показателями мониторинга линейных МЛН является плотность и жизнеспособность растительных структур непосредственно, которые получаются путем индивидуальной оценки деревьев [1,11,12]. Классификация единичного растительного объекта МЛН, основанная на лидарных и мультиспектральных данных, является недостаточно изученным, но эффективным методом [1,10–17]. Разработка цифровых моделей рельефа и траекторий АТСАЭМ при АЭМЛН экспериментального участка необходимо для согласования параметров точности и дальнейшего прогнозирования тенденций роста и развития деревьев. Воздушные снимки высокого разрешения позволяют быстро и эффективно отслеживать природные процессы, планировать мероприятия по уходу за лесными культурами, разрабатывать 3D-модели дерева в профиле и плане.

В качестве несущей платформы для АТСАЭМ практически всегда используются стандартизированные промышленные БПЛА [1,12,18], выпускаемые, как правило, ведущими производителями DJI (КНР), YUNEEC (Гонконг), Parrot (Франция), Walkera (КНР). При этом практически ни в одном исследовании не производится анализ темпоральных данных и погрешностей пространственного положения АТСАЭМ при движении в условиях помех различной природы и интенсивности, что, несомненно, снижает точность полученных результатов. Более того, получение DTM требует дополнительного вычислительного этапа обработки и может потребовать полевых контрольных точек или ручного разграничения объектов на поверхно-

сти. Использование результатов пиксельной классификации единичного дерева по лидарным и гиперспектральным данным (pixel-based individual tree classification ИТС) может несколько снижать точность в сравнении с классификацией, базирующейся на извлечении спектра на уровне кроны дерева (crone-based individual tree classification ИТС). Использование в качестве алгоритма классификации спектральных углов (Spectral Angle Mapper - SAM) также может снижать точность на 5-7 % по сравнению с использованием машины опорных векторов (Support Vector Machine - SVM).

Совершенствование процессов управления [19,20] АТСАЭМ при выполнении операций дистанционного мониторинга [21–23] молодых лесных насаждений должно осуществляться с помощью разработки «алгоритмов нелинейной фильтрации параметров углового движения [24]». Это обусловлено резким ухудшением точности работы спутниковой навигационной системы в условиях горного рельефа, под пологом леса, при высоком уровне атмосферных помех, при многократных отражениях в условиях движения в лесных насаждениях, а также неизбежными инструментальными погрешностями передатчика спутника и приемника объекта.

Таким образом, целью работы явилось исследование эффективности начальной ориентации АТСАЭМ четырехроторной аэродинамической схемы при выполнении операций мониторинга молодых лесных насаждений экспериментального участка ЗКС-сеянцев (1+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation, *Pinus sylvestris* L.) с разработкой методики оценки высоты единичных растительных объектов МЛН.

### Материалы и методы

Экспериментальный участок линейных насаждений молодых деревьев (container-grown 1+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation, *Pinus sylvestris* L.) расположен в Левобережном лесничестве Учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ рядом с кордоном Кожевенный (табл. 1, рис. 1).

Плано-высотные реперные точки (RP), ограничивающие экспериментальный участок

Table 2

Planned-altitude reference points (RP) limiting the experimental site

Наименование   Name	Широта, °   Latitude, °	Долгота, °   Longitude, °	Высота над уровнем моря, м   Altitude a.s.l., m
База GNSS   GNSS-base	51.827950336	39.364086081	116.5084
Взлетная площадка   Take-off	51.827861321	39.363992235	111.9234
Реперная точка 1   RP-1	51.827799098	39.363933282	116.6316
Реперная точка 2   RP-2	51.827659153	39.364832512	117.4000
Реперная точка 3   RP-3	51.827332256	39.364663848	118.3461
Реперная точка 4   RP-4	51.827494285	39.363602841	115.7445

Источник: собственные измерения автора

Source: own measurements



Рисунок 1. Экспериментальный участок для разработки методики оценки биометрических параметров молодых лесных насаждений: 1 – взлетная площадка 60 \* 80 см; 2 – АТСАЭМ на базе TOPODRONE DJI Mavic 2 Pro PPK Upgrade Kit четырехроторной аэродинамической схемы; 3 – начальная выставка и взлет АТСАЭМ; 4 – GNSS-станция Emlid Reach RS2 7; 5 – АТСАЭМ на полетной высоте; 6 – вид с камеры АТСАЭМ (разрешение 0,28 см / пиксель); 7 – реперная точка диаметром 20 см; 8 – возвращение АТСАЭМ на взлетную площадку для перезарядки аккумуляторов; 9 – расположение реперных точек, взлетной площадки и GNSS-баз на карте Google Earth.

Figure 1. Experimental site for the development of a methodology for evaluating biometric parameters of young forest stands: 1 – 60 \* 80 cm take-off pad; 2 – ATSAEM based on TOPODRONE DJI Mavic 2 Pro PPK Upgrade Kit of a four-rotor aerodynamic scheme; 3 – initial exhibition and take-off of ATSAEM; 4 – GNSS Emlid Reach RS2 7 station; 5 – ATSAEM at flight altitude; 6 - view from the ATSAEM camera (resolution 0.28 cm/pixel); 7 - reference point with a diameter of 20 cm; 8 - return of the ATSAEM to the take-off pad to recharge the batteries; 9 - location of reference points, the take-off pad and GNSS bases on the Google Earth map

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

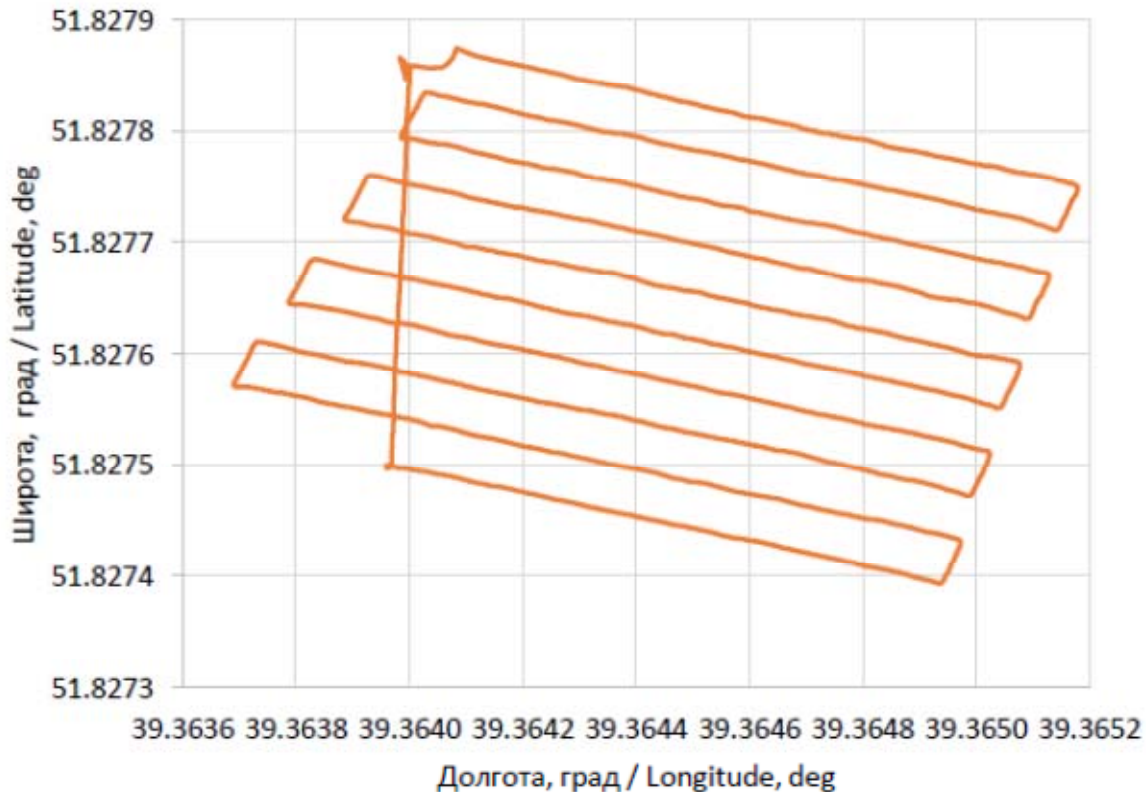


Рисунок 2. Траектория полета АТСАЭМ над линейными МЛН  
Figure 2. The trajectory of the ATSAEM flight over linear forest crops

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

После получения документов, разрешающих проведение полета и аэрофотосъемки, составили план полета и произвели начальную юстировку, используя программное обеспечение DJI Pilot. Рассчитали требуемое время полета, дистанцию, расширение получаемых снимков и максимальную скорость полета. 10 июля 2021 года оценили прогноз погоды, используя онлайн-сервис, Yandex Pogoda. БПЛА имеют ограничения по силе ветра, температуре и не могут проводить мониторинг во время дождя. В нашем случае DJI Mavic 2pro способен работать при температуре не ниже +0 C°, и ветре до 11 м/с.

Для точной привязки аэрофотографий к местности использовали опознаки (реперные точки RP на рис. 1) по ГОСТ Р 59328-2021, которые до начала полета закрепили на исследуемой площади в количестве четырех штук, расположенных по периметру снимаемой площади. Выполнили съемку их координат с помощью геодезического приёмника.

Используя этот же геодезический приёмник, установили его на базовую точку и запустили на приём GPS сигнала в течении всего времени полета БПЛА (траектория приведена на рис. 2), выполнили полетное задание. Время аэрофотосъёмки в нашем случае превысило время работы БПЛА на одном аккумуляторе поэтому он в автоматическом режиме вернулся на базу, была проведена замена аккумулятора и продолжен план полета.

Всего на экспериментальной площади в автоматическом режиме была отснята 421 фотография. Оценку геометрической и семантической информации о растительных объектах осуществляли по вновь разработанной методике, результатом реализации которой явились 78 сечений (рис. 3) условной высотной фотограмметрической модели линейного насаждения. Основная последовательность методики:

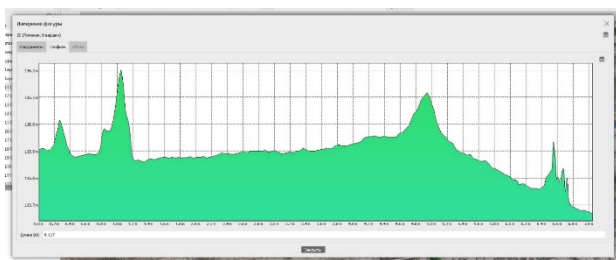


Рисунок 3. Сечение облака точек высотной фотограмметрической модели

Figure 3. Cross section of a point cloud of a high-altitude photogrammetric model

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

1. Добавили в свойства каждой фотографии, используя Agisoft Metashape Professional, её точные координаты на основании синхронизированных по времени данных GNSS базовой станции и приемника средств управления АТСАЭМ. Результатом обработки является облако точек и четыре реперные точки, показанные на рис. 4.



Рисунок 4. Облако точек экспериментального участка с реперными точками RP1-RP4

Figure 4. The point cloud of the experimental site with reference points RP1-RP4

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

2. На основании облака точек строили цифровую модель местности, где цветовой палитрой показаны высоты. На модели видно, что сам экспериментальный участок имеет возвышенности, которые по абсолютной величине превышают высоту растительных объектов (деревьев). Разбили цифровую модель местности на участки и на каждом участке в ручном режиме нарисовали линии, проходящие по рядам лесных культур. Каждая точка линии рядка поставлена у начала и конца проекции кроны молодого дерева (рис. 5).

3. На основании цифровой модели экспериментального участка были получены линии уровня,

характеризующие высоту объектов, но в связи с тем, что линии проходят и фиксируют высоту не только лесных культур, а также перепадов борозды (0,2-0,4 м), высоту рельефа, пней и т.д., использовать их для анализа является затруднительным (рис. 6).

4. Для получения линейной высотной фотограмметрической модели молодых деревьев сосны обыкновенной были использованы линии, указанные на рис. 6. Каждая линия была пронумерована в соответствии с строкой и столбцом. Для каждой линии получили сечения облака точек (см. рис. 3), которое позволяет определить взаимное расположение и высоту лесных культур.

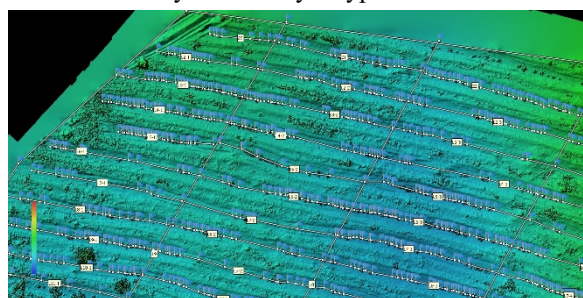


Рисунок 5. Цифровая модель с подеревной разметкой произрастания молодых лесных культур сосны обыкновенной на экспериментальном участке

Figure 5. Digital model of the area of growth of Scots pine forest crops at the experimental site

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

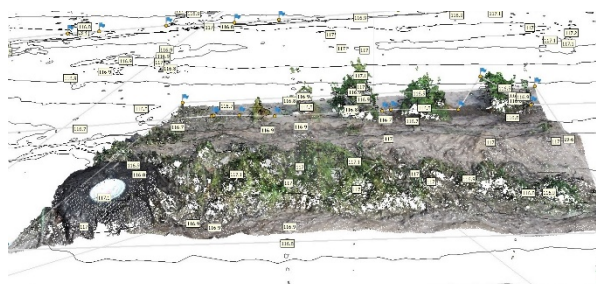


Рисунок 6. Линии уровня, характеризующие высоту ландшафта на экспериментальном участке

Figure 6. Digital model of the area of growth of Scots pine forest crops at the experimental site

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Оценку параметров предполетной ориентации средств управления АТСАЭМ при мониторинге молодых лесных насаждений осуществили чис-

ленным моделированием методом Рунге-Кутты среднеквадратического отклонения прецессии  $\alpha$ , нутации  $\beta$  и собственного вращения  $\gamma$  АТСАЭМ от вероятностных значений без фильтрации и с применением расширенного фильтра Калмана. Используя пакет прикладных программ IBM SPSS Statistics v. 25, оценили дескриптивную статистику пространственно-темпоральных данных АТСАЭМ и визуализировали их диаграммой «box plot».

## Результаты и обсуждение

Пространственно-временные характеристики АТСАЭМ, представленные на рис. 7, дают возможность заключить, что средняя высота полета АТСАЭМ относительно уровня моря практически совпадает с медианным значением и составляет  $122,951 \pm 0,155$  м. При этом на отметке в 650 тыс. мс (около 11 мин) явно виден интенсивный скачок высоты НУМ к верхнему пределу.



Рисунок 7. Пространственно-временные характеристики АТСАЭМ при мониторинге экспериментального участка

Figure 7. Spatio-temporal characteristics of the ATSAEM during monitoring of the experimental site

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Такие колебания могут несколько изменить фокусное расстояние, однако наличие жестко фиксированного на бесконечность по ГОСТ Р 59328-2021 фокуса аэрофотокамеры могут нивелировать точность. Средняя варианта северной широты за весь рассматриваемый полет совпадает в медианном значением и составляет  $51,82765 \pm 0,00005^\circ$ , а средняя варианта восточной долготы несколько выше медианного значения и составляет  $39,36442 \pm 0,00035^\circ$ .

Используем для оценки начальной выставки АТСАЭМ метод гирокомпасирования [25]. Азимут начального положения оси чувствительности датчика угловой скорости АТСАЭМ относительно плоскости местного меридиана (с широтой  $51^\circ 29'$ ) был выбран равным  $26^\circ$ - $27^\circ$ , а шаг выборки  $d$  для вычисления всех возможных значений углов  $A_n$  в диапазоне  $[0, \pi/2]$  был выбран равным  $10''$ . При численном моделировании шум измерения датчика угловой скорости АТСАЭМ моделировали как

сумму постоянного случайного дрейфа  $S$  с нулевым ожиданием, дисперсией  $(0,15)^2$  °/ч и широкополосного шума  $W$  (гауссова случайная последовательность с нулевым ожиданием и дисперсией  $(0,15)^2$ °/ч), генерируемого с шагом 0,01 с для числа реализаций, равного 90.

Минимальные значения ошибок определения азимутальной оси чувствительности датчика угловой скорости при различных азимутах ее начального положения  $26^\circ 10'$ ,  $26^\circ 20'$ ,  $26^\circ 30'$ ,  $26^\circ 40'$ ,  $26^\circ 50'$  составили соответственно  $7.2''$ ,  $9.3''$ ,  $6.5''$ ,  $8.3''$  и  $6.6''$ .

При оценке начальной выставки АТСАЭМ с использованием расширенного фильтра Калмана и уточненного алгоритма среднеквадратическая ошибка оценивания прецессии, нутации и собственного вращения не превысила  $0.003584$  рад (рис. 8). Причем максимальная ошибка была выявлена при оценке рецессии, а минимальная – при оценке собственного вращения.

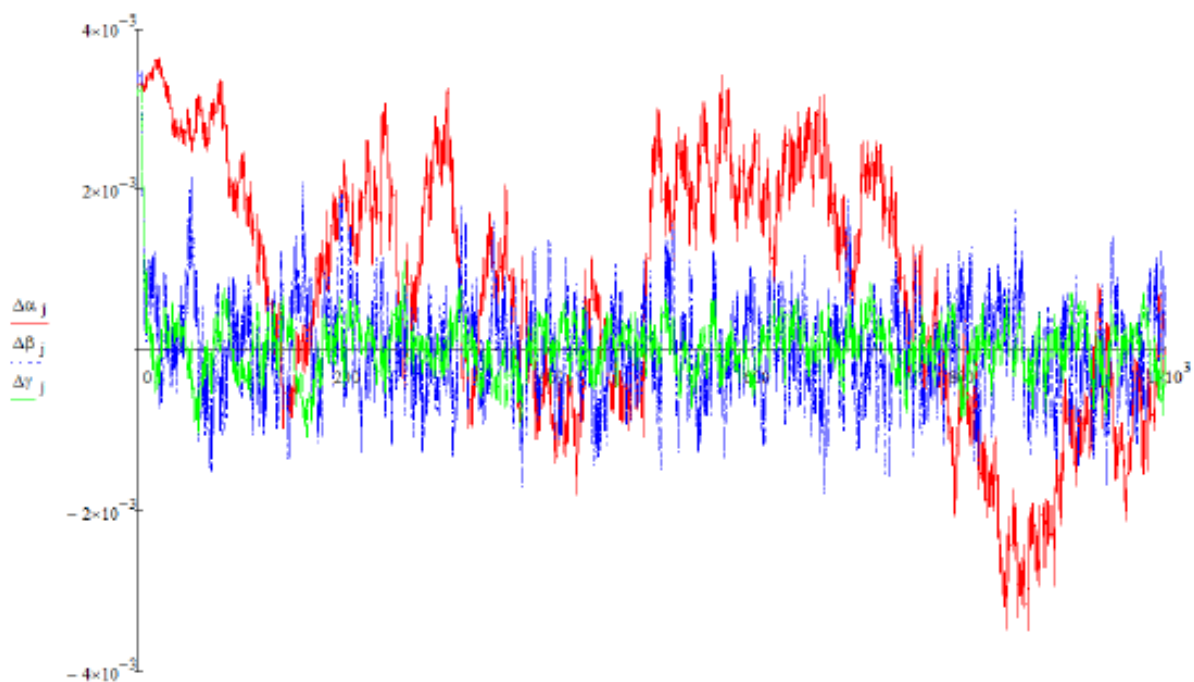


Рисунок 8. Ошибки оценки углов Эйлера-Крылова в рад при уменьшении уровня помех

Figure 8. Errors in estimating Euler-Krylov angles in rad when the noise level decreases

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations



## Выводы

1. Разработан эффективный метод АТСАЭМ-оценки биометрических параметров молодого дерева сосны обыкновенной с использованием сечений облака точек высотной фотограмметрической модели.

2. Минимальное значение ошибки при определении азимута оси чувствительности датчика угловой скорости при предполетной ориентации АТ-

САЭМ в начало строки с деревьями для оценки биометрических параметров составило 6,6°, а максимальное не превышало 9,3°.

3. Среднеквадратическая ошибка оценивания прецессии, нутации и собственного вращения АТ-САЭМ при начальной выставке с использованием нелинейного расширенного фильтра Калмана и уточненного алгоритма для не превысила 0.003584 рад.

## Список литературы

1. Zhao, D.; Pang, Y.; Liu, L.; Li, Z. Individual Tree Classification Using Airborne LiDAR and Hyperspectral Data in a Natural Mixed Forest of Northeast China. *Forests* **2020**, *11*, 303, doi:10.3390/f11030303.
2. Tikkinen, M.; Riikonen, J.; Luoranen, J. Covering Norway spruce container seedlings with reflective shading cloth during field storage affects seedling post-planting growth. *New For.* **2021**, doi:10.1007/s11056-021-09876-9.
3. Pikkarainen, L.; Luoranen, J.; Peltola, H. Early Field Performance of Small-Sized Silver Birch and Scots Pine Container Seedlings at Different Planting Depths. *Forests* **2021**, *12*, 519, doi:10.3390/f12050519.
4. Do, H.T.T.; Zimmer, H.C.; Vanclay, J.K.; Grant, J.C.; Trinh, B.N.; Nguyen, H.H.; Nichols, J.D. Site form classification—a practical tool for guiding site-specific tropical forest landscape restoration and management. *For. An Int. J. For. Res.* **2021**, doi:10.1093/forestry/cpab046.
5. Novikov, A.I. Forest restoration method. RU Patent 2 714 705, 20 May 2019 2019.
6. Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W.; Chipman, J.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*; 7th ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2015; ISBN 9781118343289.
7. Kampen, M.; Vienna, L.S.; Immitzer, M.; Vienna, L.S. UAV-Based Multispectral Data for Tree Species Classification and Tree Vitality Analysis. In Proceedings of the Dreilandertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich – Publikationen der DGPF, Band 28; 2019; pp. 623–639.
8. Albuquerque, R.W.; Costa, M.O.; Ferreira, M.E.; Carrero, G.C.; Grohmann, C.H. Remotely piloted aircraft imagery for automatic tree counting in forest restoration areas: a case study in the Amazon. *J. Unmanned Veh. Syst.* **2020**, *8*, 207–223, doi:10.1139/juvs-2019-0024.
9. Zahawi, R.A.; Dandois, J.P.; Holl, K.D.; Nadwodny, D.; Reid, J.L.; Ellis, E.C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biol. Conserv.* **2015**, *186*, 287–295, doi:10.1016/j.biocon.2015.03.031.
10. Seidel, D.; Annighöfer, P.; Ehbrecht, M.; Magdon, P.; Wöllauer, S.; Ammer, C. Deriving Stand Structural Complexity from Airborne Laser Scanning Data—What Does It Tell Us about a Forest? *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1854, doi:10.3390/rs12111854.
11. Jia, W.; Pang, Y.; Tortini, R.; Schläpfer, D.; Li, Z.; Roujean, J.-L. A Kernel-Driven BRDF Approach to Correct Airborne Hyperspectral Imagery over Forested Areas with Rugged Topography. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 432, doi:10.3390/rs12030432.
12. Ma, Z.; Pang, Y.; Wang, D.; Liang, X.; Chen, B.; Lu, H.; Weinacker, H.; Koch, B. Individual Tree Crown Segmentation of a Larch Plantation Using Airborne Laser Scanning Data Based on Region Growing and Canopy Morphology Features. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1078, doi:10.3390/rs12071078.
13. Lu, H.; Pang, Y.; Li, Z.; Chen, B. An Automatic Range Ambiguity Solution in High-Repetition-Rate Airborne Laser Scanner Using Prior Terrain Prediction. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2015**, *12*, 2232–2236, doi:10.1109/LGRS.2015.2461441.

14. Pang, Y.; Li, Z.; Ju, H.; Lu, H.; Jia, W.; Si, L.; Guo, Y.; Liu, Q.; Li, S.; Liu, L.; et al. LiCHy: The CAF's LiDAR, CCD and Hyperspectral Integrated Airborne Observation System. *Remote Sens.* **2016**, *8*, 398, doi:10.3390/rs8050398.
15. Liu, L.; Coops, N.C.; Aven, N.W.; Pang, Y. Mapping urban tree species using integrated airborne hyperspectral and LiDAR remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* **2017**, *200*, 170–182, doi:10.1016/j.rse.2017.08.010.
16. Pang, Y.; Meng, S.; Li, Z. Temperate Forest Aboveground Biomass Estimation Using Fourier-Based Textural Ordination (FOTO) Indices from High Resolution Aerial Optical Image. *Linye Kexue/Scientia Silvae Sin.* **2017**, 94–104, doi:10.11707/j.1001-7488.20170311.
17. Chen, B.; Pang, Y.; Li, Z.; Lu, H.; North, P.; Rosette, J.; Yan, M. Forest signal detection for photon counting LiDAR using Random Forest. *Remote Sens. Lett.* **2020**, *11*, 37–46, doi:10.1080/2150704X.2019.1682708.
18. Pang, Y.; Liang, X.; Jia, W.; Si, L.; Yan, G.; Shi, J. The comprehensive airborne remote sensing experiment in Saihanba forest farm. *Yaogan Xuebao/Journal Remote Sens.* **2021**, *25*, 904–917, doi:10.11834/jrs.20210222.
19. Sokolov, S. V.; Novikov, A.I. Adaptive estimation of UVs navigation parameters by irregular inertial-satellite measurements. *Int. J. Intell. Unmanned Syst.* **2021**, *9*, 274–282, doi:10.1108/IJUS-10-2019-0056.
20. Manin, A.A.; Sokolov, S. V.; Novikov, A.I.; Polyakova, M. V.; Demidov, D.N.; Novikova, T.P. Kalman Filter Adaptation to Disturbances of the Observer's Parameters. *Inventions* **2021**, *6*, 80, doi:10.3390/inventions6040080.
21. Safonova, A.; Hamad, Y.; Dmitriev, E.; Georgiev, G.; Trenkin, V.; Georgieva, M.; Dimitrov, S.; Iliev, M. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images. *Drones* **2021**, *5*, 77, doi:10.3390/drones5030077.
22. Liu, W.C.; Lu, C.H.; Huang, W.C. Large-scale particle image velocimetry to measure streamflow from videos recorded from unmanned aerial vehicle and fixed imaging system. *Remote Sens.* **2021**, *13*, doi:10.3390/rs13142661.
23. Mohan, M.; Richardson, G.; Gopan, G.; Aghai, M.M.; Bajaj, S.; Galgamuwa, G.A.P.; Vastaranta, M.; Arachchige, P.S.P.; Amorós, L.; Corte, A.P.D.; et al. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 2596, doi:10.3390/rs13132596.
24. Sokolov, S. V.; Novikov, A.I. Development tendency of sowing air operating technology by unmanned aerial vehicles in artificial reforestation. *For. Eng. J.* **2017**, *7*, 190–205, doi:10.12737/article\_5a3d040dc79c79.94513194.
25. Sokolov, S. V.; Novikov, A.; Ivetic, V. Determining the initial orientation for navigation and measurement systems of mobile apparatus in reforestation. *Inventions* **2019**, *4*, 56, doi:10.3390/inventions4040056.

### References

1. Zhao, D.; Pang, Y.; Liu, L.; Li, Z. Individual Tree Classification Using Airborne LiDAR and Hyperspectral Data in a Natural Mixed Forest of Northeast China. *Forests* **2020**, *11*, 303, doi:10.3390/f11030303.
2. Tikkinen, M.; Riikonen, J.; Luoranen, J. Covering Norway spruce container seedlings with reflective shading cloth during field storage affects seedling post-planting growth. *New For.* **2021**, doi:10.1007/s11056-021-09876-9.
3. Pikkarainen, L.; Luoranen, J.; Peltola, H. Early Field Performance of Small-Sized Silver Birch and Scots Pine Container Seedlings at Different Planting Depths. *Forests* **2021**, *12*, 519, doi:10.3390/f12050519.
4. Do, H.T.T.; Zimmer, H.C.; Vanclay, J.K.; Grant, J.C.; Trinh, B.N.; Nguyen, H.H.; Nichols, J.D. Site form classification—a practical tool for guiding site-specific tropical forest landscape restoration and management. *For. An Int. J. For. Res.* **2021**, doi:10.1093/forestry/cpab046.
5. Novikov, A.I. Forest restoration method. RU Patent 2 714 705, 20 May 2019 2019.

6. Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W.; Chipman, J.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*; 7th ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2015; ISBN 9781118343289.
7. Kampen, M.; Vienna, L.S.; Immitzer, M.; Vienna, L.S. UAV-Based Multispectral Data for Tree Species Classification and Tree Vitality Analysis. In Proceedings of the Dreilandertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich – Publikationen der DGPF, Band 28; 2019; pp. 623–639.
8. Albuquerque, R.W.; Costa, M.O.; Ferreira, M.E.; Carrero, G.C.; Grohmann, C.H. Remotely piloted aircraft imagery for automatic tree counting in forest restoration areas: a case study in the Amazon. *J. Unmanned Veh. Syst.* **2020**, *8*, 207–223, doi:10.1139/juvs-2019-0024.
9. Zahawi, R.A.; Dandois, J.P.; Holl, K.D.; Nadwodny, D.; Reid, J.L.; Ellis, E.C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biol. Conserv.* **2015**, *186*, 287–295, doi:10.1016/j.biocon.2015.03.031.
10. Seidel, D.; Annighöfer, P.; Ehbrecht, M.; Magdon, P.; Wöllauer, S.; Ammer, C. Deriving Stand Structural Complexity from Airborne Laser Scanning Data—What Does It Tell Us about a Forest? *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1854, doi:10.3390/rs12111854.
11. Jia, W.; Pang, Y.; Tortini, R.; Schläpfer, D.; Li, Z.; Roujean, J.-L. A Kernel-Driven BRDF Approach to Correct Airborne Hyperspectral Imagery over Forested Areas with Rugged Topography. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 432, doi:10.3390/rs12030432.
12. Ma, Z.; Pang, Y.; Wang, D.; Liang, X.; Chen, B.; Lu, H.; Weinacker, H.; Koch, B. Individual Tree Crown Segmentation of a Larch Plantation Using Airborne Laser Scanning Data Based on Region Growing and Canopy Morphology Features. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1078, doi:10.3390/rs12071078.
13. Lu, H.; Pang, Y.; Li, Z.; Chen, B. An Automatic Range Ambiguity Solution in High-Repetition-Rate Airborne Laser Scanner Using Priori Terrain Prediction. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2015**, *12*, 2232–2236, doi:10.1109/LGRS.2015.2461441.
14. Pang, Y.; Li, Z.; Ju, H.; Lu, H.; Jia, W.; Si, L.; Guo, Y.; Liu, Q.; Li, S.; Liu, L.; et al. LiCHy: The CAF's LiDAR, CCD and Hyperspectral Integrated Airborne Observation System. *Remote Sens.* **2016**, *8*, 398, doi:10.3390/rs8050398.
15. Liu, L.; Coops, N.C.; Aven, N.W.; Pang, Y. Mapping urban tree species using integrated airborne hyperspectral and LiDAR remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* **2017**, *200*, 170–182, doi:10.1016/j.rse.2017.08.010.
16. Pang, Y.; Meng, S.; Li, Z. Temperate Forest Aboveground Biomass Estimation Using Fourier-Based Textural Ordination (FOTO) Indices from High Resolution Aerial Optical Image. *Linye Kexue/Scientia Silvae Sin.* **2017**, 94–104, doi:10.11707/j.1001-7488.20170311.
17. Chen, B.; Pang, Y.; Li, Z.; Lu, H.; North, P.; Rosette, J.; Yan, M. Forest signal detection for photon counting LiDAR using Random Forest. *Remote Sens. Lett.* **2020**, *11*, 37–46, doi:10.1080/2150704X.2019.1682708.
18. Pang, Y.; Liang, X.; Jia, W.; Si, L.; Yan, G.; Shi, J. The comprehensive airborne remote sensing experiment in Saihanba forest farm. *Yaogan Xuebao/Journal Remote Sens.* **2021**, *25*, 904–917, doi:10.11834/jrs.20210222.
19. Sokolov, S. V.; Novikov, A.I. Adaptive estimation of UVs navigation parameters by irregular inertial-satellite measurements. *Int. J. Intell. Unmanned Syst.* **2021**, *9*, 274–282, doi:10.1108/IJIUS-10-2019-0056.
20. Manin, A.A.; Sokolov, S. V.; Novikov, A.I.; Polyakova, M. V.; Demidov, D.N.; Novikova, T.P. Kalman Filter Adaptation to Disturbances of the Observer's Parameters. *Inventions* **2021**, *6*, 80, doi:10.3390/inventions6040080.
21. Safonova, A.; Hamad, Y.; Dmitriev, E.; Georgiev, G.; Trenkin, V.; Georgieva, M.; Dimitrov, S.; Iliev, M. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images. *Drones* **2021**, *5*, 77, doi:10.3390/drones5030077.

22. Liu, W.C.; Lu, C.H.; Huang, W.C. Large-scale particle image velocimetry to measure streamflow from videos recorded from unmanned aerial vehicle and fixed imaging system. *Remote Sens.* **2021**, *13*, doi:10.3390/rs13142661.

23. Mohan, M.; Richardson, G.; Gopan, G.; Aghai, M.M.; Bajaj, S.; Galgamuwa, G.A.P.; Vastaranta, M.; Arachchige, P.S.P.; Amorós, L.; Corte, A.P.D.; et al. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 2596, doi:10.3390/rs13132596.

24. Sokolov, S. V.; Novikov, A.I. Development tendency of sowing air operating technology by unmanned aerial vehicles in artificial reforestation. *For. Eng. J.* **2017**, *7*, 190–205, doi:10.12737/article\_5a3d040dc79c79.94513194.

25. Sokolov, S. V.; Novikov, A.; Ivetić, V. Determining the initial orientation for navigation and measurement systems of mobile apparatus in reforestation. *Inventions* **2019**, *4*, 56, doi:10.3390/inventions4040056.

### Сведения об авторе

✉ Демидов Дмитрий Николаевич – аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1006-2881>, e-mail: [dnd.vgltu@mail.ru](mailto:dnd.vgltu@mail.ru).

### Information about the author

✉ *Dmitriy N. Demidov* – Postgraduate Student (Tech.), Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, 8, Timiryazeva, Voronezh 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1006-2881>, e-mail: [dnd.vgltu@mail.ru](mailto:dnd.vgltu@mail.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author