

Оценка качества автоматического детектирования деревьев по материалам аэрофотосъёмки с помощью квадрокоптера

Иванова Н.В.¹, Шашков М.П.^{1,2}, Шанин В.Н.^{1,2}, Грабарник П.Я.²

¹Институт математических проблем биологии РАН – филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН

Natalya.dryomys@gmail.com

В работе выполнена оценка качества автоматического детектирования деревьев в смешанном древостое по данным, полученным с помощью беспилотного летательного аппарата – квадрокоптера. Исследования проводили в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике (Московская обл.). По цифровой модели высот древесного полога, построенной на основе данных аэрофотосъёмки, выполнен автоматический поиск деревьев и получены оценки их высот. На площади в 4 га автоматически детектировано 1080 вершин. Выполнена полевая верификация результатов на 10-ти временных пробных площадях размером 20 × 20 м, на которых учитывалось число корректно найденных деревьев, ложных вершин и пропущенных деревьев. Установлено, что использованный метод позволил автоматически детектировать большинство деревьев в пологе леса (89.3 %). Высоты деревьев, оцененные алгоритмом по цифровой модели, хорошо согласовывались с высотами, измеренными наземными методами. Средняя высота дерева, оцененная автоматически, составила 26.9 ± 3.3 м, измеренная наземными методами – 28.4 ± 3.2 м.

Ключевые слова: БПЛА; цифровая модель высот древесного полога; автоматическое детектирование деревьев; смешанные леса.

Quality Assessment of Automatical Tree Detection Based on Aerial Photography Using a Quadcopter

Ivanova N.V.¹, Shashkov M.P.^{1,2}, Shanin V.N.^{1,2}, Grabarnik P. Ya.²

¹Institute of Mathematical Problems of Biology RAS – the Branch of Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS

²Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Sciences of the Russian Academy of Science

This study evaluates the quality of individual tree detection in mixed forests using canopy height models (CHMs). It was carried out in the Prioksko-Terrasny Biosphere Nature Reserve (Moscow region, Russia). The study plot was 4 ha. A lightweight unmanned aerial vehicle (UAV) DJI Phantom 4 was used for aerial photography. CHM with 0.5 m resolution was generated. According to the individual-tree detection algorithm 1080 trees were found automatically. Based on the UAV-imagery, we allocated 10 field plots of 20 × 20 m. For each plot, the number of ‘true positive’ trees (correctly detected), ‘false negative’ trees (omitted by the algorithm), and ‘false positive’ trees (does not exist but detected) were counted during the ground survey. A total of 131 reference trees were counted in this study and the algorithm detected 117 trees thus resulting in an accuracy 89.3 %. Tree heights retrieved from the UAV were well-matched to ground-based method results. The mean tree heights retrieved from the UAV and ground surveys were 26.9 ± 3.3 m and 28.4 ± 3.2 m, respectively.

Key words: UAV, canopy height model, tree detection, mixed forests.

1. Введение

В последние годы в исследованиях лесных экосистем всё более широкое применение получают беспилотные летательные аппараты, БПЛА (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) [1, 2]. Пространственное разрешение изображений, полученных с их помощью, может составлять от

нескольких сантиметров / пиксель, что позволяет использовать материалы аэрофотосъёмки для детектирования и оценки характеристик отдельных деревьев. Кроме того, использование БПЛА позволяет быстро получить данные для больших территорий при низких трудозатратах, что делает такой подход важным дополнением к

традиционным «наземным» методам исследований [3–5]. Материалы аэрофотосъемки, полученные при помощи БПЛА используются в инвентаризации лесов для оценки таксационных характеристик древостоев, тем не менее в большинстве известных нам работ объектами исследований являются олигодоминантные одноярусные леса [4–7]. Поэтому целью данного исследования стала оценка качества детектирования деревьев по данным БПЛА в смешанных древостоях.

2. Материал и методы

Полевые исследования проводили на территории Приокско-Террасного биосферного заповедника (г.о. Серпухов, Московская обл.). Исследован участок смешанного леса 100×400 м (4 га) в квартале № 14. В древостое преобладает сосна (*Pinus sylvestris* L.), с меньшим участием представлены береза (*Betula* spp.), ель (*Picea abies* (L.) N.Karst.), осина (*Populus tremula* L.) и липа (*Tilia cordata* Mill.). По материалам таксационных описаний формула древостоя 7СЗБ+Е+Ос+Лп, возраст 80 лет.

Аэрофотосъемку проводили 13 мая 2020 г. квадрокоптером DJI Phantom 4 в режиме mosaic flight mode с 90 % перекрытием снимков с высоты 117 м.

Плотное облако точек и ортофотоплан строили в программе фотограмметрической обработки Agisoft Metashape [8]. Затем в среде статистического программирования R [9] по облаку точек строили цифровую модель высот древесного полога (canopy height model, CHM). Для этого использовали функции пакета lidR [10]. Сначала выделяли точки, относящиеся к классу «земная поверхность» по алгоритму cloth simulation filtering [11] функцией *lasground()*. Затем выполняли нормализацию облака точек по алгоритму tin, реализованному в функции *lasnormalize()*. После этого строили цифровую модель высот древесного полога по алгоритму pitfree [12] с помощью функции *grid_canopy()*.

Для поиска вершин деревьев использовали функцию *FindTreesCHM()* пакета rLiDAR [13].

Верификацию полученных автоматически результатов проводили наземными методами. Для этого в среде QGIS [14] по ортофотоплану внутри исследованного участка было выделено 10 временных пробных площадей размером 20×20 м, визуально различающихся по составу древостоя. На местности на каждой площади определено число корректно детектированных алгоритмом деревьев (*TP*), число ложных срабатываний (*FP*) и число пропущенных деревьев (*FN*). Если в пределах кроны одного дерева алгоритмом детектировано несколько вершин, корректно найденной считали только одну вершину с наибольшим значением высоты (вычисленным автоматически), другие вершины учитывали как ложные.

Для оценки качества работы алгоритма рассчитывали 2 индекса [15, 16]: долю корректно детектированных алгоритмом деревьев (*P*) относительно всех найденных автоматически как

$$P = \frac{TP}{TP + FP}$$

и долю корректно найденных алгоритмом деревьев (*R*) относительно учтенных наземными методами как

$$R = \frac{TP}{TP + FN}$$

Для всех корректно детектированных деревьев сравнивали высоты, оцененные моделью, и полученные в результате наземных измерений. Наземными методами высоты деревьев измеряли с помощью дальномера-угломера TruPulse 360B.

3. Результаты и обсуждение

В результате обработки данных аэрофотосъемки получено плотное облако точек площадью $40\,703.24$ м², плотностью 3334.69 точек / м², всего 13.62 млн. точек. Построена цифровая модель высот разрешением 50 см / пиксель, по которой автоматически детектировано 1080 вершин деревьев.

Результаты верификации полученных данных наземными методами показали хорошее качество автоматического детектирования (табл. 1). В ходе наземных исследований на 10-ти площадях в целом учтено 131 дерево, различимое на ортофотоплане. Автоматически на 10-ти площадях детектировано 117 деревьев, что составляет 89.3 % от числа деревьев, оцененного наземными методами. Большинство деревьев (82.9 %), найденных алгоритмом, было найдены корректно. Таким образом, используемый нами метод позволяет детектировать большинство деревьев в пологе леса. По данным полевой верификации алгоритмом неверно детектировано 20 деревьев, 34 дерева пропущено. Значение индекса *P* составило 0.8, варьируя на разных площадках от 0.7 до 1.0, индекса *R* – 0.7 (от 0.6 до 0.9). Эти результаты показывают, что в исследуемом древостое при ошибочных срабатываниях алгоритм чаще пропускал деревья, чем находил ложные вершины, т. е. ошибка недооценки числа деревьев выше, чем ошибка переоценки. Число пропущенных алгоритмом деревьев варьировало от 1 до 7 и зависело от состава древостоя. На площадях, где древостой был представлен в основном сосной и елью, а участие лиственных деревьев (березы и осины) было единичным, число неучтенных вершин было невелико. При высокой доле участия лиственных деревьев, напротив отмечено максимальное число пропущенных вершин.

Таблица 1. Оценка качества результатов автоматического поиска вершин деревьев

№ площади	Число автоматически найденных вершин	<i>TP</i>	<i>FP</i>	<i>FN</i>	<i>P</i>	<i>R</i>
1	13	11	2	1	0.8	0.9
2	15	13	2	7	0.9	0.7
3	13	11	2	4	0.8	0.7
4	11	8	3	3	0.7	0.7
5	13	11	2	1	0.8	0.9
6	12	9	3	2	0.8	0.8
7	8	7	1	5	0.9	0.6
8	10	8	2	1	0.8	0.9
9	12	9	3	3	0.8	0.8
10	10	10	0	7	1.0	0.6
Всего	117	97	20	34	0.8	0.7

Высоты, полученные по данным аэрофотосъемки, хорошо согласовывались с высотами, измеренными наземными методами (рис. 1).

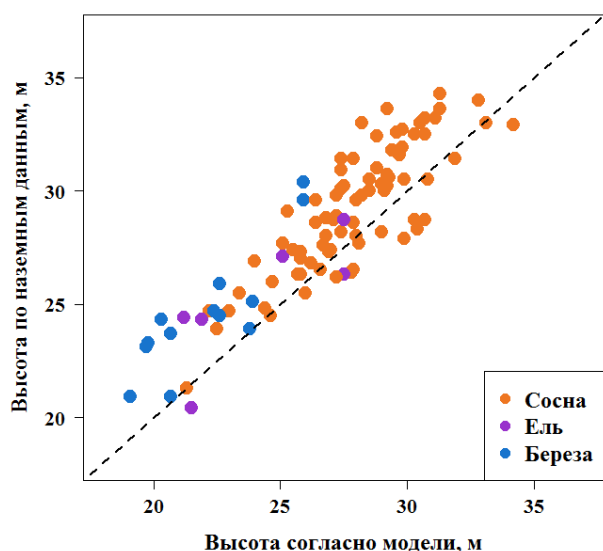


Рис. 1. Соотношение высот деревьев по данным аэрофотосъемки и наземным измерениям.

Средняя высота дерева, оцененная автоматически, составила 26.9 ± 3.3 м (мин. 19.1 м, макс. 34.2 м), по наземным измерениям – 28.4 ± 3.2 м (мин. 20.4 м, макс. 34.3 м). Между высотами, оцененными двумя методами, обнаружены значимые различия (парный критерий Стьюдента, $P < 0.0001$). Высота, измеренная наземными методами, была в среднем на 1.4 м больше, чем оцененная автоматически. Высокое значение коэффициента линейной корреляции ($r = 0.88$, $P < 0.0001$), показывает, что результаты измерений двумя методами хорошо согласуются, но имеется систематическое расхождение. При этом, разница хотя и является статистически значимой, но находится в пределах допустимой погрешности для таких измерений.

В целом, полученные результаты показывают хорошее соответствие между высотами деревьев, измеренными наземными методами, и оцененными по СНМ. Разница в оценках может быть связана как с особенностями проведения наземных измерений, так и с процессом обработки данных аэрофотосъемки. Ошибки в наземных измерениях могут быть вызваны тем, что визуальное выделение вершины у старых деревьев часто затруднено из-за особенностей морфологии их крон. Кроме того, крона целевого дерева может быть перекрыта кронами соседних деревьев, что также затрудняет измерения. При автоматической оценке алгоритм использует цифровую модель высот, которая является продуктом обработки плотного облака точек. В данной работе мы использовали специализированный для лесных территорий алгоритм выделения точек класса «земная поверхность» [11]. Тем не менее неизвестно, насколько полно он учитывает особенности микрорельефа, и какой вклад они вносят в итоговую оценку высоты по СНМ. Для изучения этих вопросов требуются дополнительные исследования.

В целом, проведенная работа подтвердила перспективность использования данных БПЛА и построенных на их основе цифровых моделей высот древесного полога для оценки характеристик смешанных древостоев. Показано, что автоматические методы поиска вершин позволяют выявить большинство деревьев в пологе леса. Установлено хорошее соответствие между высотами деревьев, измеренными наземными методами и полученными по данным аэрофотосъемки.

3. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-14-00362).

4. Список литературы

1. Anderson K., Gaston K.J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology.

- Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. V. 11. I. 3. P. 138–146 doi: [10.1890/120150](https://doi.org/10.1890/120150).
2. Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAV). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2015. V. 81. No. 4. P. 281–330. doi: [10.14358/PERS.81.4.281](https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281).
 3. Dandois J., Ellis E.C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*. 2013. V. 136. P. 259–276. doi: [10.1016/j.rse.2013.04.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005).
 4. Jaskierniak D., Kuczera G., Benyon R.G., Lucieer A. Estimating tree and stand sapwood area in spatially heterogeneous southeastern Australian forests. *Journal of Plant Ecology*. 2016. V. 9. No. 3. P. 272–284. doi: [10.1093/jpe/rtv056](https://doi.org/10.1093/jpe/rtv056).
 5. Puliti S., Ole Orka H., Gobakken T., Naesset E. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*. 2015. V.7. No. 8. P. 9632–9654. doi: [10.3390/rs70809632](https://doi.org/10.3390/rs70809632).
 6. Otero V., Van De Kerchove R., Satyanarayana B., Martínez-Espinosa C., Amir Bin Fisol M., Rodila Bin Ibrahim M., Sulong I., Mohd-Lokman H., Lucas R., Dahdouh-Guebas F. Managing mangrove forests from the sky: Forest inventory using field data and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery in the Matang Mangrove Forest Reserve, peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*. 2018. V. 411. P. 35–45. doi: [10.1016/j.foreco.2017.12.049](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.049).
 7. Picos J., Bastos G., Míguez D., Alonso L., Armesto J. Individual Tree Detection in a Eucalyptus Plantation Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-LiDAR. *Remote Sens*. 2020. V. 12. No. 5. doi: [10.3390/rs12050885](https://doi.org/10.3390/rs12050885).
 8. Agisoft LLC. *Agisoft Metashape. Version 1.5*: Software. 2019. URL: <https://www.agisoft.com/> (accessed 02.10.2020).
 9. R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. URL: <https://www.R-project.org/> (accessed 02.10.2020).
 10. Roussel J.R., Auty D. *lidR: Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications*. R package. Version 2.2.1. 2020. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=lidR> (accessed 02.10.2020).
 11. Zhang W., Qi J., Wan P., Wang H., Xie D., Wang X., Yan G. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 6. P. 1–22. doi: [10.3390/rs8060501](https://doi.org/10.3390/rs8060501).
 12. Khosravipour A., Skidmore A.K., Skidmore M., Wang T., Hussin Y. Generating Pit-free Canopy Height Models from Airborne Lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2014. No. 9. P. 863–872. doi: [10.14358/PERS.80.9.863](https://doi.org/10.14358/PERS.80.9.863).
 13. Silva C.A., Hudak A.T., Vierling L.A., Loudermilk E.L., O'Brien J.J., Hiers J.K., Khosravipour A. Imputation of Individual Longleaf Pine (*Pinus palustris* Mill.) Tree Attributes from Field and LiDAR Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2016. V. 42. No. 5. P. 554–573. doi: [10.1080/07038992.2016.1196582](https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1196582).
 14. QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Version 3.14*. Software. 2020. URL: <http://qgis.osgeo.org> (accessed 02.10.2020).
 15. Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation. In: *Proceedings of the European Conference on Information Retrieval, Compostela, Spain, 21–23 March 2005*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2005. P. 345–359. doi: [10.1007/978-3-540-31865-1_25](https://doi.org/10.1007/978-3-540-31865-1_25).
 16. Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation. In: *AI 2006: Advances in Artificial Intelligence. AI 2006. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 4304*. Eds. Sattar A., Kang B. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 1015–1021. doi: [10.1007/11941439_1](https://doi.org/10.1007/11941439_1).