

УДК 91:630:528.7

DOI 10.17513/use.38117

ЦИФРОВОЙ МОНИТОРИНГ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ЗАЩИТНЫХ ЗОНАХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Рада А.О., Кузнецов А.Д., Акулов А.О., Зверев Р.Е.

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово, e-mail: rada.ao@kemsu.ru

Для современной биогеографии важны точные и экономичные цифровые решения, позволяющие получить правильную картину географического распределения растений, в частности леса. Цифровая таксация и создание цифровых двойников лесов позволяет принимать оптимальные решения по управлению ими. Так, при расчистке защитных полос линейных объектов инфраструктуры, таких как линии электропередач, важно минимизировать вырубку деревьев. Цель исследования – оценка применения цифровой таксации древесно-кустарниковой растительности в зонах линейных объектов инфраструктуры на основе аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна. В результате работ выявлено, что цифровой метод позволяет точно идентифицировать наличие и высоту древесно-кустарниковой растительности в защитных зонах, получить точные географические координаты для планирования работ по расчистке. В настоящее время площади территории, на которых необходимо удалить древесно-кустарниковую растительность, определяются вручную с завышением от 25 до 50%. Поэтому использование метода цифровой таксации позволяет сохранить до 0,8 га древесно-кустарниковой растительности на 1 км протяженности линии электропередачи, а также экономить около 27 тыс. руб. на 1 км при проведении работ по расчистке охранных зон.

Ключевые слова: лесные ресурсы, древесно-кустарниковая растительность, биогеография, защитные зоны линий электропередач, беспилотные воздушные суда, аэрофотосъемка, цифровая таксация

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-15-2022-1195 от 30.09.2022, заключенного между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

DIGITAL MONITORING WOOD AND SHRUBS IN PROTECTIVE ZONES OF LINEAR INFRASTRUCTURE OBJECTS

Rada A.O., Kuznetsov A.D., Akulov A.O., Zverev R.E.

Kemerovo State University, Kemerovo, e-mail: rada.ao@kemsu.ru

For modern biogeography, accurate and cost-effective digital solutions are important to obtain a correct picture of the geographical distribution of plants, in particular forests. Digital taxation and creation of digital twins of forests allows you to make optimal decisions on their management. Thus, when clearing protective strips of linear infrastructure facilities, such as power lines, it is important to minimize tree cutting. The purpose of the study is the feasibility of using digital taxation of trees and shrubs in areas of linear infrastructure facilities based on aerial photography from an unmanned aerial vehicle. As a result of the work, it was revealed that the digital method makes it possible to accurately identify the presence and height of tree and shrub vegetation in protective zones, and obtain precise geographic coordinates for planning clearing work. Currently, the areas of the territory where it is necessary to remove tree and shrub vegetation are determined manually with an overestimation of 25–50%. Therefore, the use of the digital taxation method makes it possible to preserve up to 0.8 hectares of tree and shrub vegetation per 1 km of power line length, and also save about 27 thousand rubles. by 1 km when carrying out work to clear security zones.

Keywords: forest resources, trees and shrubs, biogeography, protective zones of power lines, unmanned aerial vehicles, aerial photography, digital taxation

The work was carried out within the framework of agreement No. 075-15-2022-1195 dated September 30, 2022, concluded between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and Kemerovo State University.

Важнейший аспект устойчивого развития на глобальном уровне – не только сокращение выбросов парниковых газов, но и сохранение, увеличение зеленых насаждений, которые активно поглощают оксид углерода (CO₂). Леса являются естественным резервуаром для CO₂, поскольку он активно поглощается в процессе фотосинтеза [1, 2]. Поэтому эффективное лесопользование очень важно для устойчивого развития. При

этом современное устойчивое лесоводство базируется на как можно более полных и детальных данных о наличии, площади, состоянии лесов [3].

Основой лесоустройства является таксация леса, история которой насчитывает более 300 лет. При этом важным направлением развития современной таксации является широкое использование цифровых технологий [4, 5]. В перспективе каж-

дый гектар леса может быть представлен в компьютерной среде в виде цифрового двойника, с исчерпывающей информацией о высоте, диаметре, длине ствола, площади сечения ствола, сбега ствола. Цифровой двойник позволит принимать более верные решения об управлении лесами, быстро выявлять и пресекать незаконные рубки, находить участки с поражением вредителями, болезнями, немедленно выполнять конкретные действия по защите леса.

Однако цифровая таксация требует использования эффективных программно-аппаратных комплексов, которые включают в себя устройства сбора информации и их носители, средства для передачи и хранения информации, специализированное программное обеспечение. В настоящее время известен ряд программных и аппаратных решений для цифровой таксации, которые начинают постепенно использоваться в различных странах. Они позволяют создать модель «умных лесов».

Например, в Финляндии в 2012 г. начала работу общенациональная база данных о лесах «Metsaan.fi», где хранится информация о площадях, владельцах, состоянии лесов, созданы инструменты взаимодействия коммерческих организаций между собой и с правительством [6]. Получить цифровые копии всех лесов страны стремится Китай [7]. В большинстве случаев цифровой двойник леса создается путем дистанционного зондирования Земли и обработки полученных визуальных данных с использованием геоинформационной системы, хотя возможно получение детальных снимков каждого дерева [8].

Однако в целом внедрение цифровых технологий в сферу лесопользования далеко от завершения, существует много нерешенных вопросов. Сложность и неоднородность объектов наблюдения, важность детального измерения и учета различных параметров деревьев и кустарников, необходимость подбора эффективной технологии дистанционного зондирования требуют разработки соответствующих программно-аппаратных комплексов, чтобы удовлетворить специфические потребности таксации.

Одна из таких задач – таксация локальных участков леса или кустарниковой растительности для рубок вокруг линейных объектов инфраструктуры (трубопроводы, линии электропередач). В охранных зонах или на месте строительства промышленных объектов вынужденно проводится вырубка деревьев и зачистка кустарниковой

растительности, чтобы исключить падение деревьев на провода, их обрыв и возникновение пожаров. В настоящее время вырубка деревьев по трассам линий электропередач планируется только вручную. Это приводит к завышению необходимого объема рубки, что наносит как экологический, так и экономический ущерб (дополнительные непроизводительные расходы). Кроме того, сохранение растительности будет способствовать поглощению углерода и снижению углеродного следа.

По мнению авторов, использование цифровой таксации при эксплуатации линейных объектов инфраструктуры позволит сократить затраты операторов и сохранить значительное число деревьев. Для этого, в свою очередь, нужны программно-аппаратные комплексы, которые дают возможность создать цифровую копию каждого отдельного дерева, учитывая особенности объектов наблюдения. В исследовании М. Балси и др. рассматривается задача поиска отдельных деревьев в смешанных лесах, когда стандартная 3D-модель, характерная для определенного вида, сравнивается с данными, полученными по технологии лидара (от англ. LIDAR или LiDAR, Light Detection and Ranging) [9]. В первой половине 2010-х гг. именно лидары обычно применялись для обнаружения и идентификации деревьев [10], но затем стала использоваться обычная фотосъемка. Так, в работе О. Неваляинен и др. была использована фотограмметрия для идентификации отдельных деревьев, достигнута точность распознавания от 40 до 95% [11]. Исследование М. Мохан и др. демонстрирует возможность использования для съемки лесов и деревьев даже обычной потребительской камеры [12].

Однако существующие разработки предназначены для построения цифровых двойников многолетних лесов, естественной растительности и не соответствуют условиям защитных полос трубопроводов и линий электропередач. В этих местах обычно растет молодая поросль осины, ивы, березы, которые перемежаются кустарником. За 5–7 лет эти деревья достигают высоты 3–6 м. Традиционные методы съемки и цифровизации малоприменимы для таких участков. Кроме того, существующие программы не решают задачи планирования работ по расчистке. Поэтому цель исследования – оценка применения цифровой таксации древесно-кустарниковой растительности в зонах линейных объектов инфраструктуры.

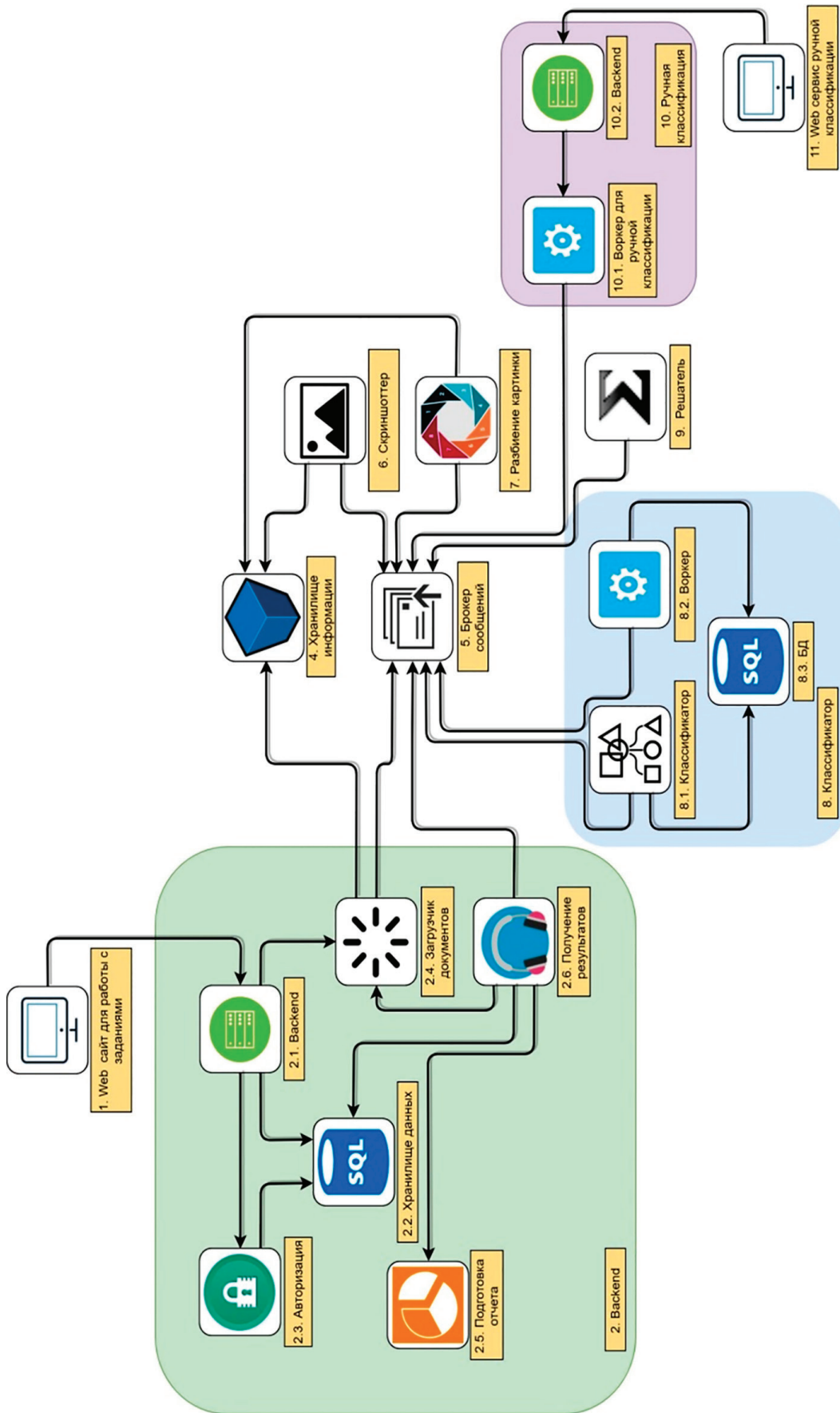


Рис. 1. Логическая схема программного комплекса для цифровой таксации

Материалы и методы исследования

В исследовании использованы аэрофотоснимки части территории Кемеровской области – Кузбасса, а также программный комплекс для классификации деревьев и кустарников по высоте, расчета площади залесенности, объемов деловой древесины, количества и плотности размещения деревьев и кустарников. Для обработки данных аэрофотосъемки использовалось программное обеспечение, основное отличие которого – возможность автоматического выполнения таксации путем обработки загруженных фотоснимков или видеоматериалов без участия пользователя и наличия у него специальных знаний. Поэтому при разработке использовалась нейросетевая технология, позволяющая распознавать образы и реализующая эффект самообучения. В качестве базовой технологии нейронной сети использован метод многослойного перцептрона и сети с самоорганизацией на основе конкуренции (сеть Кохонена).

Принцип работы комплекса – благодаря обучению нейросеть способна будет преобразовывать фотоснимки и (или) видеозаписи в набор параметров, характеризующих

растительность путем распознавания образов. К этим параметрам относятся высота деревьев (по достижению определенной высоты их нужно спиливать, чтобы предотвратить пожары и обрывы проводов), площадь кроны в квадратных метрах, плотность леса (кубических метров древесины на 1 га площади).

Работа комплекса выстроена по логической схеме, показанной на рис. 1. Пользователь работает непосредственно с сайтом, где реализован функционал для работы с фото- и видеоизображениями. Важнейший элемент программного комплекса – классификатор, он включает в себя сам классификатор, где функционирует сервис с нейронной сетью для классификации изображений деревьев и скрипт (воркер), который проверяет завершение процесса распознавания образа, отправляет массив данных в брокер сообщений. Предусмотрена также возможность ручной классификации, если нейросети не удастся автоматически распознать вид дерева. Изображения накапливаются в базе данных для машинного обучения нейросети. Физическая схема программного комплекса представлена на рис. 2.

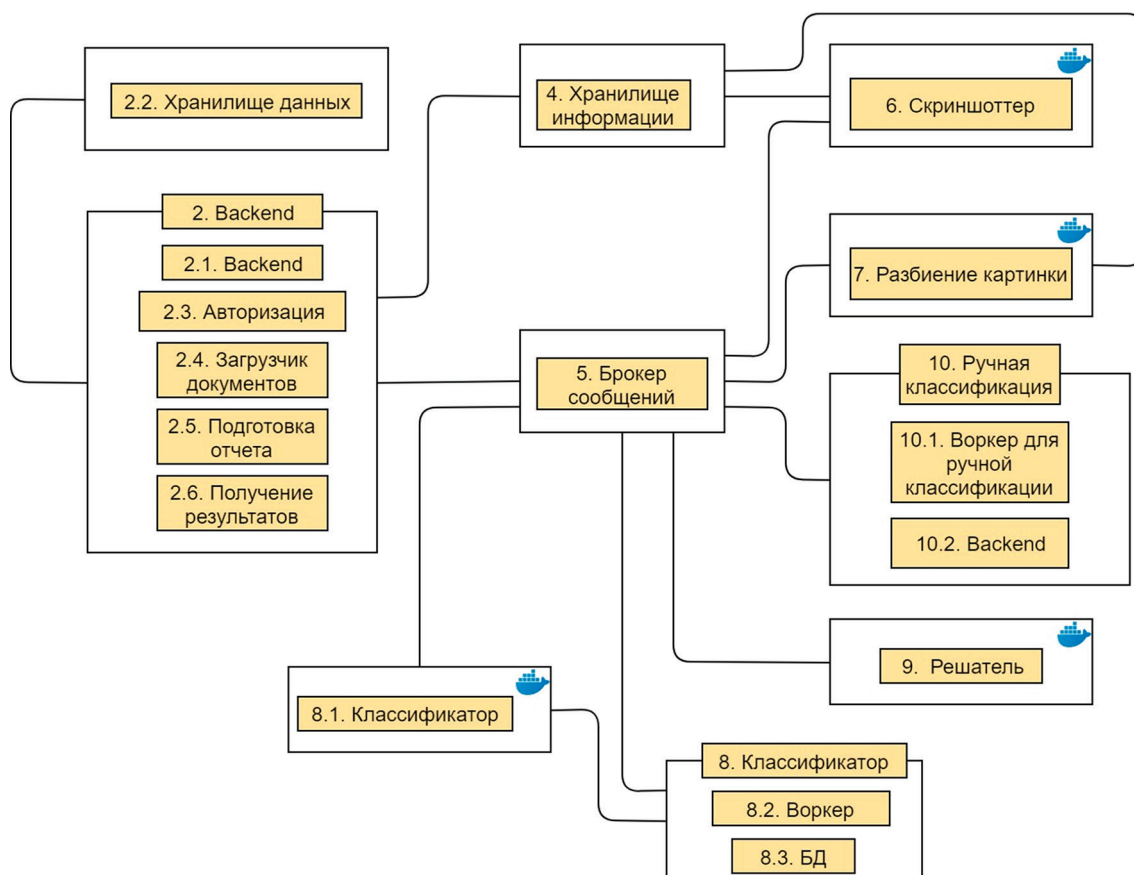


Рис. 2. Физическая схема программного комплекса

Она предусматривает физическое деление элементов программы для рационального использования различных элементов аппаратной части и снижения требований к вычислительным мощностям у самого пользователя. Наибольшую вычислительную мощность требует работа классификатора, максимальная емкость жесткого диска нужна для работы объектного хранилища. Конечный пользователь может использовать практически любой современный компьютер. Апробация программного комплекса показала, что он может работать без оператора и после загрузки фотоматериалов, видеоматериалов автоматически формировать готовый отчет. Автономность позволяет обрабатывать большое количество заказов в короткие сроки. Программный комплекс способен обрабатывать не менее 10000 фотографий за 24 ч до выдачи результата. Изображения могут храниться до 12 месяцев с момента загрузки. Это позволило авторам перейти к практическому выполнению работ по цифровой таксации после проведения обучения нейронной сети на материалах 10 тыс. снимков.

Результаты исследования и их обсуждение

Работа по цифровой таксации включала в себя несколько этапов. На подготовительном этапе проводится предпроектное исследование участка для определения возможности проведения аэрофотосъемки с БВС. На этом этапе определяются границы участка, изучается местность при помощи карт типа «Google Earth», оцениваются перепады рельефа, высота растительности, составляется и согласуется полетный маршрут, проводится сбор данных путем аэрофотосъемки с БВС и их обработка для получения ортофотоплана, цифровой модели поверхности и цифровой модели рельефа. После этого выполняется анализ залесенности. Для этого выполняются следующие действия.

1. Определяются точные границы охранной зоны линии электропередач по каждому пролету, точные координаты каждой опоры, проекция крайнего провода на земную поверхность (рис. 3). Это позволяет четко выделить границы территории, нуждающейся в расчистке, и исключить из рассмотрения те деревья, которые находятся вне ее границ. При традиционном способе планирования расчистки эти деревья обычно уничтожают, хотя в этом нет необходимости. Как видно из рис. 3, наибольшая концентрация

растительности наблюдается на северном участке линии электропередач.



Рис. 3. Определение точных границ охранной зоны участка линии электропередач при аэрофотосъемке с БВС

2. Проводится классификация древесно-кустарниковой растительности по высоте в соответствии с требованиями к защитным зонам. Пример классификации представлен на рис. 4. Серый цвет означает, что древесно-кустарниковая растительность имеет высоту менее 1 м, зеленый цвет соответствует высоте от 1 до 4 м. Синим цветом обозначается растительность высотой от 4 до 8 м, красным цветом – с высотой более 8 м. Эта классификация важна, поскольку позволяет определить, какую растительность необходимо будет ликвидировать в соответствии с высотой линии электропередач. В приведенном на рис. 4 примере видно, что в северной части снимка расположены деревья высотой более 8 м, что создает риск обрыва проводов и пожара.

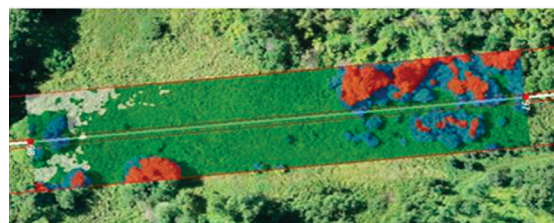


Рис. 4. Классификация древесно-кустарниковой растительности по высоте после обработки снимков с БВС

3. Проводится программный расчет площади залесенности по классам древесно-кустарниковой растительности в зависимости от высоты. В приведенном примере 0,06 га занимает растительность высотой больше 8 м, 0,10 га – растительность высотой от 4 до 8 м, 0,32 га – растительность высотой от 1 до 4 м, 0,03 га занимает растительность высотой менее 1 м. На заключительном этапе исследования анализируются полученные результаты съемки, строится план работ по расчистке охранной зоны

линии электропередач. Результаты исследования показали, что при точном планировании расчистки на основе данных цифровой таксации объем работ снижается примерно в два раза по сравнению с традиционным ручным методом.

Следовательно, применяемый комплекс позволяет как получить положительный экономический эффект, так и сохранить определенное число деревьев. Объем сохраненной древесины рассчитывается по формуле

$$V = \sum_{i=1}^n \left(\frac{I}{100} \cdot S_p \right) \bar{H}, \quad (*)$$

где V – объем деловой древесины, м³; I – плотность лесного покрова на 1 пиксель кадра, процентов; S_p – площадь 1 пикселя, мм²; \bar{H} – средняя высота лесного покрова в границах обследуемой территории, м.

В частности, в приведенном на рис. 3 и 4 примере площадь древесной растительности, которую можно сохранить путем точного планирования расчистки, составляет до 0,8 га на 1 км протяженности линии электропередач. Объем сохраненной древесины, в соответствии с формулой (*), составит около 15 тыс. м³. При этом протяженность воздушных линий электропередач высокого напряжения в ПАО «Россети Сибирь» составляет около 250 тыс. км. Следовательно, экологический эффект от сохранения деревьев при масштабировании технологии цифровой таксации может быть очень значительным.

Экономический эффект цифровой таксации объясняется снижением затрат на ликвидацию древесно-кустарниковой растительности. Результаты аэрофотосъемки показали, что традиционный «глазомерный» метод планирования расчистки приводит к завышению объемов работ на 25–50% (по площади). По опубликованным данным о закупках работ по расчистке охранных полос линий электропередачи в Омской области на линии протяженностью 168,4 км расчистка проводилась на площади 342,03 га. Стоимость работ составила 10729,1 тыс. руб. При использовании цифровой таксации площадь расчистки может быть снижена до 171,02 га. Соответственно, расходы на проведение работ пропорционально сократятся на 50% – до 5364,5 тыс. руб.

Затраты на проведение цифровой таксации, по оценкам Института цифры Кемеровского государственного университета, который оказывает услуги по беспилотной аэрофотосъемке, около 5 тыс. руб. за 1 км.

Соответственно, обследование линии электропередач протяженностью 168,4 км будет стоить 842 тыс. руб. Таким образом, чистое снижение затрат составит 4522,5 тыс. руб. На уровне ПАО «Россети» в целом укрупненный экономический эффект может составить 2,0–2,5 млрд руб., учитывая, что на расчистку охранных зон компания ежегодно тратит более 5 млрд руб.

Заключение

Исследование, проведенное в рамках свода работ, выполненных по результатам мониторинга лесов проекта «Геоинформационная система цифрового регионального управления», было направлено на решение одной из задач устойчивого развития – сохранение растительности при расчистке защитных полос линейных объектов инфраструктуры на основе цифровой таксации. Был использован новый программный продукт для цифровой таксации на основе данных аэрофотосъемки. Основными его составляющими являются классификатор, работающий с использованием технологии нейронной сети, воркер, брокер сообщений. Использование программного комплекса для обработки данных съемки с БВС позволяет конечному пользователю без специальных знаний и навыков получать отчеты о результатах таксации и на их основе проводить точное планирование работ по расчистке защитных полос.

Апробация программно-аппаратного комплекса показала, что решена задача таксации древесно-кустарниковой растительности в защитной зоне. Это позволяет четко фиксировать необходимые границы территории, где нужно ликвидировать растительность, определять высоту растительности и необходимость ее вырубки. Все результаты съемки в программе хорошо визуализируются и воспринимаются пользователями. Результаты цифровой таксации позволяют точно определить необходимый объем вырубki. Он на 25–50% ниже, чем при планировании расчистки защитных зон традиционным способом (глазомерным). Использование цифровой таксации компаниями, эксплуатирующими линии электропередач и другие линейные объекты, дает экологический и экономический эффект. Можно сохранить до 0,8 га древесно-кустарниковой растительности на 1 км протяженности линии передач, а также сэкономить около 27 тыс. руб. на расчистку охранной зоны на протяжении 1 км линии передач.

Список литературы

1. Popkin G. The forest question. Trees are supposed to slow global warming, but growing evidence suggests they might not always be climate saviors // *Nature*. 2019. Vol. 565, Is. 7739. P. 280–282. DOI: 10.1038/d41586-019-00122-z.
2. Harris N.L., Gibbs D.A., Baccini A., Birdsey R.A., de Bruin S. et. al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes // *Nature Climate Change*. 2021. Vol. 11. P. 234–240. DOI: 10.1038/s41558-020-00976-6.
3. Bespalova V., Gedio V., Polyanskaya O., Shaitarova O., Tereschenko S. Sustainable forest management is one of Russia's economic problems // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 316. Article no. 012086. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012086.
4. Gabrys J. Smart forests and data practices: from the Internet of Trees to planetary governance // *Big Data & Society*. 2020. Vol. 7, Is. 1. P. 1–10. DOI: 10.1177/2053951720904871.
5. Nitoslawski S.A., Wong-Stevens K., Steenberg J.W., Witherspoon K., Nesbitt L. et. al. The digital forest: Mapping a decade of knowledge on technological applications for forest ecosystems // *Earth's Future*. 2021. Vol. 9, Is. 8. Article no. e2021EF002123. DOI: 10.1029/2021EF002123.
6. Pynnönen S., Haltia E., Hujala T. Digital forest information platform as service innovation: Finnish Metsaan.fi service use, users and utilization // *Forest Policy and Economics*. 2021. Vol. 125. Article no. 102404. DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102404.
7. Tang L., Shao G., Dai L. Roles of digital technology in China's sustainable forestry development // *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2009. Vol. 16, Is. 2. P. 94–101. DOI: 10.1080/13504500902794000.
8. Vagizov M.R., Istomin E.P., Mikheev V.L., Potapov A.P., Yagotinceva N.V. Visual digital forest model based on a remote sensing data and forest inventory data // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, Is. 20. Article no. 4092. DOI: 10.3390/rs13204092.
9. Balsi M., Esposito S., Fallavollita P., Nardinocchi C. Single-tree detection in high-density LiDAR data from UAV-based survey // *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51, Is. 1. P. 679–692. DOI: 10.1080/22797254.2018.1474722.
10. Zhen Z., Quackenbush L.J., Zhang L. Trends in automatic individual tree crown detection and delineation – evolution of LiDAR data // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8, Is. 4. Article no. 333. DOI: 10.3390/rs8040333.
11. Nevalainen O., Honkavaara E., Tuominen S., Viljanen N., Hakala T. et. al. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, Is. 3. Article no. 185. DOI: 10.3390/rs9030185.
12. Mohan M., Silva C.A., Klauberg C., Jat P., Catts G. et. al. Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest // *Forests*. 2017. Vol. 8, Is. 9. Article no. 340. DOI: 10.3390/f8090340.