

УДК 528.8:582.091

DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015

Оригинальная статья

Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу»)

И.А. Керимов , А.С. Эльжаев , А.А. Додуев 

Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный,
пр. Х. Исаева, 100, e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Статья поступила: 11.09.2024, доработана: 05.11.2024, принята к публикации: 06.11.2024

Резюме: Актуальность работы. Данная статья посвящена собственным результатам получения и обработки данных мультиспектральной, лидарной и аэрофотограмметрической съемок сверхвысокого разрешения. В статье представлены результаты оценки древостоя (высота и объем крон деревьев), состояния растительного покрова в периоды начала и спада вегетации, и рельефа местности по материалам указанных съемок с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Геоскан 401. Использование БПЛА для мониторинга лесов на сегодняшний день является одним из самых актуальных и быстроразвивающихся направлений слежения за состоянием лесного покрова. **Цель исследования.** Целью исследования было получение качественного ортофотоплана, цифровой модели рельефа (ЦМР), карт растительности (NDVI), а также картограмм максимальных и средних значений высот и объемов крон деревьев, которые в дальнейшем будут использованы при решении задачи оценки потоков парниковых газов. **Методы исследования.** В качестве полезной нагрузки к БПЛА применены лазерный сканер АГМ МС 1.2, цифровая мультиспектральная камера высокой производительности Geoscan Pollux и фотоаппарат Sony. Съемки проведены в прошлом году на участке «Рошни-Чу» Карбонового полигона Чеченской Республики. Исследуемый участок покрыт, преимущественно, широколиственными лесами, имеет площадь около 243 га и относится к переходному типу от низкогорных ландшафтов горнолесной зоны к горно-долинному лесо-лугово-кустарниковому подтипу. Отличительную особенность растительного покрова составляют дикорастущие виды плодовых деревьев и кустарников. Мультиспектральная съемка производилась с высоты 229 метров, лидарная съемка – с высоты 120 метров. Полученные в процессе съемок качественные исходные материалы обработаны в программах Agisoft Metashape и LiDAR 360, краткое описание которых также дается в данной статье. **Результаты исследования.** Представлен конечный результат в виде ортофотоплана и ЦМР, карт вегетационного индекса NDVI, картограмм высот деревьев и объемов их крон. Анализ карт NDVI, построенных в начале и конце вегетации, показал, что индексы растительности на исследуемом участке находятся в диапазоне значений, характерном для здоровых лиственных деревьев.

Ключевые слова: мультиспектральная съемка, лидарная съемка, БПЛА, NDVI, участок «Рошни-Чу».

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания № FZNU-2024-0002.

Для цитирования: Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Дистанционный мониторинг лесных территорий (на примере эталонного участка «Рошни-Чу»). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 180-191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015

DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015

Original paper

Remote monitoring of forest areas (using the example of the reference site “Roshni-Chu”)

I.A. Kerimov^{id}, A.S. Elzhaev^{id}, A.A. Doduev^{id}

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
100 Ave. Kh. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation,
e-mail: aslambek.elzhaev@mail.ru

Received: 11.09.2024, revised: 05.11.2024, accepted: 06.11.2024

Abstract: Relevance. This article is devoted to our own results of obtaining and processing data from multispectral, lidar and aerial photogrammetric ultra-high resolution surveys. The article presents the results of assessing the forest stand (height and volume of tree crowns), the state of the vegetation cover during the periods of the beginning and decline of the growing season, and the terrain based on the materials of the specified surveys using an unmanned aerial vehicle (UAV) Geoscan 401. The use of UAVs for forest monitoring today is one of the most relevant and rapidly developing areas for monitoring the state of forest cover. **Aim.** The purpose of the study was to obtain a high-quality orthophotoplan, digital elevation model (DEM), vegetation maps (NDVI), as well as cartograms of maximum and average heights and volumes of tree crowns, which later will be used to solve the problem of estimating greenhouse gas flows. **Methods.** An AGM MS 1.2 laser scanner, a Geoscan Pollux high-performance digital multispectral camera and a Sony camera were used as payloads for the UAV. Filming was carried out this year at the Roshni-Chu site of the Carbon Polygon of the Chechen Republic. The studied area is covered mainly by deciduous forests, has an area of about 243 hectares and belongs to the transitional type from low-mountain landscapes of the mountain forest zone to the mountain-valley forest-meadow-shrub subtype. A distinctive feature of the vegetation cover is wild species of fruit trees and shrubs. Multispectral photography was carried out from a height of 229 meters, lidar photography - from a height of 120 meters. The high-quality source materials obtained during the filming process were processed in the Agisoft Metashape and LiDAR 360 programs, a brief description of which is also given in this article. **Results.** The final result is presented in the form of an orthophotomap and DEM, maps of the NDVI vegetation index, cartograms of tree heights and the volume of their crowns. Analysis of NDVI maps constructed at the beginning and end of the growing season showed that vegetation indices in the studied area are in the range of values typical for healthy deciduous trees.

Keywords: multispectral survey, lidar survey, UAV, NDVI, Roshni-Chu site.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of a state assignment No. FZNU-2024-0002.

For citation: Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Remote monitoring of forest areas (using the example of the reference site “Roshni-Chu”). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 180-191. DOI: 10.46698/VNC.2024.85.96.015

Введение

В мире наблюдается устойчивая тенденция развития рынка беспилотных авиационных систем (БАС) [Домрачев, Ануфриев, 2019; Рис, 2006; Измествьев, 2017; Jiao et al., 2021] и активного использования беспилотных технологий в экономике для решения различных задач [Друзь и др., 2023]. Так, с 2018 года

среднегодовой темп роста мирового рынка беспилотных авиационных систем составил 21 %.

В России развитие рынка беспилотных авиационных систем началось только в начале XXI века, хотя первые БАС для гражданских целей появились еще в 1960–1970 годах. С 2018 по 2024 годы рост российского рынка в среднегодовом выражении увеличился более чем на 27 процентов.

Спрос на услуги с применением беспилотных авиационных систем наблюдается в геологоразведке и добыче полезных ископаемых, строительстве, сельском и лесном хозяйствах, топливно-энергетическом комплексе и др.

Государственный сектор вносит существенный вклад в использование беспилотных авиационных систем и предоставление услуг с их применением. С 2018 по 2022 годы в рамках государственных закупок было заключено почти 2 тыс. контрактов на сумму более 13 млрд рублей. 26 % заказчиков относятся к сфере науки и образования («Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года». Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. № 1630-р).

На участках Карбонового полигона Чеченской Республики [Керимов и др., 2021] сбор и передача данных, дистанционный мониторинг осуществляются, в основном, с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Геоскан 401. Данный БПЛА – отечественный комплекс с встроенным GNSS-приемником, снимки с которого позволяют создавать точные геопривязанные ортофотопланы и 3D-модели. В качестве полезной нагрузки к БПЛА нами используются лазерный сканер АГМ МС 1.2 с инерциальной системой ПС.М-33, цифровая мультиспектральная камера высокой производительности Geoscan Pollux, фотоаппарат Sony ZV-e10 с креплением к АГМ-МС.

Вид и методика исследования

На участке «Рошни-Чу», краткая информация о котором представлена в табл. 1, с целью получения качественного ортофотоплана, цифровой модели рельефа (ЦМР), карты индекса растительности (NDVI), а также информации о древостое в прошлом году нами проведены лидарная и мультиспектральная съемки в мае (период начала вегетации) и в октябре (конец вегетационного периода). Участок «Рошни-Чу» покрыт, преимущественно, широколиственными лесами, имеет площадь около 243 га и относится к переходному типу от низкогорных ландшафтов горнолесной зоны к горно-долинному лесо-лугово-кустарниковому подтипу. Отличительной особенностью растительного покрова является присутствие диких плодовых видов древесной и кустарниковой растительности [Керимов и др., 2021].

Мультиспектральная съёмка проводилась на высоте 229 м с разрешением 10.1 см/пикс. Скорость полёта – 10 м/с. Площадь покрытия съёмкой составила 3,43 км². Во избежание разрывов местности на снимках съёмка производилась с перекрытием: продольное перекрытие снимков составляло 80 %, поперечное – 60 %.

Использованная нами мультиспектральная камера Geoscan Pollux позволила вести съёмку одновременно в пяти узких (12–40 нм) диапазонах. Помимо основных каналов видимого спектра (синего, красного и зеленого) камера способна регистрировать дальний красный и ИК спектры, что позволяет рассчитывать различные индексы вегетации: SAVI, NDVI, NDRE, LAI и др. Всего получено 12210 снимков, обработка которых осуществлялась в программе Agisoft Metashape (Руководство поль-

зователя: Professional Edition, версия 1.8). ПО Agisoft Metashape позволяет обрабатывать изображения в видимом диапазоне RGB, мультиспектральные снимки, а также структурированные облака точек лазерных отражений (ТЛО) и неструктурированные облака ТЛО аэросъёмки. Результаты обработки представляют собой различные типы пространственных данных: облака точек, текстурированные полигональные модели, ортофотопланы и цифровые модели местности [Курков и др., 2021].

Для визуализации и практического применения материалов мультиспектральной съемки используются разные индексы [Bannari et al., 1995; Jiao et al., 2021; Silleos et al., 2006; Vidican et al., 2023]. Состояние растительности определяется с помощью вегетационных индексов, наиболее распространённым из которых является нормализованный вегетационный индекс (NDVI), впервые введенный в 1973 году [Rouse, 1973]. NDVI предназначен для определения количества фотосинтетически активной биомассы [Гутовский и др., 2019; Asrar et al., 1984; Filgueiras et al., 2019; Khan et al., 2024].

Таблица 1 / Table 1

**Характеристика эталонного участка «Рошни-Чу» /
Characteristics of the reference site “Roshni-Chu”**

Географические координаты/ Geographic coordinates	северная граница/ northern border	южная граница/ southern border	восточная граница/ eastern border	западная граница/ western border
	45.433733 ВД/ EL 43.067742 СШ/ NL	45.427040 ВД/ EL 43.037827 СШ/ NL	45.437365 ВД/ EL 43.066476 СШ/ NL	45.419490 ВД/ EL 43.054111 СШ/NL
Площадь, га/ Area, ha	243			
Абсолютные высотные отметки, м/ Absolute elevations, m	Минимальная / minimum		Максимальная / maximum	
	418		550	
Тип ландшафта/ Type of landscape	Низкогорные ландшафты горнолесной зоны представлены смешанными лесами. Основа этих лесов – дикие фруктовые деревья с хорошо сомкнутыми буково-грабовыми лесами. Территория сложена, в основном, песчано-глинистыми, сланцевыми и известняковыми отложениями палеоген-неогеновой системы / Low-mountain landscapes of the mountain forest zone are represented by mixed forests. The basis of these forests is wild fruit trees with well-closed beech and hornbeam forests. The territory is composed mainly of sandy-clayey, shale and limestone deposits of the Paleogene-Neogene system			
Тип растительности/ Vegetation type	Растительность представлена дубом, ольхой черной и бородавчатой, кленом полевым, буком восточным, грабом кавказским. Отличительную особенность растительного покрова составляют дикие плодовые виды древесной и кустарниковой растительности / The vegetation is represented by oak, black and warty alder, field maple, eastern beech, and Caucasian hornbeam. A distinctive feature of the vegetation cover is wild fruit species of trees and shrubs.			
Тип почвы/ Soil type	Преобладают горнолесные бурые, местами оподзоленные почвы в сочетании с перегнойно-карбонатными и лугово-аллювиальными почвами / Mountain forest brown, locally podzolized soils predominate in combination with humus-carbonate and meadow-alluvial soils			

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) проводилось с целью получения точных и детальных ЦМР эталонного участка «Рошни-Чу» и построения карт высот

деревьев и объема крон для последующего определения количественных значений этих параметров. ВЛС обеспечивает быстрое получение точных и детальных цифровых моделей местности [Кочнева, Мальченко, 2017; Kim et al., 2022], в том числе и труднодоступной, для последующего картографирования растительного покрова и проведения измерений высоты деревьев, объема биомассы и других измерений.

Лазерное сканирование (лидарная съемка) осуществлялось одновременно с цифровой аэрофотосъемкой, что позволило создать трехмерную точечную модель (облако точек), состоящую из массива точек лазерных отражений (ТЛО) плотностью до нескольких сотен точек на 1 м² и точностью определения их координат до 5 см в плане и по высоте. Данные аэрофото- и лидарной (ВЛС) съемок обрабатывались в программе LiDAR 360. ПО LiDAR 360 – это комплексное программное обеспечение для постобработки облаков точек с инструментами визуализации, редактирования и создания значимых геопространственных данных.

Материалы, полученные по данным вышеописанных съемок, успешно используются при моделировании потоков парниковых газов [Ольчев и др., 2023; Dagg, Lafleur, 2010; Nikosaka, Tsujimoto, 2021].

Результаты исследования

После загрузки снимков в программу и их выравнивания было построено плотное облако точек для лучшей детализации рельефа и построения модели местности. В результате получен ортофотоплан изучаемого участка (рис. 1).

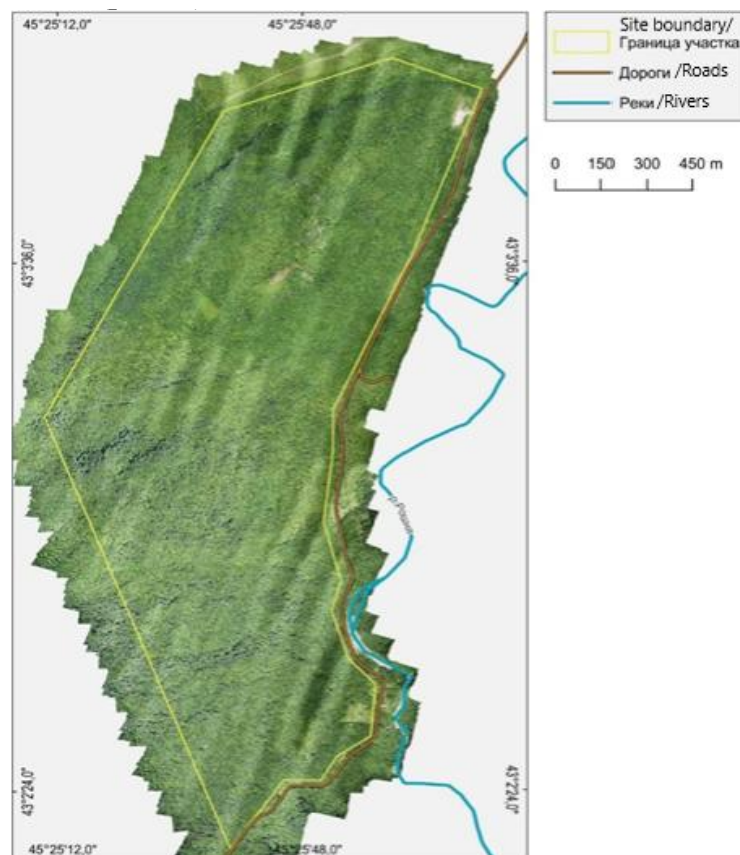


Рис. 1. Ортофотоплан участка «Рошни-Чу» /

Fig. 1. Orthophotomap of the “Roshni-Chu” site

Нами был рассчитан индекс NDVI и построены карты для оценки активности вегетации растений (рис. 2, 3).

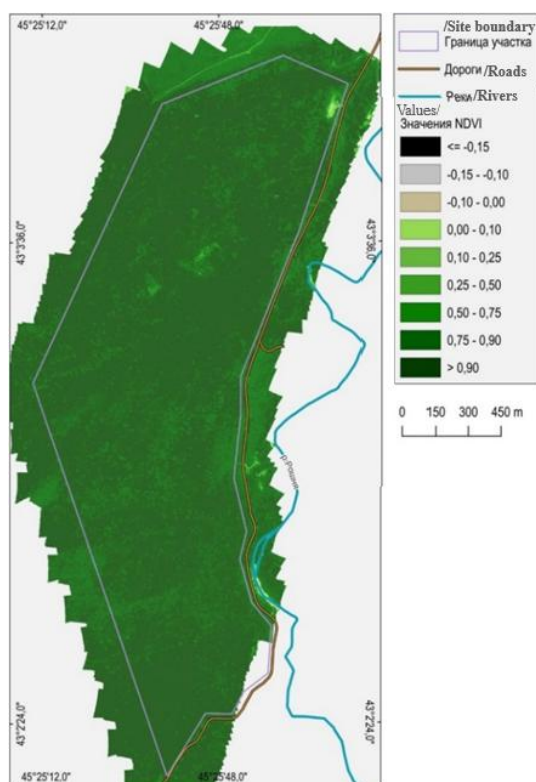


Рис. 2. Карта NDVI (май, 2023 г.) /
Fig. 2. NDVI Map (May, 2023)

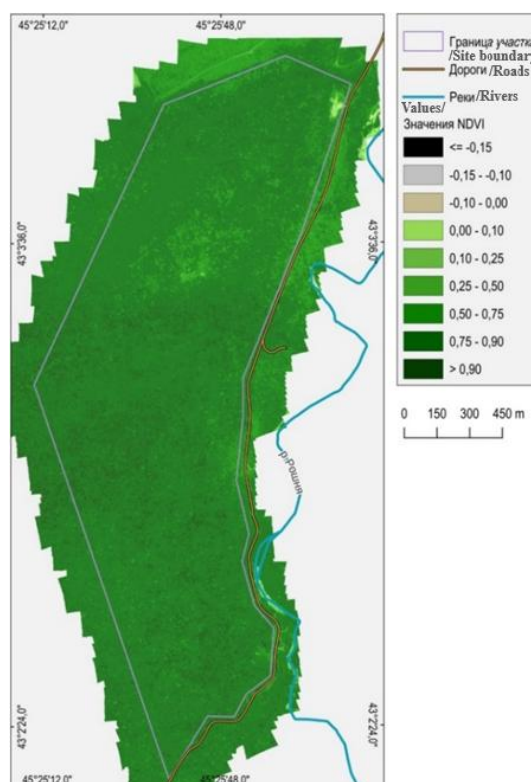
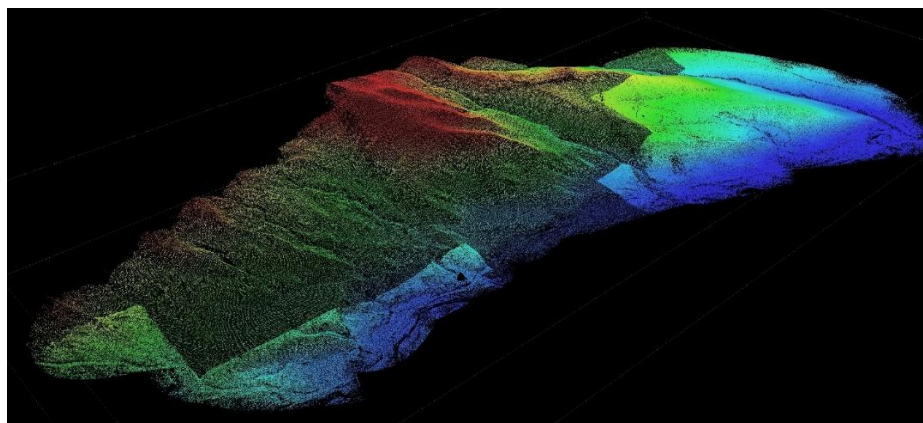


Рис. 3. Карта NDVI (октябрь, 2023 г.) /
Fig. 3. NDVI map (October, 2023)

На рисунке 2 представлена карта NDVI, построенная по данным мультиспектральной съемки, проведенной в мае 2023 года. Из рисунка видно, что на участке «Рошни-Чу» преобладают высокие значения индекса NDVI, характерные для физиологически здоровой зеленой лиственной растительности и укладывающиеся в диапазон 0,75–0,90. Значения получены в начале периода максимальной вегетации. На рисунке 3 представлена карта NDVI, построенная по данным мультиспектральной съемки, проведенной в октябре 2023 года на том же участке. Здесь прослеживается уменьшение значений индекса NDVI, что закономерно связано с осенним спадом вегетационной активности растений. Значения преимущественно находятся в диапазоне 0,25–0,50. Следует отметить, что на исследуемом участке растительность распределена с довольно однородной плотностью при отсутствии значительных по площади оголенных участков земли.

В результате совместного использования лазерного сканирования и аэрофотосъемки получен массив точек лазерных отражений (ТЛО), представленный в данной статье в виде трехмерной точечной модели (рис. 4).

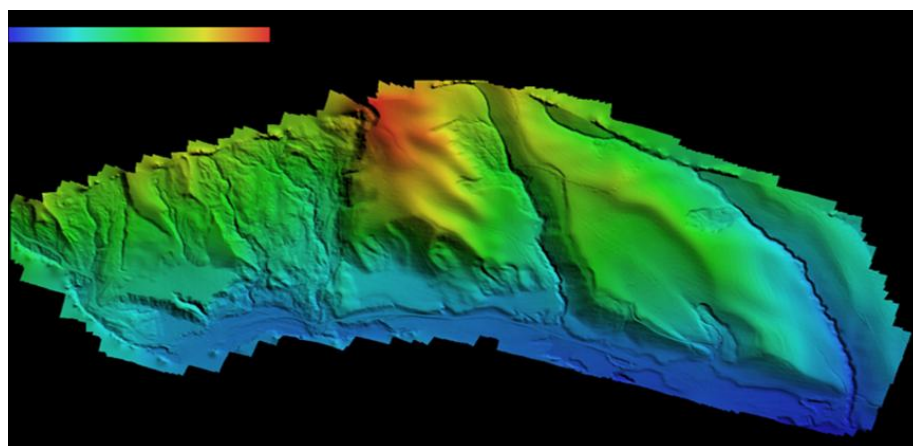
Дальнейшая обработка включала автоматическую классификацию ТЛО с использованием таких модулей программы LiDAR360 как Forestry и Terrain. Получены трехмерные цифровые модели рельефа. На рис. 5 представлена 3D модель рельефа, обработанная в модуле Forestry, на рис. 6 – в модуле Terrain.



*Рис. 4. Трехмерная точечная модель участка /
Fig. 4. Three-dimensional point model of the site*



*Рис. 5. Трехмерная модель участка с учетом лесной растительности /
Fig. 5. Three-dimensional model of the site taking into account forest vegetation*



*Рис. 6. Цифровая модель рельефа /
Fig. 6. Digital elevation model*

Произведены расчеты высоты деревьев и объема крон. Территория эталонного участка «Рошни-Чу» была разбита на шестиугольные ячейки размером 50х50 м, затем для каждой из ячеек считывались максимальное и среднее значения высоты деревьев и объема крон (рис. 7–10).

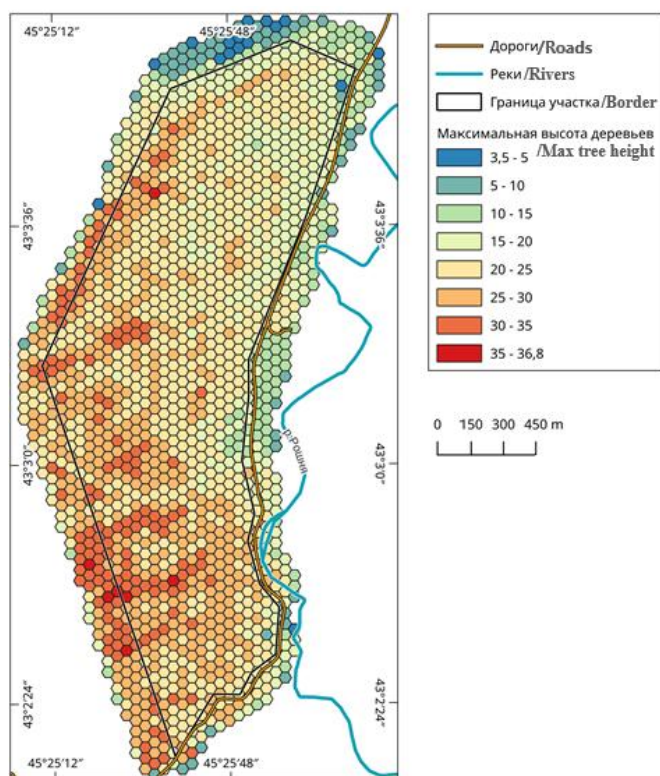


Рис. 7. Максимальные значения высоты деревьев /

Fig. 7. Maximum tree heights

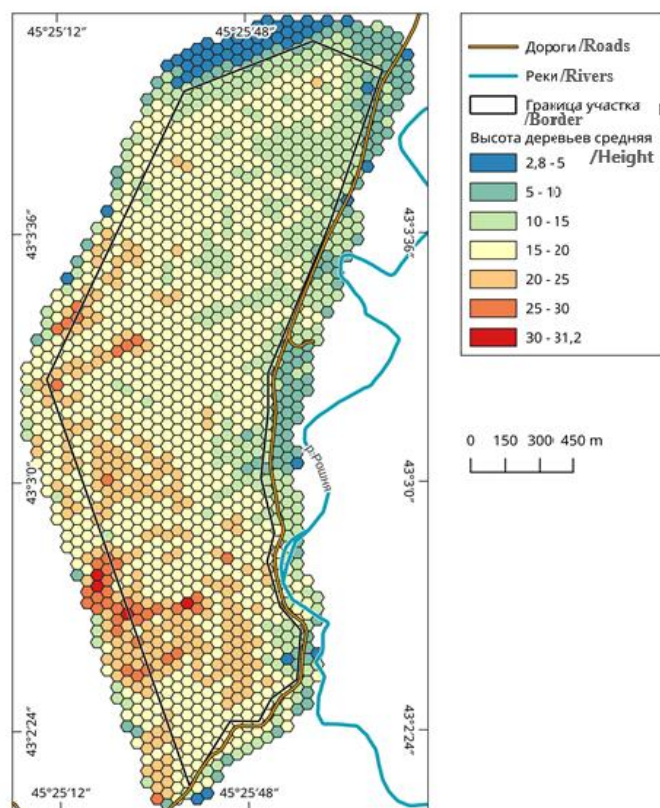
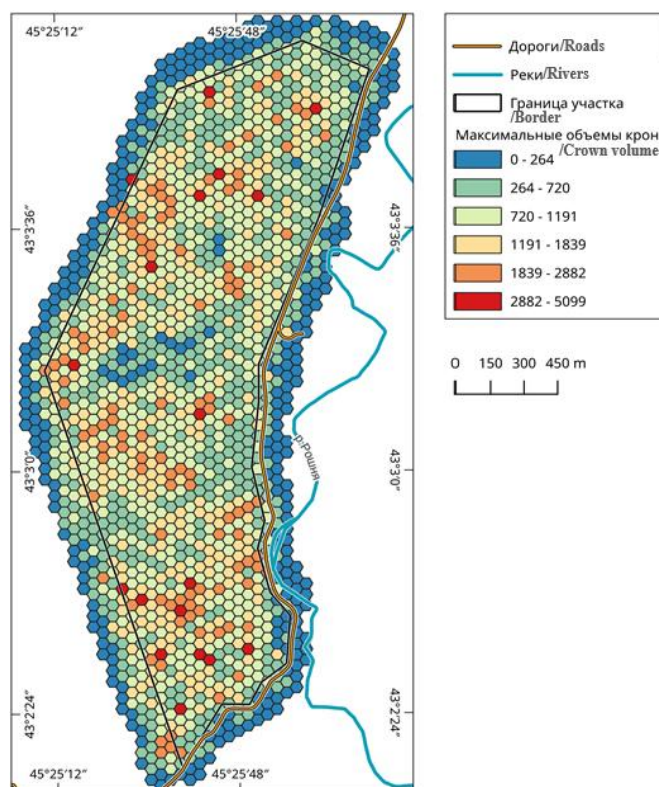
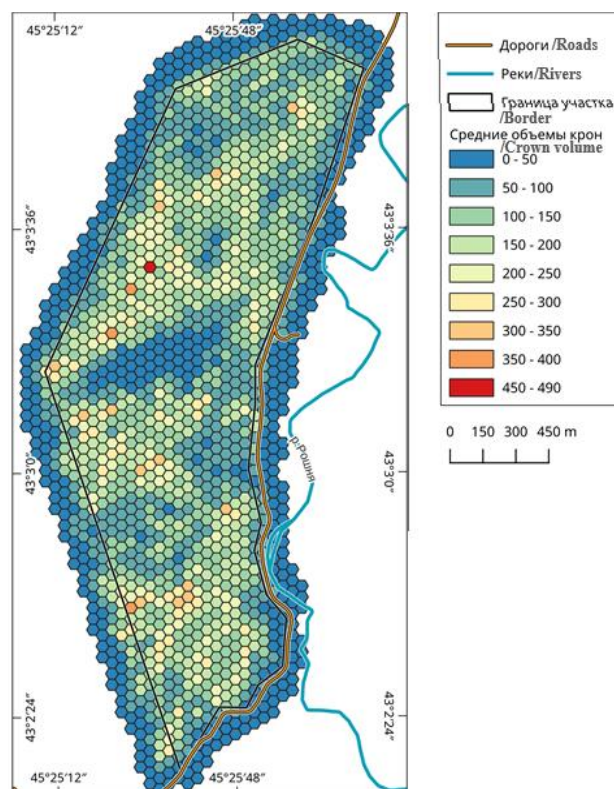


Рис. 8. Средние значения высоты деревьев /

Fig. 8 Average tree heights

*Рис. 9. Максимальные значения объема крон /**Fig. 9. Maximum volumes of crowns**Рис. 10. Средние значения объема крон /**Fig. 10. Average volumes of crowns*

На рис. 7 представлена картограмма максимальных высот деревьев, из которой видно, что на участке преобладают деревья с фактическими значениями высот 20–30 м. На рис. 8 представлена картограмма со средними значениями высот.

Выводы

По результатам мультиспектральных съемок с использованием БПЛА Геоскан 401, проведенных в начале активной вегетации деревьев и в период спада их вегетационной активности, построены карты NDVI, из которых видно, что спектральные значения на эталонном участке «Рошни-Чу» находятся в диапазонах 0,75–0,90 (в период активной вегетации) и 0,25–0,50 (в конце вегетации) и характерны для здорового лиственного древостоя.

По результатам ВЛС построены детальные модели рельефа, рассчитаны количественные показатели высоты деревьев и объема крон. Сделан вывод о репрезентативности полученных в ходе ВЛС данных о высоте деревьев и объеме крон. На участке «Рошни-Чу» преобладают деревья со значениями высот 20–30 м.

Литература

1. Гутовский Д.А., Каменев Д.С., Хрущёва Е.О. Обработка мультиспектральных данных аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата SOVZOND AIR-CON 3. // Материалы республиканского научно-практического семинара студентов и молодых ученых «ГИС-технологии в науках о Земле». / Отв. ред. Н.В. Жуковская. – 2019. – С. 114–117.
2. Домрачев А.А., Ануфриев М.А. Основы дистанционного зондирования Земли (на примере ENVI4.8): Практикум. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. – 154 с.
3. Друзь Р.А., Протасова А.В., Охунов Ш.Р., Кшановская А.В. Сравнительная оценка воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 130–141.
4. Измestьев А.Г. Фотограмметрия и дистанционные методы земли: учебное пособие. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – 119 с.
5. Керимов И.А., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. № 3(25). – С. 35–47.
6. Кочнева А.А., Мальченко Е.Л. Оценка качества цифровых моделей рельефа, построенных по данным воздушного лазерного сканирования. // Сборник научных трудов по материалам VI международной научной конференции «Научные тенденции: вопросы точных и технических наук». СПб.: ЦНК МНИФ «Общественная наука». – 2017. – С. 48–51.
7. Курков М.В., Клестов Д.А., Брусило В.А., Курков В.М., Киселева А.С. Опыт применения комплекса «Геоскан 401 лидар» в качестве беспилотной топографической системы воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки. // Геопрофи. – 2021. – № 6. – С. 17–23.
8. Ольчев А.В., Мухартова Ю.В., Керимов И.А., Гибадуллин Р.Р. 3D-гидродинамическое моделирование потоков CO₂ и CH₄ в приземном слое атмосферы (На примере лесного участка «Рошни-Чу»). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 2. – С. 408–418.
9. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
10. Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T., Hatfield J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. // Agronomy Journal. – 1984. – Vol. 76. No. 2. – pp. 300–306.
11. Bannari A.A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. A review of vegetation indices. // Remote Sensing Reviews. – 1995. – Vol. 13. No. 1. – pp. 95–120.

12. Dagg J., Lafleur P. An application of plot-scale NDVI in predicting carbon dioxide exchange and leaf area index in heterogeneous subarctic tundra. // *Canadian Journal of Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 36(S1). – pp. 111–123.
13. Filgueiras R., Mantovani E.C., Althoff D., da Cunha F.F., Fernandes Filho E.I. Crop NDVI monitoring based on Sentinel 1. // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11. – Art. No. 1441.
14. Hikosaka K., Tsujimoto K. Linking remote sensing parameters to CO₂ assimilation rates at a leaf scale. // *Journal of Plant Research*. – 2021. – Vol. 134. No. 4. – pp. 1–17.
15. Jiao W., Wang L., McCabe M.F. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. // *Remote Sensing of Environment*. – 2021. – Vol. 256. No. 8. – Art. No. 112313.
16. Kim M., Stoker J., Irwin J., Danielson J., Park S. Absolute accuracy assessment of lidar point cloud using amorphous objects, USA. // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14. No. 19. – Art. No. 4767.
17. Khan M.N., Tan Yu., Gul A.A., Abbas S., Wang J. Forest aboveground biomass estimation and inventory: evaluating remote sensing-based approaches. // *Forests*. – 2024. – Vol. 15. No. 6. – Art. No. 1055.
18. Rouse J.W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFCT. Type II Report. Greenbelt: Maryland, 1973. – 87 p.
19. Silleos N.G., Alexandridis T.K., Gitas I.Z., Perakis K. Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. // *Geocarto International*. – 2006. – Vol. 21. No. 4. – pp. 21–28.
20. Vidican R., Mălinaş A., Ranta O., Moldovan C., Marian O. et al. Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops: a critical review. // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 13. No. 12. – Art. No. 3040.

References

1. Gutovsky D.A., Kamenev D.S., Khrushcheva E.O. Processing of multispectral aerial photography data from an unmanned aerial vehicle SOVZOND AIR-CON 3. In: *Proceedings of the Republican scientific and practical seminar of students and young scientists “GIS technologies in Earth sciences”*. Ed. N.V. Zhukovskaya. 2019. pp. 114–117. (In Russ.)
2. Domrachev A.A., Anufriev M.A. Fundamentals of remote sensing of the Earth (using the example of ENVI4.8): Workshop. Yoshkar-Ola. VSUT. 2019. 154 p. (In Russ.)
3. Druz R.A., Protasova A.V., Okhunov Sh.R., Kshanovskaya A.V. Comparative assessment of airborne laser scanning and aerial photography from unmanned aerial vehicles. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023. No. 5. pp. 130–141. (In Russ.)
4. Izmestev A.G. Photogrammetry and remote sensing methods of the earth. Textbook. Kemerovo. KuzGTU. 2017. 119 p. (In Russ.)
5. Kerimov I.A., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carbon test site of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2021. Vol. 6. No. 3(25). pp. 35–47. (In Russ.)
6. Kochneva A.A., Malchenko E.L. Assessing the quality of digital terrain models constructed from airborne laser scanning data. In: *Proceedings VI International Scientific Conference “Scientific trends: issues of exact and technical sciences”*. Saint Petersburg. Central Scientific Research Institute of Scientific Research Institute “Social Science”. 2017. No. 6. pp. 17–23. (In Russ.)
7. Kurkov M.V., Klestov D.A., Brusilo V.A., Kurkov V.M., Kiseleva A.S. Experience in using the Geoscan 401 lidar complex as an unmanned topographic system for airborne laser scanning and aerial photography. *Geoprofi*. 2021. No. 6. pp. 17–23. (In Russ.)
8. Olchev A.V., Mukhartova Yu.V., Kerimov I.A., Gibadullin R.R. 3D-hydrodynamic modeling of CO₂ and CH₄ flows in the ground layer of the atmosphere (On the example of the

Roshni-Chu forest area). Sustainable Development of Mountain Territories. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 408–418. (In Russ.)

9. Ris W.G. Fundamentals of remote sensing. Moscow. Technosphere. 2006. 336 p. (In Russ.)

10. Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T., Hatfield J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. Agronomy Journal. 1984. Vol. 76. No. 2. pp. 300–306.

11. Bannari A.A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews. 1995. Vol. 13. No. 1. pp. 95–120.

12. Dagg J., Lafleur P. An application of plot-scale NDVI in predicting carbon dioxide exchange and leaf area index in heterogeneous subarctic tundra. Canadian Journal of Remote Sensing. 2010. Vol. 36(S1). pp. 111–123.

13. Filgueiras R., Mantovani E.C., Althoff D., da Cunha F.F., Fernandes Filho E.I. Crop NDVI monitoring based on Sentinel 1. Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Art. No. 1441.

14. Hikosaka K., Tsujimoto K. Linking remote sensing parameters to CO₂ assimilation rates at a leaf scale. Journal of Plant Research. 2021. Vol. 134. No. 4. pp. 1–17.

15. Jiao W., Wang L., McCabe M.F. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. Remote Sensing of Environment. 2021. Vol. 256. No. 8. Art. No. 112313.

16. Kim M., Stoker J., Irwin J., Danielson J., Park S. Absolute accuracy assessment of lidar point cloud using amorphous objects, USA. Remote Sensing. 2022. Vol. 14. No. 19. Art. No. 4767.

17. Khan M.N., Tan Yu., Gul A.A., Abbas S., Wang J. Forest aboveground biomass estimation and inventory: evaluating remote sensing-based approaches. Forests. 2024. Vol. 15. No. 6. Art. No. 1055.

18. Rouse J.W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFCT. Type II Report. Greenbelt: Maryland. 1973. 87 p.

19. Silleos N.G., Alexandridis T.K., Gitas I.Z., Perakis K. Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. Geocarto International. 2006. Vol. 21. No. 4. pp. 21–28.

20. Vidican R., Mălinaş A., Ranta O., Moldovan C., Marian O. et al. Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops: a critical review. Agronomy. 2023. Vol. 13. No. 12. Art. No. 3040.