

Научная статья  
УДК 630.581.5

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ЗАПАСА УГЛЕРОДА В ДРЕВОСТОЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ (БАС)

Валерий Владимирович Фомин<sup>1</sup>, Владимир Евгеньевич Рогачев<sup>2</sup>,  
Егор Михайлович Агапитов<sup>3</sup>, Лев Евгеньевич Рогачев<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Уральский государственный лесотехнический университет,  
Екатеринбург, Россия

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> fominvv@m.usfeu.ru

<sup>2</sup> rogatsheow@mail.ru

<sup>3</sup> 2010\_egor.a@mail.ru

<sup>4</sup> rogachevle@m.usfeu.ru

**Аннотация.** Развитие современных беспилотных авиационных систем (БАС) и технологий обработки, анализа и представления данных открывают возможности для создания автоматизированных решений в области оценки содержания углерода в лесных экосистемах на основе данных дистанционного зондирования БАС. В работе показаны результаты оценки запаса углерода на участках «Урал-Карбона» на основе данных обработки аэроснимков беспилотного летательного аппарата и наземных измерений деревьев на круговых пробных площадях с использованием аллометрических уравнений. Проведенные исследования позволили получить количественные данные о содержании углерода в древостоях пробных площадей карбонового полигона Свердловской области. Содержание углерода в древостоях пробных площадей варьирует от 217 до 517 тонн CO<sub>2</sub>-эквивалента. Вклад в общую фитомассу древостоев деревьев, которые можно распознать на аэроснимках, составляет в среднем 83 %.

**Ключевые слова:** депонирование углерода, карбоновый научно-исследовательский полигон, геоинформационные системы, беспилотные авиационные системы

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственных заданий FEUZ-2021-0014 и FEUZ-2023-0023 Министерства образования и науки Российской Федерации.

Scientific article

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR AUTOMATED ASSESSMENT OF CARBON STOCK IN STANDS USING UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS (UAS)

Valery V. Fomin<sup>1</sup>, Vladimir E. Rogachev<sup>2</sup>, Egor M. Agapitov<sup>3</sup>,  
Lev E. Rogachev<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> fominvv@m.usfeu.ru

<sup>2</sup> rogatsheow@mail.ru

<sup>3</sup> 2010\_egor.a@mail.ru

<sup>4</sup> rogachevle@m.usfeu.ru

**Abstract.** The development of modern unmanned aircraft systems (UAS) and technologies of data processing, analysis and presentation open up opportunities for creating automated solutions in the field of carbon content assessment in forest ecosystems based on UAS remote sensing data. The paper shows the results of estimating the carbon stock in the monitoring polygon „Ural-Carbon“ based on data aerial photographs analysis and ground measurements of trees on circular forest plots using allometric equations. The conducted studies allowed us to get quantitative data of the carbon content in the tree stands in forest plots: the carbon content varies from 217 to 517 tons of CO<sub>2</sub> equivalent. The contribution to the total biomass of trees that can be recognized on aerial photographs close to 83 % of total biomass of all trees of tree stands on the plots.

**Keywords:** carbon deposition, carbon monitoring polygon, geoinformation systems, unmanned aircraft systems

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the implementation of the state budgetary theme FEUZ-2021-0014 and FEUZ-2023-0023.

Лесным экосистемам отводится важная роль в регулировании углеродного баланса атмосферы [1]. В декабре 2015 г. в Париже на климатическом саммите ООН 196 стран подписали соглашение о сокращении выбросов углекислого газа [2]. В России принят Федеральный закон № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [3]. В начале 2021 г. под эгидой Министерства науки и высшего образования создана сеть карбоновых полигонов для исследования эмиссии и поглощения парниковых газов в природных экосистемах.

Одной из задач научно-исследовательского проекта «Урал-Карбон» является создание технологий оценки запаса углерода с использованием данных дистанционного зондирования.

Цель работы – получить количественные оценки величины углерода в древостоях пробных площадей с использованием данных дистанционного зондирования, полученных при помощи беспилотного летательного аппарата и наземных измерений на пробных площадях на участках карбонового полигона Свердловской области «Урал-Карбон».

## Объекты и методика исследований

Для выполнения работы была проведена аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов; заложены круговые пробные площади постоянного радиуса 13,82 м (4 на участке «Урал-Карбон (Коуровка)» и 10 – на «Урал-Карбон (Северка)») [4], на которых проведены измерения биометрических характеристик деревьев, образующих древостой.

При закладке круговых пробных площадей использовали GPS-приемник *Garmin Etrex-10* (*Garmin Inc, Switzerland, Schaffhausen*) для определения центра пробной площади, буссоль *Suunto KB-14/360R* (*Suunto Inc., Finland, Vantaa*) для определения угла, измеряемого из центра круговой пробной площади (ПП) от направления на север до луча, направленного на каждое дерево в пределах ПП, ультразвуковой дальномер *Vertex 5 360°* (*Haglöf Sweden AB, Sweden, Långsele*) для определения расстояния до дерева и высоты дерева. Для определения протяженности горизонтальной проекции крон в двух взаимно перпендикулярных направлениях использовали мерную ленту. Аэрофотосъемку выполняли при помощи беспилотного летательного аппарата *Mavic Air 2* (*DJI Inc., Китай, Шэньчжэнь*).

Сшивку изображений и создание ортофотопланов выполняли с использованием программного обеспечения *Agisoft Metashape* (*Agisoft LLC, Россия, Санкт-Петербург*). Математико-статистическую обработку данных выполняли в среде R (*The R Foundation, Austria, Vienna*) с использованием библиотек *MASS*, *corrplot*, *ggstatsplot*, *GGally*, *dplyr*, *ggplot2*.

Количество углерода в пуле биомассы древостоя оценивали с использованием уравнения (1), приведенного в методических указаниях министерства природных ресурсов и экологии РФ по количественному определению объема поглощения парниковых газов от 30.06.2017 № 20-р [5]:

$$C_{\text{биомасса}} = 0,5 \sum (a (D_i^2 H_i) b), \quad (1)$$

где  $C_{\text{биомасса}}$  – углерод в биомассе древостоя, кг абсолютно сухого веса;

0,5 – коэффициент пересчета биомассы в углеродные единицы;

$D_i$  – диаметр ствола  $i$  на высоте 1,3 м, см;

$H_i$  – высота дерева  $i$ , м;

$a$  и  $b$  – коэффициенты аллометрического уравнения для разных фракций и древесных пород (приведены в табл. 2 в Приложении № 2 к Методическим указаниям (2017)).

Для количественной оценки фитомассы растущего дерева на пробных площадях использовали уравнение (2) [6], устанавливающее взаимосвязь фитомассы фракции дерева в абсолютно сухом весе в кг и биометрическими параметрами деревьев, следующего вида:

$$\ln P_j = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_{cr}, \quad (2)$$

где  $P_j$  – фракция фитомассы дерева;

$\ln$  – натуральный логарифм;

$D$  – диаметр дерева на высоте 1,3 м, см;

$H$  – высота дерева, м;

$D_{cr}$  – диаметр кроны дерева, м;

$a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты уравнений для каждой фракции, приведенные в работах Усольцева и соавторов [6].

$P_i$  – фитомасса в абсолютно сухом состоянии стволов с корой, скелета ветвей, хвои (листвы), надземной части и корней (соответственно  $P_{st}$ ,  $P_{br}$ ,  $P_f$ ,  $P_a$  и  $P_r$ ).

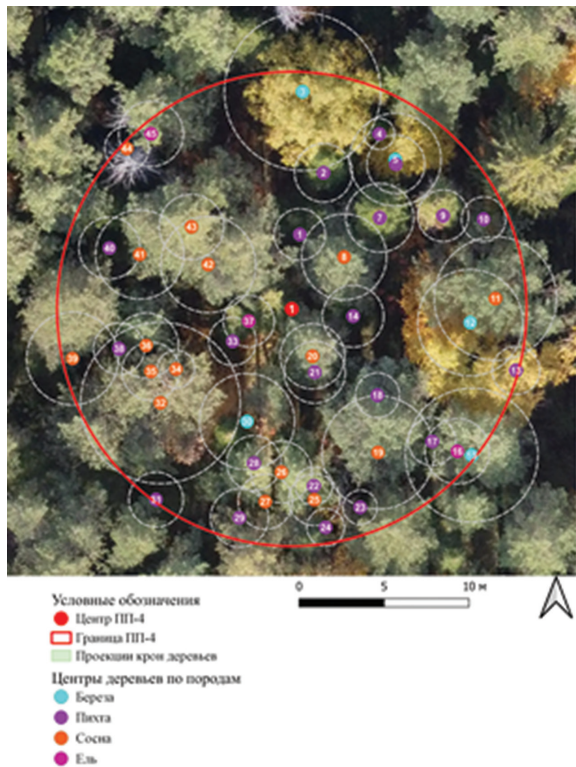
Для получения значений фитомассы по уравнению (2) необходимо провести потенцирование полученных по уравнениям величин натурального логарифма фракции фитомассы.

При использовании трансконтинентальных аллометрических моделей (2) фракционной структуры фитомассы деревьев по уравнению возможен расчет надземной и подземной фитомассы для основных лесобразующих древесных пород, произрастающих на участках полигона «Урал-Карбон (Коуровка)» и «Урал-Карбон (Северка)», за исключением осины. Поэтому подземную часть фитомассы деревьев осины оценивали путем умножения фитомассы надземной части на значения коэффициента для данной древесной породы – 0,25 [7].

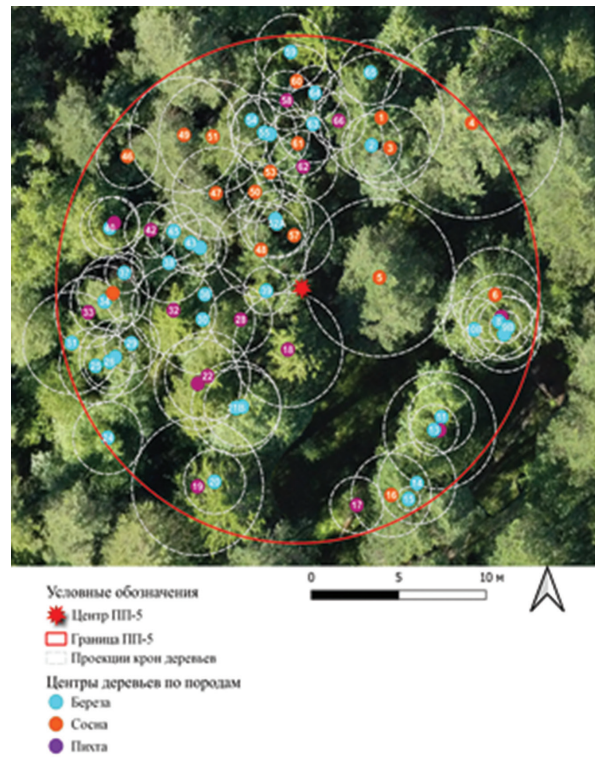
Значения общей фитомассы (биомассы) дерева получали путем сложения величины надземной и подземной ее частей. Для получения количества углерода в общей биомассе дерева умножали величину общей биомассы на 0,5. Для расчета значений углеродных единиц полученную величину углерода умножали на величины 44/12.

На участке «Урал-Карбон (Северка)» заложено 16 пробных площадей, из которых на трех пробных площадях в составе древостоя преобладает ель, на двух – лиственница, а на 11 – сосна.

На участке «Урал-Карбон (Коуровка)» заложено четыре пробные площади, на двух из них в составе преобладает сосна, на двух других – ель (рисунок).



*а*



*б*

Картосхемы, составленные на основе использования ортофотопланов и данных наземных измерений на пробных площадях № 4 на участке «Урал-Карбон (Коуровка)» (*а*) и № 5 на участке «Урал-Карбон (Северка)» (*б*)

## Результаты и обсуждение

При картировании территории полигона и распознавании древесных пород на снимках пробных площадей получены следующие данные: процент распознанных деревьев на снимке выше 48 % и в среднем составляет 63 %. Вклад в общую фитомассу древостоя распознанных деревьев больше или равен 66 % и в среднем составляет 83 %.

Для каждой пробной площади был проведен расчет величины депонирования углерода деревьями, которые были успешно распознаны на аэро-снимках.

В пересчете на 1 гектар лесные насаждения круговых пробных площадей задепонировали от 217 до 517 тонн  $\text{CO}_2$ -эквивалента. Предлагаемый подход для оценки фитомассы и соответственно запаса углерода в лесном насаждении позволяет учесть каждое дерево, формирующее верхний полог лесного насаждения.

Результаты корреляционного анализа данных, полученных в ходе наземных измерений биометрических параметров деревьев, а также результатов обработки снимков беспилотного летательного аппарата, свидетельствуют о том, что для сосны значения коэффициента корреляции между площадью

кроны дерева ( $S_{cim}$ ) и диаметром ствола на высоте 1,3 м ( $D_{bh}$ ) для участка «Урал-Карбон (Северка)» равен 0,766, а для участка «Урал-Карбон (Коуровка)» – 0,818. Величины коэффициента корреляции между площадью кроны дерева ( $S_{cim}$ ) и значением надземной фитомассы ( $P_{ab}$ ), оцененной по уравнению (1), для данных участков равны 0,737 и 0,803, а для уравнения (2) – 0,801 и 0,823 соответственно.

Для ели значения коэффициента корреляции между  $S_{cim}$  и  $D_{bh}$  для участков «Урал-Карбон (Северка)» и «Урал-Карбон (Коуровка)» равны 0,598 и 0,793 соответственно. Величины данного коэффициента для надземной фитомассы ( $P_{ab}$ ), фитомассы корней ( $P_r$ ) и общей фитомассы ( $P_t$ ), рассчитанной по уравнению (1), лежат в диапазонах 0,716–0,722 для участка «Урал-Карбон (Северка)» и 0,877–0,881 для участка «Урал-Карбон (Коуровка)». Для этих же фракций фитомассы, оцененных по уравнению (2), величины коэффициента лежат в диапазонах 0,629–0,633 и 0,822–0,830 для «Урал-Карбон (Северка)» и «Урал-Карбон (Коуровка)» соответственно.

Для березы величины коэффициента корреляции между  $S_{cim}$  и  $D_{bh}$  для участков «Урал-Карбон (Северка)» и «Урал-Карбон (Коуровка)» равны 0,656 и 0,743 соответственно. Коэффициент корреляции между  $S_{cim}$  и  $P_t$  (1) для этих участков составляет 0,693 и 0,676, а для  $S_{cim}$  и  $P_t$  (2) – 0,609–0,794.

На пробных площадях на участке «Урал-Карбон (Северка)» произрастает небольшое количество деревьев пихты. Из-за малого объема выборки значения коэффициентов между анализируемыми параметрами корреляции не соответствуют требуемому при проведении научных исследований уровню значимости. Для участка «Урал-Карбон (Коуровка)» величины коэффициента корреляции между  $S_{cim}$  и  $D_{bh}$ ,  $S_{cim}$  и  $P_t$  (2) равны 0,589 и 0,672 соответственно.

На участке «Урал-Карбон (Коуровка)» малый объем выборки по лиственнице также не позволяет получить значения коэффициентов корреляции между параметрами, приведенными выше на требуемом уровне значимости. Для участка «Урал-Карбон (Северка)» для лиственницы значения коэффициента корреляции между площадью кроны дерева и  $D_{bh}$ , а также  $P_t$  (2) равны 0,773 и 0,763 соответственно.

Значение коэффициента корреляции между  $S_{cim}$  и высотой дерева ( $H$ ), как правило, для деревьев на участке «Урал-Карбон (Северка)» для лиственницы равно 0,688, для березы и ели – 0,539 и 0,604 соответственно. Для сосны и ели величины коэффициента корреляции для данного участка меньше 0,4.

Для участка «Урал-Карбон (Коуровка)» величины коэффициента корреляции между  $S_{cim}$  и  $H$  для ели и пихты равны 0,578 и 0,624 соответственно, а для сосны и березы – статистически не значимы.

Таким образом, проведенные исследования позволили получить данные для расчета фитомассы каждого дерева, отображенного на аэроснимках.

Значения площади крон деревьев, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата, могут быть использованы в качестве одного из ключевых входных параметров для расчета фитомассы каждого дерева, отображенного на снимке.

Возможность использования лидарной съемки с использованием беспилотного летательного аппарата позволит улучшить качество оценки фитомассы и величины депонирования углерода деревьями как за счет более глубокого сканирования древостоя и возможности оценки деревьев, которые находятся под основным пологом древостоя, так и получения количественной оценки высоты каждого дерева. Использование мультиспектральной камеры позволит улучшить распознавание деревьев разного породного состава.

## *Список источников*

1. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Официальный русский перевод. ООН, 1997. 27 с.

2. Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции об изменении климата. ООН, 2015. 32 с.

3. Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов».

4. Фомин В. В., Залесов С. В., Платонов Е. П. Лесоклиматические научно-исследовательские проекты Уральского государственного лесотехнического университета // Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства: материалы научно-практической конференции: материалы. Воронеж. 2021. С. 384–389.

5. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов от 30.06.2017 № 20-р // Официальный интернет-портал правовой информации «Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов». URL: <https://docs.cntd.ru/document/456079177> (дата обращения: 14.05.2023).

6. Аллометрические модели фитомассы деревьев для лазерного зондирования и наземной таксации углеродного пула в лесах Евразии: сравнительный анализ / В. А. Усольцев, В. П. Часовских, Ю. В. Норицина, Д. В. Норицин // Сибирский лесной журнал. 2016. № 4. С. 68–76.

7. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Норицин Д. В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 1. С. 4–14.