

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.34.012

doi: 10.26907/2542-064X.2021.4.591-602

ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ ВЫРУБКИ ЛЕСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*А.В. Старовойтов¹, А.В. Фаттахов¹, Е.А. Ячменёва¹, М.М. Хамиев¹,
Д.А. Кислер², В.Е. Косарев¹, Д.К. Нурғалиев¹*

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

²ООО «ТНГ-Групп», г. Бугульма, 423236, Россия

Аннотация

В процессе проведения сейсмических полевых работ существует необходимость вырубки просек в лесных массивах. Важной и актуальной задачей при этом является оценка необходимого к вырубке объема деревьев. В качестве нового подхода к решению данной проблемы предлагается использовать методы дистанционного зондирования Земли с применением беспилотных воздушных судов. На беспилотное воздушное судно была установлена система лазерного сканирования и фотоаппарат высокого разрешения, благодаря которым были построены цифровая модель местности и цифровая модель рельефа. Обработка получаемых моделей проводилась нейронной сетью, разработанной в рамках представленного исследования. В процессе выполнения работы на исследуемой территории с использованием цифровой модели местности были идентифицированы деревья и определен их класс в рамках намеченных просек. С помощью разработанного алгоритма определялся объем деревьев, необходимых для вырубки запланированных просек для каждого класса дерева.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, сейсморазведочные работы, дистанционное зондирование Земли, вырубка лесов

Введение

Работы, связанные с поиском, разведкой и добычей полезных ископаемых, так или иначе неизбежно связаны с внесением изменений в природную среду. Тем не менее как государственные органы, так и недропользователи заинтересованы в снижении антропогенной нагрузки и устранении последствий воздействия. В связи с этим необходимо иметь полную и точную картину о характере изменений для выстраивания комплекса организационно-хозяйственных и технических мероприятий по рекультивации угнетенных участков.

Несмотря на то что геофизические исследования в целом относят к неразрушающим методам, некоторые виды работ требуют частичного вмешательства в природную среду. В частности, при наличии лесных массивов в районе проведения сейсморазведочных работ требуется прорубать просеки для возможности проведения геодезических измерений и проезда техники к пунктам возбуждения упругих колебаний.

Оценка объема вырубki важна в определении комплексной антропогенной нагрузки на данные ландшафты. Для этого органы государственного регулирования правовых и экономических отношений в области лесопользования и лесоохраны используют специальные утвержденные методики таксации, которые успешно применяются с середины прошлого века. Необходимо отметить, что данные инструменты достаточно вяло проходят процедуру модернизации и цифровизации, внедрения новых подходов в соответствии с идеологией «бережливого производства», что в современных реалиях крайне необходимо. Отчасти с данным фактом связана и низкая прозрачность этого инструмента, который находится исключительно «в руках» контролирующих органов, что ставит недропользователя в неравные по отношению к ним условия.

Современная таксация и оценка объемов вырубаемого леса

Современные методики таксации, которые применяются для оценки объема древесной растительности, опираются на существующие карты лесопользования и землеустройства, нормативные документы и методические материалы конца 80-х годов XX в. Важно отметить, что картографические произведения не являются общедоступными и находятся в фондах различных государственных регуляторов в области землепользования. Процедура таксации начинается с изучения карт и контуров лесных массивов, материалов аэрофото- и космических снимков, если таковые имеются, с определения ареалов с общими текстурными характеристиками и выбором контрольных точек. В дальнейшем проводятся полевые выезды с выборочным изучением небольших участков леса с целью ботанического описания, определения морфометрических характеристик отдельных деревьев. При этом древостой, находящийся в подлеске, не учитывается. Результаты экстраполируются на остальные участки изучаемого лесного массива, и проводится определение общего объема древесины.

Для определения объема древесной растительности используются специальные таблицы, в которых задано диагональное отношение диаметра конкретной породы дерева на высоте 1.3 м к его высоте с указанием объема древесины при этом отношении [1]. Данные объемы были получены опытным путем с большой выборкой для каждого отношения высоты к диаметру и прошли статистическую обработку для получения единственного показателя объема для данного отношения. Необходимо отметить, что для некоторых отношений в этих таблицах представлены прочерки; это означает, что такие характеристики невозможны в условиях естественной природной среды. Для автоматизации процесса все таблицы прошли специальную процедуру форматирования и подготовки к использованию в программных алгоритмах.

Методика полевых работ

Одним из ценнейших источников данных о земной поверхности и лесонасаждениях, в частности, являются результаты дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Основными источниками здесь являются материалы спутниковой съемки земной поверхности или фотографические снимки, полученные камерой высокого разрешения в различных диапазонах электромагнитного спектра, а также

результаты воздушного лазерного сканирования. В настоящем исследовании ДЗЗ проводилось с помощью беспилотного воздушного судна.

Точки лазерного отражения получали с использованием лидара российского производства, зарегистрированного в реестре средств измерения. Согласно заявленным техническим характеристикам, которые были подтверждены в ходе использования оборудования, имеется возможность гарантированно получать пять точек лазерного отражения на одном квадратном метре земной поверхности под кронами плотного смешанного леса. При этом в состав устройства входит GNSS-приемник с антенной, работающей в режиме PPK (Post-Process Kinematic) и 9-осевая инерциальная система (3С-магнитометр, 3С-акселерометр и 3С-гироскоп). Эта система позволяет обеспечивать субсантиметровую точность привязки точек лазерного отражения после постобработки [2, 3].

Для получения ортофотоплана исследуемой местности на беспилотное воздушное судно были установлены камера высокого разрешения и мультиспектральная камера. Управление затвором камер осуществлялось с помощью подсистемы передачи данных (ППД). В результате производилось фотографирование местности с частотой один раз в секунду, что обеспечивает практически 90%-ное наложение снимков вдоль траектории движения воздушного судна при высоте полета 300 м. Подобный подход используется и другими системами управления затвором: от полетного контроллера и от компьютера лидара при совместном использовании системы сканирования и фотографирования [4]. Данные о времени срабатывания затвора и положении камеры в момент съемки записываются в качестве паспорта снимка на твердотельный носитель ППД. При этом для обеспечения высокой точности записывается не момент запроса снимка, а обратный импульс с фотоаппарата, взятый с интерфейса для установки фотовспышки. Мультиспектральная камера имеет собственный GNSS-приемник и антенну, посредством DLS-интерфейса данные о позиционировании записываются в метаданные результирующего файла в качестве геотегов широты и долготы в системе координат WGS84.

Таким образом, фотограмметрическая обработка снимков уже не требует определения реперных точек на земной поверхности (Ground Control Position – GCP). В этом случае отпадает необходимость проведения геодезических работ с целью верификации результатов аэрофотосъемки. Это особенно важно при проведении работ в труднопроходимых условиях, а также на территориях со сплошным лесным покровом, где получение фиксированных GNSS-решений крайне затруднительно без проведения дополнительных мероприятий, вырубок для увеличения количества зарегистрированных спутников и улучшения геометрии их распределения.

Методика обработки данных

Для создания инструментария определения объемов вырубок использовалась геоинформационная система (ГИС) с возможностью создания собственных инструментов геообработки на языке программирования Python. С целью унификации инструментов в используемой ГИС реализован специальный шаблон, в котором при необходимости можно определить входные и выходные параметры, их типы, поведение при изменении значений других параметров, параметры лицен-

зирования инструментов и собственно процедуру последовательного выполнения команд. Еще одной особенностью используемого программного продукта является наличие широкого спектра возможностей по обработке данных дистанционного зондирования и в целом по работе с растровыми данными. При решении задач семантической сегментации аэрофото- и космических снимков, а также детектирования объектов пользователю в общих случаях нет необходимости прибегать к написанию собственной нейронной сети, соответствующих оберток для обучения и предсказания, всевозможных парсеров входных и выходных данных. Для этого достаточно воспользоваться встроенными инструментами разметки, подготовки тренировочной и вариационных выборок, обучения и обработки новых данных.

Предварительная обработка результатов измерений лазерного сканера заключается в выстраивании всех сцен лидара по траектории. Постобработка данных лидара заключается в фильтрации полученного облака точек. Для этого использовался имитационный тканевый фильтр (Cloth Simulation Filter – CSF) [5]. Этот фильтр позволяет разделить земную поверхность и растительность. В результате на основе обработанных данных был создан набор поверхностей: цифровая модель местности (ЦММ), цифровая модель рельефа (ЦМР) и разностная поверхность, которую можно трактовать в терминах высоты лесного покрова.

Предварительная обработка данных, полученных с камеры высокого разрешения и мультиспектральной камеры, заключается в нахождении элементов внешнего ориентирования и фотограмметрии. Элементы внутреннего ориентирования с использованием современного программного обеспечения определяются как из метаданных снимков, так и в процессе уравнивания сцены. Дальнейшая работа с этими данными представляет собой стандартную фотограмметрическую обработку. Важным моментом в данном случае является использование для уравнивания всех снимков, полученных как с камеры высокого разрешения, так и с мультиспектральной камеры. Только в этом случае все ортофотопланы будут иметь идентичную привязку и показатель точности планового положения точек местности [6]. Выходными данными фотограмметрической обработки являются ЦММ и ортофотоплан территории.

Следует отметить, что при выполнении обработки за основную принимается ЦММ, полученная с помощью воздушного лазерного сканирования. Точки высот при проведении лидарной съемки являются измеренными, а не вычисленными, как в случае фотограмметрии. Результаты фотограмметрии используются в первую очередь для дешифровки положения и типа деревьев на изучаемой территории.

Методика оценки объемов вырубки

В качестве основы для расчета объемов вырубки используются стандартные лесотаксационные таблицы [1], которые были приведены в машиночитаемый формат. В итоге был получен массив, который состоит из 2675 строк, соответствующих количеству отношений диаметра ствола дерева на высоте 1.3 м к его высоте. На данном этапе работы описанное преобразование было сделано для таблиц шести пород деревьев: береза, осина, дуб, сосна, ель и лиственница. Пример трехмерного отображения оцифрованной таблицы представлен на рис. 1.

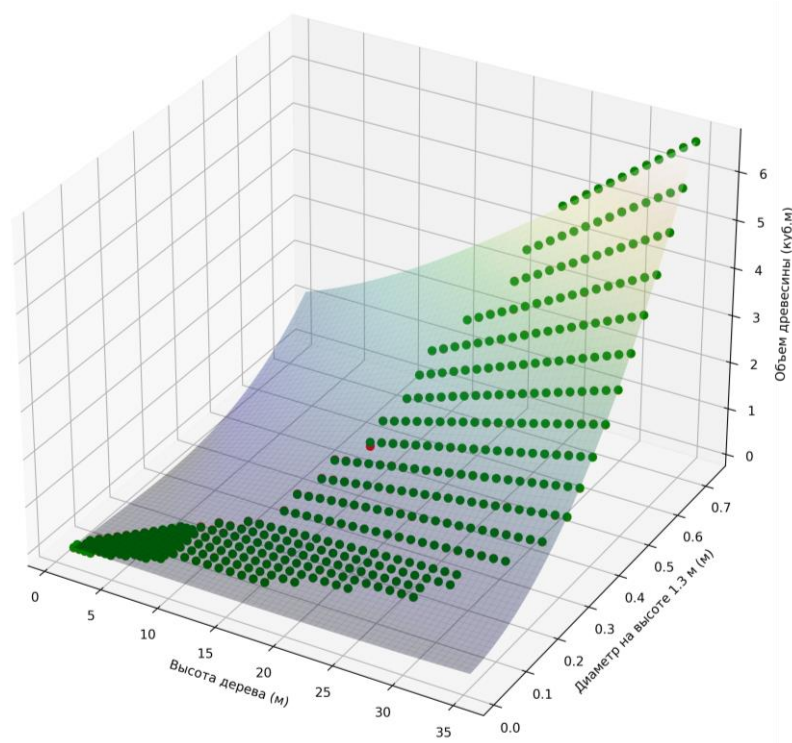


Рис. 1. Пример оцифрованной лесотаксационной таблицы

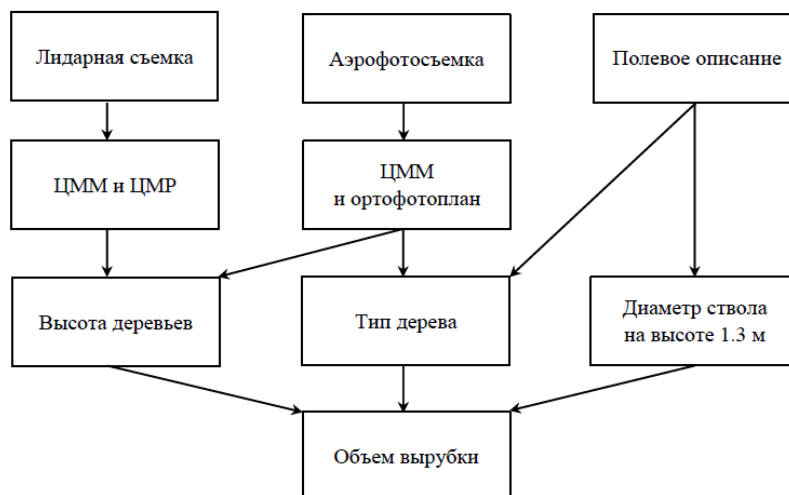


Рис. 2. Принципиальная схема обработки

По результатам оцифровки была собрана матрица, состоящая из четырех столбцов, в которых были записаны все входные параметры, необходимые для расчета объема древесины: код дерева, определяющий породу; диаметр ствола в сантиметрах на высоте 1.3 м; высота дерева в метрах; объем древесины, определяемый лесотаксационной таблицей. Принципиальная схема обработки для получения объема представлена на рис. 2.

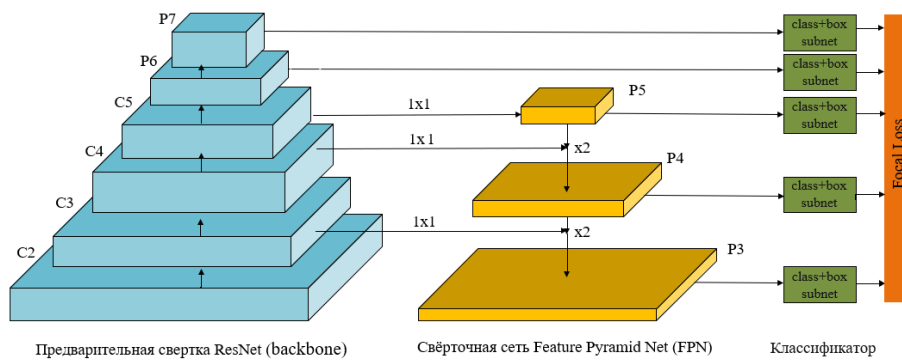


Рис. 3. Структура используемой нейронной сети [10]

После выполнения обработки результатов ДЗЗ производят планирование размещения просек, на которых будут располагаться сейсмические пункты взрыва или приема. Для этого на ортофотоплане строятся буферные линии, отождествляющие эти просеки. Ширина буфера зависит от назначения планируемой вырубki. В пределах этих буферных зон должны быть определены местоположение и типовой состав деревьев.

Для решения поставленной задачи была использована сторонняя библиотека *deeppforest* [7, 8]. Эта библиотека использует переобученную для определения деревьев модель NEON, в основе которой, в свою очередь, лежит обученная на определение широкого круга образов нейронная сеть RetinaNet с ResNet50 в качестве основы [9]. При этом остается возможность изменения вариантов взаимодействия с моделью в процессе дообучения или вывода результатов ее работы с помощью изменения открытых исходников библиотеки *deeppforest* и написания собственных процедур. Так, для решения поставленных задач была произведена доработка нейронной сети в части классификатора (рис. 3). Сейчас нейронная сеть позволяет определять только тип дерева – хвойный или лиственный. Для корректного определения породы дерева необходима обширная статистическая выборка данных мультиспектральной съемки, причем ради достижения оптимального результата эта съемка должна проводиться в разных широтах и в разное время года. В рамках настоящего исследования предлагается использовать породный состав деревьев, указанный в архивных полевых описаниях, частично подтверждаемый визуально в процессе проведения полевых работ.

Диаметр ствола на высоте 1.3 м – характеристика, которую на данный момент невозможно точно определить. Однако при проведении таксационных работ определение высоты на уровне груди проводится только для небольших модельных участков леса и затем распространяется на весь изучаемый участок леса, что может приводить к погрешности при расчете объемов вырубленной древесины.

Нами предлагается подход, основанный на использовании математического ожидания искомой величины. Как видно из рис. 1, для одной и той же породы дерева при одинаковой высоте диаметр ствола на высоте 1.3 м варьирует в широких пределах. Так, например, для осины высотой 20 м диаметр ствола на высоте 1.3 м может составлять от 0.12 до 0.6 м, что будет соразмерно оказывать влияние на определяемый объем вырубki. По средним значениям диаметра ствола

для заданной высоты дерева была построена кривая, которая описывается полиномом второго порядка. На текущий момент наиболее корректным будет выглядеть расчет объема древесины по полученным осредненным параметрам.

Результаты и их обсуждения

Для тестирования предложенного подхода был выбран небольшой участок, расположенный на территории Республики Татарстан. На полученном ортофотоплане были нанесены проектные планы трех просек (рис. 4). На этих просеках с помощью нейросети подсчитано количество деревьев, а также определен тип – хвойное или лиственное дерево (рис. 5). Отметим, что на профиле 3, согласно полученным данным, отсутствуют хвойные деревья. Кроме того, анализ результатов лидарной съемки показывает, что на профиле 1 располагаются молодые деревья с высотой, не превышающей 8 м. Исходные лесотаксационные таблицы не предполагают расчет объема для деревьев высотой менее 2 м. По этой причине после идентификации деревьев все деревья ниже этой отметки по высоте были исключены из выборки для оценки объема.

Описание пород было взято из архивных карт лесного хозяйства. Согласно этим описаниям был сделан следующий выбор пород, преобладающих в выстроенных профилях:

- 1 профиль – хвойные – сосна, лиственные – береза;
- 2 профиль – хвойные – сосна и лиственница (в равных соотношениях), лиственные – береза;
- 3 профиль – хвойные – отсутствуют, лиственные – береза и осина (в равных соотношениях).

Следует отметить, что приведенные количественные оценки являются предварительными и могут расходиться с реальной картиной. Однако замена породы в предлагаемой методике не составляет проблем.

Результаты определения объема древесины, рассчитанного по вышеописанной методике, представлены в табл. 1.

Предложенная методика требует дальнейшей доработки. В первую очередь работы должны быть направлены на дообучение нейронной сети в части идентификации конкретных пород деревьев. Пока у разработанной нейронной сети есть несколько незначительных ограничений, которые преодолимы при дальнейшем ее использовании.

1. На выходе определяются объекты с атрибутом «хвойное» или «лиственное», то есть классификатор выдает лишь два класса, без типизации, что на данный момент требует обращения к результатам полевого описания.

2. Чувствительность к пространственному разрешению, когда наилучшие результаты достигаются только в диапазоне 30–35 см на пиксель. Это объясняется тем, что исходная сеть обучалась изначально лишь на снимках от DigitalGlobe (QuickBird, WorldView, GeoEye), имеющих подобное пространственное разрешение. Дальнейшее дообучение нейронной сети с определением новых классов, характеризующих видовой состав древесной растительности, и обучение на снимках высокого разрешения (до 4 см), полученных с применением беспилотных воздушных судов и аугментацией размеченных изображений, должно, безусловно, решить данные проблемы.

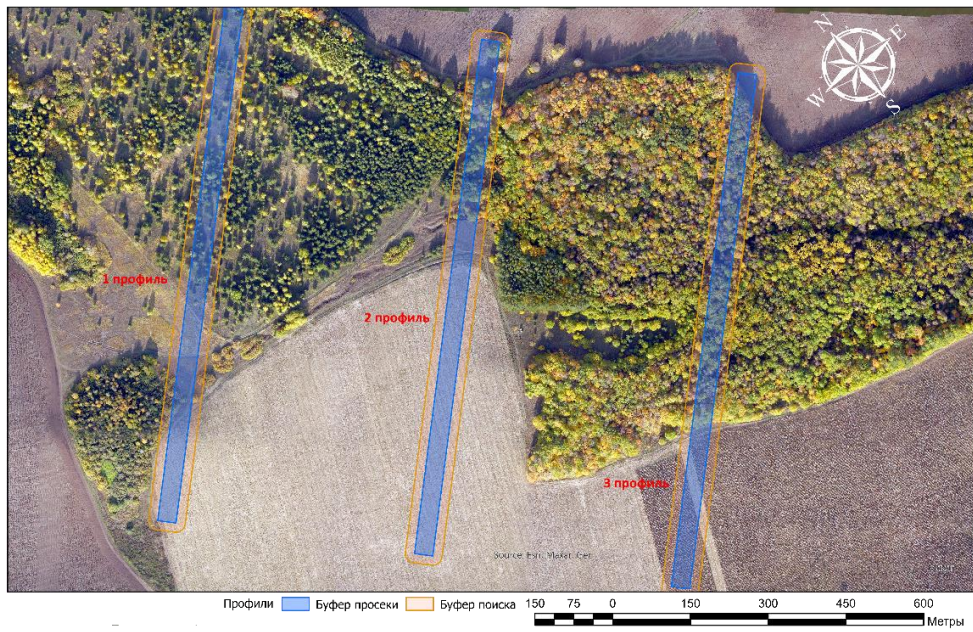


Рис. 4. Нанесенные на ортофотоплан проектные просеки

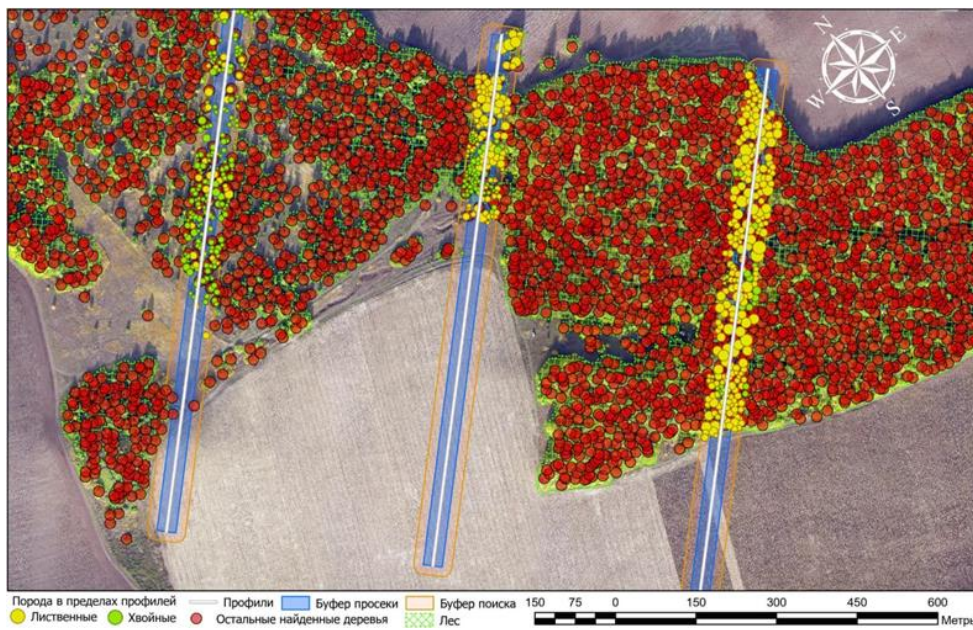


Рис. 5. Результат распознавания деревьев на ортофотоплане

Табл. 1

Объем получаемой древесины, м³, при прорубании трех проектных просек

	Сосна	Лиственница	Береза	Осина
1 профиль	1.32	—	0.46	—
2 профиль	1.13	2.38	3.46	—
3 профиль	—	—	30.43	40.9
Итого	2.45	2.35	34.35	40.9

Стоит также отметить, что вопрос верификации получаемых объемов является очень актуальным, поскольку реальный объем получаемой древесины возможно определить только после прорубания этих просек. В то же время современные таксационные методики с использованием данных ДЗЗ предполагают погрешность в определении характеристик деревьев до 30%. Предлагаемый в работе подход позволит достаточно оперативно получать информацию по текущему состоянию лесных массивов и принимать решения, связанные с экономическими рисками вследствие прорубания новых просек, например, для проведения полевых геофизических работ.

Заключение

В результате проведенной работы была создана методика оперативной оценки объема вырубki деревьев при проведении геофизических работ. Эта методика подразумевает использование беспилотных воздушных судов, с помощью которых можно получать актуальные данные по состоянию лесных насаждений, в том числе запланированных к вырубке.

Представленные результаты являются предварительными. Для унификации подхода и верификации получаемых данных необходима большая статистическая выборка по съемкам в разных климатических поясах, в разные сезоны, на территориях с различным видовым составом древесной растительности. Представленные результаты показывают значительный потенциал применения данных ДЗЗ, полученных с помощью БВС, для решения задач по определению объема вырубki.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 26.11.2019 г. № 075-11-2019-038 «Разработка многофункционального аппаратно-программного комплекса на основе беспилотных воздушных судов для планирования и сопровождения сейсморазведочных работ»).

Литература

1. *Грошев Б.И., Сеницын С.Г., Мороз П.И., Сеперович И.П.* Лесотаксационный справочник. – М.: Лесная пром-сть, 1980. – 288 с.
2. *Li J., Yang B., Chen C., Wu W., Zhang L.* Aerial-triangulation aided boresight calibration for a low-cost UAV-lidar system // *ISPRS Ann. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* – 2020. – V. V-1-2020. – P. 245–252. – doi: 10.5194/isprs-annals-V-1-2020-245-2020.
3. *Li X., Li X., Huang J., Shen Z., Wang B., Yuan Y., Zhang K.* Improving PPP-RTK in urban environment by tightly coupled integration of GNSS and INS // *J. Geod.* – 2021. – V. 95, No 132. – doi: 10.1007/s00190-021-01578-6.
4. *Айнакулов Ж.Ж., Кузьмин А.Г., Мухамедгалиев А.Ф., Разакова М.Г., Смирнов В.В.* Управление временем срабатывания затвора фотокамеры беспилотного летательного аппарата // *Проблемы информатики.* – 2016. – Т. 30, Вып. 1. – С. 84–92.
5. *Zhang W., Cai S., Liang X., Shao J., Hu R., Yu S., Yan G.* Cloth simulation-based construction of pit-free canopy height models from airborne LiDAR data // *For. Ecosyst.* – 2020. – V. 7. – Art. 1, P. 1–13. – doi: 10.1186/s40663-019-0212-0.

6. *Tumarov P.S.* Характеристики точности координат точек местности CE и LE // Геопрофи. – 2010. – Вып. 1. – С. 52–53.
7. *Weinstein B.G., Marconi S., Bohlman S., Zare A., White E.* Individual tree-crown detection in RGB imagery using semi-supervised deep learning neural networks // Remote Sens. – 2019. – V. 11, No 11. – Art. 1309, P. 1–13. – doi: 10.3390/rs11111309.
8. *Weinstein B.G., Marconi S., Bohlman S., Zare A., White E.* Geographic generalization in airborne RGB deep learning tree detection // bioRxiv. – 2019. – doi: 10.1101/790071.
9. *Gupta S., Sharma P., Sharma D., Gupta V., Sambyal N.* Detection and localization of potholes in thermal images using deep neural networks // Multimedia Tools Appl. – 2020. – V. 79. – P. 26265–26284. – doi: 10.1007/s11042-020-09293-8.
10. *Tian H., Zheng Y., Jin Z.* Improved RetinaNet model for the application of small target detection in the aerial images // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2020. – V. 585, No 1. – Art. 012142, P. 1–8. – doi: 10.1088/1755-1315/585/1/012142.

Поступила в редакцию
07.10.2021

Старовойтов Александр Владимирович, инженер кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: aldanstar@gmail.com

Фаттахов Артур Вилданович, старший преподаватель кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: avfattahov@kpfu.ru

Ячменёва Екатерина Анатольевна, аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: EAyachmenjova@gmail.com

Хамиев Марсель Маратович, инженер кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: khamiev@inbox.ru

Кислер Денис Александрович, заместитель генерального директора по маркетингу

ООО «ТНГ-Групп»
ул. Ворошилова, д. 21, г. Бугульма, 423236, Россия
E-mail: denis-kisler@tng.ru

Косарев Виктор Евгеньевич, старший преподаватель кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: Victor.Kosarev@kpfu.ru

Нургалиев Данис Карлович, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: Danis.Nourgaliev@kpfu.ru

Felling Outturn Assessment Using Earth Remote Sensing Data

A.V. Starovoytov^{a*}, A.V. Fattakhov^{a**}, E.A. Yachmeneva^{a***}, M.M. Khamiev^{a****},
D.A. Kisler^{b*****}, V.E. Kosarev^{a*****}, D.K. Nurgaliev^{a*****}

^aKazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

^b“TNG-Group” Ltd., Bugulma, 423236 Russia

E-mail: *aldanstar@gmail.com, **avfatahov@kpfu.ru, ***EAYachmenjova@gmail.com,
****khamiev@inbox.ru, *****denis-kisler@tng.ru, *****Victor.Kosarev@kpfu.ru,
*****Danis.Nourgaliev@kpfu.ru

Received October 7, 2021

Abstract

Seismic exploration often demands forest clearing, thus making it important to assess the number of trees that must be cut down as the fieldwork proceeds.

We suggest that remote sensing of the Earth’s surface with unmanned aircraft vehicles can be considered as a new approach to solving this problem. To test its validity and potential utility, we installed a laser scanning system and a high-resolution camera on the unmanned aircraft vehicle. The data obtained were used to derive the digital terrain and elevation models of the area under study.

The resulting models were processed with the help of a neural network developed as part of this work. They proved to be useful in identifying trees and their classes within the forest sites subjected to clearing. Additionally, a special algorithm was proposed and applied to assess the felling outturn for each tree class taken separately.

Keywords: unmanned aircraft vehicle, seismic exploration, remote sensing of the Earth, forest clearance

Acknowledgements. This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement no. 075-11-2019-038 of November 26, 2019 “Development of a multi-functional hardware and software complex based on unmanned aerial vehicles for planning and support of seismic exploration”).

Figure Captions

Fig. 1. Example of a digitized forest stock table.

Fig. 2. Basic block diagram of processing.

Fig. 3. Structure of the used neural network [10].

Fig. 4. Predicted clearings contoured on the orthophotomap.

Fig. 5. Tree classes shown on the orthophotomap.

References

1. Groshev B.I., Sinitsyn S.G., Moroz P.I., Seperovich I.P. *Lesotaksatsionnyi spravochnik* [Handbook on Forest Inventory]. Moscow, Lesn. Prom., 1980. 288 p. (In Russian)
2. Li J., Yang B., Chen C., Wu W., Zhang L. Aerial-triangulation aided boresight calibration for a low-cost UAV-lidar system. *ISPRS Ann. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 2020, vol. V-1-2020, pp. 245–252. doi: 10.5194/isprs-annals-V-1-2020-245-2020.

3. Li X., Li X., Huang J., Shen Z., Wang B., Yuan Y., Zhang K. Improving PPP-RTK in urban environment by tightly coupled integration of GNSS and INS. *J. Geod.*, 2021, vol. 95, no. 132. doi: 10.1007/s00190-021-01578-6.
4. Ainakulov Zh.Zh., Kuz'min A.G., Mukhamedgaliev A.F., Razakova M.G., Smirnov V.V. Controlling the shutter time of the unmanned aerial vehicle camera. *Probl. Inf.*, 2016, vol. 30, no. 1, pp. 84–92. (In Russian)
5. Zhang W., Cai S., Liang X., Shao J., Hu R., Yu S., Yan G. Cloth simulation-based construction of pit-free canopy height models from airborne LiDAR data. *For. Ecosyst.*, 2020, vol. 7, art. 1, pp. 1–13. doi: 10.1186/s40663-019-0212-0.
6. Titarov P.S. Coordinate accuracy characteristics of CE and LE terrain points. *Geoprofi*, 2010, no. 1, pp. 52–53. (In Russian)
7. Weinstein B.G., Marconi S., Bohlman S., Zare A., White E. Individual tree-crown detection in RGB imagery using semi-supervised deep learning neural networks. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 11, art. 1309, pp. 1–13. doi: 10.3390/rs11111309.
8. Weinstein B.G., Marconi S., Bohlman S., Zare A., White E. Geographic generalization in airborne RGB deep learning tree detection. *bioRxiv*, 2019. doi: 10.1101/790071.
9. Gupta S., Sharma P., Sharma D., Gupta V., Sambyal N. Detection and localization of potholes in thermal images using deep neural networks. *Multimedia Tools Appl.*, 2020, vol. 79, pp. 26265–26284. doi: 10.1007/s11042-020-09293-8.
10. Tian H., Zheng Y., Jin Z. Improved RetinaNet model for the application of small target detection in the aerial images. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 585, no. 1, art. 012142, pp. 1–8. doi: 10.1088/1755-1315/585/1/012142.

Для цитирования: Старовойтов А.В., Фаттахов А.В., Ячменева Е.А., Хамиев М.М., Кислер Д.А., Косарев В.Е., Нургалиев Д.К. Оценка объемов вырубki леса с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2021. – Т. 163, кн. 4. – С. 591–602. – doi: 10.26907/2542-064X.2021.4. 591-602.

For citation: Starovoytov A.V., Fattakhov A.V., Yachmeneva E.A., Khamiev M.M., Kisler D.A., Kosarev V.E., Nurgaliev D.K. Felling outturn assessment using Earth remote sensing data. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 4, pp. 591–602. doi: 10.26907/2542-064X.2021.4.591-602. (In Russian)