

УДК 630*587.5

И. В. Толкач¹, Л. А. Мицевич², О. В. Кравченко¹¹Белорусский государственный технологический университет²Государственное предприятие «Белгеодезия»**ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ВЫСОТ ДРЕВОСТОЕВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ PHOTOMOD**

В статье рассматривается методика автоматизированного создания цифровой модели высот древостоев в цифровой фотограмметрической системе PHOTOMOD с использованием модулей PHOTOMOD DSM и PHOTOMOD dDSM. Исходными данными послужили материалы съемки воздушного сканера ADS-100 (LEICA). Описаны основные этапы создания цифровой модели высот, включающие создание проекта, предварительную обработку и радиометрическую коррекцию снимков, формирование цифровой модели поверхности крон деревьев (ЦМП), цифровой модели рельефа (ЦМР), вычисление на их основе цифровой модели высот древостоев. Для формирования ЦМР целесообразно чередование полуавтоматической фильтрации ЦМП с применением фильтра строений и растительности с разными параметрами интерактивного редактирования оператором в стереоскопическом режиме. Сравнительная оценка средних высот древостоев, вычисленных с использованием цифровой модели и измеренных в результате выборочной таксации насаждений, показала, что разработанная методика и получаемые по ней цифровые модели высот древостоев могут быть рекомендованы для использования при автоматизированной оценке средних высот древостоев в технологии инвентаризации лесов путем камерального аналитико-измерительного дешифрирования материалов аэросъемок при устройстве лесов с высоким радиоактивным загрязнением и других не вовлекаемых в хозяйственное использование объектов.

Ключевые слова: цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD, цифровая модель поверхности, цифровая модель рельефа, цифровая модель высот древостоев, дешифрирование, аэрофотоснимок.

I. V. Tolkach¹, L. A. Mitsevich², O. V. Kravchenko¹¹Belarusian State Technological University²State Enterprise “Belgeodesy”**FORMATION OF THE DIGITAL ALTITUDE MODEL TREES
WITH USE DIGITAL PHOTOGRAMMETRIC SYSTEM PHOTOMOD**

The article discusses the technique of automated creation of a digital model of the heights of stands in the digital photogrammetric system PHOTOMOD using the modules PHOTOMOD DSM and PHOTOMOD dDSM. The source data was the shooting material of an air scanner ADS-100 (LEICA). The main stages of creating a digital model of heights are described, including the creation of a project, preliminary processing and radiometric correction of images, the formation of a digital model of the surface of tree crowns (DTM), a digital elevation model (DEM), and calculation of a digital model of the heights of stands on their basis. To form a DEM, it is advisable to alternate the semiautomatic filtering of the DSC using a filter of buildings and vegetation with various parameters of interactive editing by the operator in stereoscopic mode. A comparative assessment of the average heights of the stands calculated using a digital model and measured as a result of selective taxation of the stands showed that the developed methodology and the digital models of the heights of the stands obtained from it can be recommended for use in the automated assessment of the average heights of stands in the forest inventory technology using desk analytic we do not involve measuring decoding of aerial survey materials when installing scaffolding with high radioactive contamination and others s in the economic use of facilities.

Key words: digital photogrammetric system, digital surface model, digital elevation model, radiometric correction, decryption, aerial view.

Введение. Для устойчивого управления лесному хозяйству республики требуется информация о количественных и качественных показателях, характеризующих отдельные насаждения и лесные массивы в целом [1], получение которой полевыми методами требует значи-

тельных временных и финансовых затрат. Прозошедшие на современном этапе технологические прорывы в области производства крупноформатных цифровых камер, переход на цифровые средства сбора и хранения информации, значительное улучшение качественных

характеристик космических и аэрофотоснимков, широкое внедрение технологий лазерного сканирования привели к коренному изменению подходов к получению и актуализации информации дистанционными методами. Для ее обработки стали интенсивно развиваться цифровые фотограмметрические станции и пакеты прикладных программ (ENVI, ERDAS IMAGING, GRASS, SAGA и др.), позволяющие в автоматизированном режиме выполнять измерения и интерпретацию изображений, формировать векторные карты различной тематической направленности.

В процессе аналитико-измерительного дешифрирования часть невидимых на снимках таксационных показателей древостоя вычисляется с использованием регрессионных уравнений связи с другими показателями, наибольшее значение среди которых имеет средняя высота. В России разработана и внедрена в ООО «Леспроект» новая технология инвентаризации на основе измерительного дешифрирования насаждений на цифровых аэроснимках с использованием ЦФС PHOTOMOD, где определение высоты выполняется у единичных деревьев стандартными средствами ЦФС PHOTOMOD [2, 3].

Недостаток вышеописанного метода определения высот заключается в отсутствии возможности их автоматического измерения и дальнейшей интерпретации. В этом плане значительные преимущества имеют материалы лазерной локации лесов, позволяющие создавать цифровые модели рельефа (ЦМР) и поверхности полога древостоя [4], также имеются исследования по использованию данных радиолокационной съемки [5]. Аналогичные данные можно получить и с использованием ЦФС. Однако не все фотограмметрические станции имеют средства автоматизированного построения цифровой модели поверхности. Сложность использования ЦФС заключается и в том, что при высокой полноте древостоя не всегда видна поверхность земли, что может привести к значительным ошибкам в формировании цифровой модели рельефа и определении высот.

Целью данного исследования стала разработка методики и формирование цифровой модели высот древостоев с использованием цифровой фотограмметрической станции (ЦФС) PHOTOMOD и специализированных программных модулей для построения цифровых моделей поверхности (ЦМП) и рельефа (ЦМР) в автоматизированном режиме.

Основная часть. Цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD [6] позволяет осуществлять полный комплекс задач от сбора данных для построения сетей фототриангуляции до создания цифровых моделей рельефа или метрических трехмерных моделей. Она ра-

ботает по снимкам различных съемочных систем, таких как кадровые цифровые и пленочные камеры, космические сканирующие системы, а также радары с синтезированной апертурой. Система имеет модульную структуру, что позволяет формировать оптимальную комплектацию для решения тех или иных задач.

Особый интерес для создания цифровой модели высот древостоев имеют модуль PHOTOMOD DTM, предназначенный для создания и работы с ЦМР в различных видах (набор пикетов, TIN, матрица высот, горизонталь, редактирование в моно/стереорежиме, просмотр и анализ в 3D-окне) и имеющий широкий набор вспомогательных функций для обработки ЦМР, а также модуль PHOTOMOD dDSM, позволяющий строить в автоматическом режиме плотные модели поверхности и создавать матрицу высот методом SGM (Semi-GlobalMatching), размер ячейки которой соответствует одному пикселу изображения [6].

Для построения цифровой модели высот древостоев использованы материалы съемки воздушного сканера ADS-100 (LEICA). Уровень обработки данных, требуемый для выполнения работ в ЦФС PHOTOMOD L1, представляет собой набор метаданных и ориентированных стереопар изображений, созданных посредством синтеза четырех мультиспектральных каналов (BGRN – Blue, Green, Red, Nearinfrared). Создание синтезированных изображений выполнялось организацией-исполнителем аэрофотосъемки ГП «БелПСАГИ» с использованием программных средств LEICA XPRO.

При определении технических параметров съемки и получаемых данных – высот древостоев – необходимо учитывать систему координат, точность геодезической привязки, радиометрическое разрешение, необходимую точность фотограмметрических измерений (в стереоскопическом режиме составляет 0,5 пиксела, что при принятом пространственном разрешении съемки составляет 0,15 м). Точность геодезической привязки данных ADS-100 для проведения топографо-геодезических работ на территории Республики Беларусь по материалам АФС принята 0,3 м, что обеспечивает корректность геодезической основы и приемственность данных.

Радиометрическое разрешение снимков сканера ADS-100 составляет 16 бит, что увеличивает объем исходных данных и время их обработки, поэтому для проведения работ по стереодешифрированию радиометрическое разрешение было снижено до 8 бит.

При конвертации векторных данных в обменные форматы возможны искажения вследствие трансформирования данных. Так, масштабный коэффициент в проекции UTM является

причиной уменьшения реальных площадей и длин объектов в непосредственной близости к осевому меридиану (21, 27, 33-й градусы для зон 34N, 35N, 36N соответственно (около 0,4 м на 1 км линии)). В программе PHOTOMOD реализована возможность измерения площадей и длин объектов как в системе координат объекта, так и на поверхности относимости.

Работа выполнялась в несколько этапов. На первом этапе осуществлялась загрузка данных сканера ADS-100 и создание проекта ЦФС PHOTOMOD с коррекцией абсолютных путей местоположения снимков и импортом результатов уравнивания. При этом устанавливались параметры системы координат, максимальная и минимальная высоты территории. Точность создания проекта проверялась импортом каталога контрольных точек, предоставленных организацией-исполнителем АФС.

В результате был создан накидной монтаж, состоящий из горизонтально расположенных сканерных снимков шириной до 6 км, с перекрытием не менее 20%, достаточным для автоматизированного дешифрирования и векторизации объектов. Для дешифрирования лесотаксационных показателей древостоя, выявления поврежденных деревьев целесообразно выполнять радиометрическую коррекцию и создание композитных изображений, включающих ближний инфракрасный канал.

В зависимости от выявляемого признака можно использовать различные комбинации каналов и их отображений. Данные комбинации подбираются с учетом требований к выполнению конкретного вида работ. При необходимости созданные комбинации возможно сохранить в файл и использовать повторно посредством импорта файла в любой проект.

Однако результаты радиометрической коррекции значительно влияют на построение ЦМП, если их применить на этапе загрузки снимков в проект. При увеличенной контрастности изображения корреляция между пикселями разных снимков для опознавания местоположения связующих точек производится более продуктивно. Если же настройки двух снимков в одной стереопаре различаются, корреляция не будет успешной. В связи с этим формирование ЦМП и ЦМР рекомендуется проводить с одинаковыми параметрами радиометрической коррекции для снимков одного проекта (стереопары) или до проведения коррекции.

На втором этапе выполнялось формирование цифровой модели поверхности (первой отражающей поверхности: вершин крон деревьев, крыш зданий и т. п.). Цифровая модель поверхности создавалась путем построения плотной матрицы (сетки) с ячейкой заданного размера.

Для ускорения процесса построения требуется ввести среднюю высоту поверхности полого в области формирования ЦМП.

Процесс формирования ЦМП полностью автоматический и не требует вмешательства оператора. Затраты времени на построение ЦМП зависят от быстродействия процессора и комплектации аппаратных средств. Например, при ОЗУ 64 ГБ процесс построения на стереопаре рабочей площадью 30 км² составляет 1–2 ч. В случае сложного пересеченного рельефа размер сетки ЦМП рекомендуется уменьшить и разделить интересующий регион на участки меньшего размера.

Процесс построения цифровой модели рельефа требует несколько больших затрат времени, так как зависит от сомкнутости полого древостоя на выбранном участке. Он включает полуавтоматическую фильтрацию ЦМП с использованием фильтра строений и растительности, а также редактирование оператором в стереоскопическом режиме оставшихся после фильтрации артефактов. Для достижения наилучших результатов фильтрацию целесообразно проводить несколько раз с использованием разных параметров, чередуя с ручным редактированием в стереорежиме. Точности автоматической фильтрации достаточно для формирования ЦМР под пологом большинства древостоев и лесных массивов на территории Республики Беларусь. Общее время для создания проекта PHOTOMOD, построения ЦМП и ЦМР для участка 30 км² составило около 40 ч (ОЗУ 64 ГБ).

Цифровая модель высот древостоев (ЦМВ) вычислялась как разность между значениями ранее полученных цифровых моделей поверхности и рельефа.

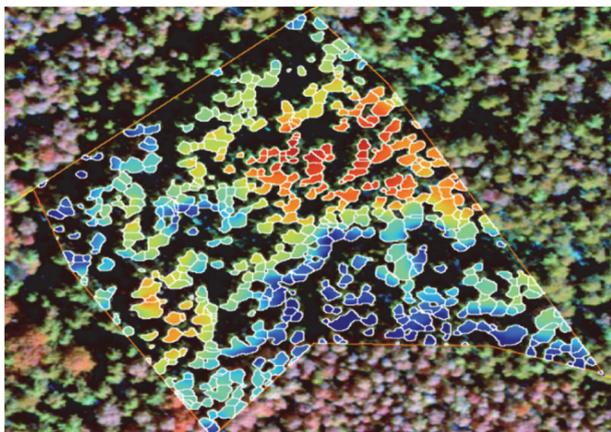
В качестве исходных данных для апробации методики и формирования цифровой модели высот древостоев послужили материалы съемки (2018 г.) сканером ADS-100 участка лесного фонда Налибокского лесничества Столбцовского лесхоза (кварталы 17–19, 26–28, 36–41), где работниками РУП «Белгослес» выполнена глазомерная и выборочная таксация насаждений. Участок подбирался по материалам таксации прошлого лесоустройства таким образом, чтобы были представлены насаждения преобладающих в Беларуси основных лесобразующих пород.

В камеральных условиях с использованием разработанной автоматизированной системы лесотаксационного дешифрирования выполнено аналитико-измерительное дешифрирование и оценка средних высот древостоев. Автоматизированная система лесотаксационного дешифрирования представляет собой комплекс аппаратных средств и программного обеспечения, основным компонентом которых является рабочая станция (персональный компьютер)

с установленным на ней программным обеспечением SAGA GIS и разработанными модулями.

В качестве исходных данных кроме снимков использовались векторный слой выделов и база данных глазомерно-измерительной таксации прошлого лесоустройства (2009 г.), векторный слой выделов текущего лесоустройства, созданный на основе контурного дешифрирования выделов и представленный работниками РУП «Белгослес».

Для оценки средних высот древостоев использована цифровая модель высот, полученная фотограмметрическим методом с применением ЦФС PHOTOMOD. Так как цифровая модель высот построена для всей территории опытного объекта, а соответственно, и анализируемых выделов, в том числе для участков между кронами деревьев, вычисленные для выделов на первом этапе средние значения высот имели значительную систематическую ошибку. Для ее устранения был изменен алгоритм обработки и перед вычислением добавлены операции по отграничению границ крон деревьев и операция обрезки цифровой модели высот полученным векторным слоем, отграничивающим вершины видимых крон деревьев (рисунок).



Обрезанный слой цифровой модели высот древостоев

В результате при вычислении использовались лишь значения цифровой модели высот, отграниченные вершинами крон деревьев, а значения, приходящиеся на промежутки между кронами, были исключены. Вычисленные средние значения высот сравнивались со значениями, полученными в полевых условиях в результате выборочной таксации древостоев.

Результаты анализа случайных и систематических ошибок оценки средних высот древостоев приведены в таблице.

Средние ошибки оценки средней высоты древостоя

Преобладающая порода	Средняя ошибка оценки средней высоты, %	
	Δ_H	S_y
Сосна	-2,69	9,45
Ель	-9,30	14,37
Береза	-3,15	9,21
Ольха черная	-1,38	8,81
Средняя на участке	-3,96	10,83

Случайная ошибка на контрольном участке составляет по высоте $\pm 10,83\%$, систематическая – $3,96\%$. Систематические и случайные (с вероятностью 0,68) ошибки в сосновых, березовых и черноольховых древостоях меньше указанных средних значений и соответствуют действующим лесоустроительным нормативам. В еловых древостоях наблюдается систематическое занижение высот древостоев, превышающее предельно допустимые нормативы. Вероятно, это объясняется остроконечной конусовидной формой крон ели, что не позволяет при исходном пространственном разрешении 0,3 м построить цифровую модель поверхности по самым верхушкам крон деревьев ели.

Закключение. Результаты проведенной работы по оценке возможности использования ЦФС PHOTOMOD для формирования цифровых моделей высот древостоев с целью их использования при автоматизированном аналитико-измерительном дешифрировании древостоев позволяют сделать следующие выводы:

- цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD, ее модули PHOTOMOD DTM и PHOTOMOD dDSM могут успешно применяться для автоматизированного формирования цифровой модели высот древостоев, вычисляемой как разность цифровых моделей поверхности и рельефа;

- вычисленные значения средних высот древостоев как среднеарифметические величины цифровой модели высот для всего выдела имеют значительные систематические ошибки;

- для минимизации ошибок необходимо выполнять вычисления на основе отдельных участков цифровой модели высот, приходящихся на вершины крон деревьев, с исключением участков промежутков между кронами;

- ошибки оценки средней высоты методом аналитико-измерительного дешифрирования с использованием автоматизированной системы лесотаксационного дешифрирования на основе аэрофотоснимков сверхвысокого разрешения в сосновых, березовых и черноольховых древостоях не превышают действующих нормативных показателей;

- в еловых древостоях средняя ошибка оценки высоты больше нормативной и составляет $9,3\%$;

– разработанная методика и получаемые с ее использованием цифровые модели высот древостоев могут быть рекомендованы для использования при автоматизированной оценке средних высот древостоев в технологии инвентаризации лесов путем

камерального аналитико-измерительного дешифрирования материалов аэрокосмических съемок при устройстве лесов с уровнем радиоактивного загрязнения более 15 Ки/км² и для других объектов, не вовлекаемых в хозяйственное использование.

Список литературы

1. Зорин В. П. Система и методы инвентаризации лесного фонда на основе информационных технологий, обеспечивающих устойчивое управление лесами // Труды БГТУ. 2016. № 1: Лесное хоз-во. С. 5–8.
2. Данилин И. М., Фаворская М. Н. Моделирование структуры лесного покрова и рельефа местности по данным лазерной локации // Лесная таксация и лесоустройство. 2011. № 1–2. С. 40–47.
3. Архипов В. И., Березин В. И., Черниковский Д. М. Новая технология стереоскопической таксации лесов «От съемки – к проекту» // Геопрофи. 2014. № 4. С. 17–22.
4. Рабочие правила по таксации лесов дешифровочным способом (практическое пособие таксатору-дешифровщику) / В. И. Архипов [и др.]. СПб: Леспроект, 2015. 69 с.
5. Черниковский Д. М., Алексеев А. С. Методы обработки информации радарной топографической съемки при решении задач определения высот и запасов насаждений древесных пород // Труды СПИИРАН. 2019. № 2. С. 416–443.
6. Ракурс. ЦФС PHOTOMOD [Электронный ресурс] // Ракурс: сайт. 2020. URL: <https://racurs.ru/program-products/tsfs-photomod/> (дата обращения: 05.02.2020).

Reference

1. Zorin V. P. The system and methods of forest inventory based on information technologies that ensure sustainable forest management. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1: Forestry, pp. 5–8 (In Russian).
2. Danilin I. M., Favorskaya M. N. Modeling of the structure of the forest cover and terrain according to laser location data. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest taxation and forest management], 2011, no. 1–2, pp. 40–47 (In Russian).
3. Arkhipov V. I., Berezin V. I., Chernikhovskiy D. M. New technology for stereoscopic forest taxation “From survey to protect”. *Geoprofi* [Geoprofi], 2014, no. 4, pp. 17–22 (In Russian).
4. Arkhipov V. I., Baskov V. I., Belov V. A., Chernikhovskiy D. M., Berezin V. I. *Rabochie pravila po taksatsii lesov deshifrovочnym sposobom (prakticheskoe posobie taksatoru-deshifrovchiku)* [Working rules for taxation of forests by decryption method (a practical guide to a taxifier-decryptor)]. St. Petersburg, Lesproekt Publ., 2015. 69 p.
5. Chernikhovskiy D. M., Alekseev A. S. Methods of processing information from radar topographic surveys when solving problems of determining the height and reserves of tree stands. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2019, no. 2, pp. 416–443 (In Russian).
6. Racurs. CFS PHOTOMOD. Available at: <https://racurs.ru/program-products/tsfs-photomod/> (accessed 02.05.2020).

Информация об авторах

Толкач Игорь Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Мицевич Людмила Александровна – начальник отдела. ГП «Белгеодезия» (220029, г. Минск, пр. Машерова, 17). E-mail: ofr@belgeodesy.by

Кравченко Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ov_kravchenko@belstu.by

Information about the authors

Tolkach Igor' Vladimirovich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, Head of the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Mitsevich Ludmila Aleksandrovna – Head of the Department. State Enterprise “Belgeodesy” (17, Masherova str., 220029, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ofr@belgeodesy.by

Kravchenko Olga Valer'yevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ov_kravchenko@belstu.by

Поступила 31.03.2020