

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-143-153

С. В. Вихренко<sup>1</sup>, Е. А. Лялюшко<sup>2</sup>, К. А. Нагорный<sup>3</sup>, А. М. Ярославцев<sup>4</sup>, В. А. Костык<sup>5</sup>,  
И. А. Лисина<sup>6</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЗАПАСА УГЛЕРОДА НА ПЛОЩАДКЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА

### АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается площадка Дальневосточного карбонового полигона (ДВКП), расположенная на берегу бух. Аякс в Японском море в зоне умеренно-муссонного климата. Основной особенностью ДВКП является приморское положение, что позволяет всесторонне изучать прибрежно-морские экосистемы. Площадка представляет собой 20 га морской акватории и 4 га наземной территории в кампусе Дальневосточного федерального университета (ДВФУ) во Владивостоке и является частью более крупного полигона в Приморском крае площадью 304,23 га. В работе представлены результаты исследования прибрежной зоны кампуса Дальневосточного федерального университета (ДВФУ) г. Владивосток. Описаны возможности применения дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) в рамках работ по оценке секвестрационного потенциала прибрежно-морских экосистем — их способности поглощать и удерживать углерод. Представлен опыт совмещения наземного лазерного сканирования и аэрофотосъемки мультиспектральной камерой, что значительно расширяет возможности оценки наземных объектов. По результатам съемки с беспилотного воздушного судна (БВС) и дополнения данных наземного лазерного сканирования местности территория площадки классифицирована по типам землепользования и видам объектов. Получены цифровые модели местности и рельефа, ортофотопланы, в т. ч. по вегетационному индексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Произведена количественная оценка деревьев, кустарников, травы, построек на основе объединенного облака точек и растровых файлов. Уточнены высоты деревьев относительно открытых баз данных. Произведены предварительные расчеты содержания наземной биомассы и запасов углерода. Создана детальная картографическая основа, которая будет использоваться для дальнейшей работы с пространственными данными карбонового полигона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** карбоновый полигон, запасы углерода, дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты, наземное лазерное сканирование

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, д. 10, пос. Аякс, Владивосток, Россия, 690090, e-mail: [vikhrenko.sv@dvfu.ru](mailto:vikhrenko.sv@dvfu.ru)

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, д. 10, пос. Аякс, Владивосток, Россия, 690090, e-mail: [lialiushko.ea@dvfu.ru](mailto:lialiushko.ea@dvfu.ru)

<sup>3</sup> Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, д. 10, пос. Аякс, Владивосток, Россия, 690090, e-mail: [nagornyi.ka@dvfu.ru](mailto:nagornyi.ka@dvfu.ru)

<sup>4</sup> Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, д. 10, пос. Аякс, Владивосток, Россия, 690090, e-mail: [yaroslavtsevam@gmail.com](mailto:yaroslavtsevam@gmail.com)

<sup>5</sup> Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, д. 10, пос. Аякс, Владивосток, Россия, 690090, e-mail: [kostyk.va@dvfu.ru](mailto:kostyk.va@dvfu.ru)

<sup>6</sup> Дальневосточный федеральный университет, о. Русский, д. 10, пос. Аякс, Владивосток, Россия, 690090, e-mail: [lisina.ia@dvfu.ru](mailto:lisina.ia@dvfu.ru)

**Snezhana V. Vikhrenko<sup>1</sup>, Evgeny A. Lialushko<sup>2</sup>, Konstantin A. Nagornyi<sup>3</sup>, Alex M. Yaroslavtsev<sup>4</sup>, Veronika A. Kostyk<sup>5</sup>, Irina A. Lisina<sup>6</sup>**

## **APPLICATION OF REMOTE METHODS FOR ESTIMATING CARBON RESERVES AT THE SITE OF THE FAR EASTERN CARBON LANDFILL**

### **ABSTRACT**

The paper considers the site of the Far Eastern Carbon Landfill (FECL), located on the shore of the Bukh River. Ajax is located in the Sea of Japan in the temperate monsoon climate zone. The main feature of the FECL is its seaside location, which allows for a comprehensive study of coastal and marine ecosystems. The site consists of 20 ha of marine water area and 4 ha of land area on the campus of the Far Eastern Federal University (FEFU) in Vladivostok and is part of a larger landfill in Primorsky Krai with an area of 304.23 ha. The paper presents the results of a study of the coastal zone of the Far Eastern Federal University (FEFU) Vladivostok campus. The possibilities of using remote sensing of the earth (remote sensing) in the framework of work to assess the sequestration potential of coastal marine ecosystems — their ability to absorb and retain carbon. The experience of combining ground-based laser scanning and aerial photography with a multispectral camera is presented, which significantly expands the possibilities of assessing ground objects. Based on the results of the survey from an unmanned aerial vehicle (UAV) and the addition of ground-based laser scanning data, the site's territory is classified by type of land use and types of facilities. Digital models of terrain and relief, orthophotoplans, including the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) vegetation index, have been obtained. A quantitative assessment of trees, shrubs, grass, and buildings was performed based on a combined point cloud and raster files. Tree heights relative to open databases have been clarified. Preliminary calculations of the content of aboveground biomass and carbon reserves have been performed. A detailed cartographic framework has been created, which will be used for further work with the spatial data of the carbon polygon.

**KEYWORDS:** carbon polygon, carbon stock, remote sensing, unmanned aerial vehicle, terrestrial laser scanning

### **ВВЕДЕНИЕ**

Карбоновые полигоны — это тестовые площадки, расположенные на территории уникальных экосистем, на которых разрабатывают и испытывают технологии измерения, мониторинга и контроля парниковых газов<sup>7</sup>. Как известно, последние десятилетия большое внимание ученых приковано к проблеме глобальных климатических изменений, где

<sup>1</sup> Far Eastern Federal University, 10, Ajax settlement, Russian Island, Vladivostok, Russia, 690090,  
*e-mail: vikhrenko.sv@dvfu.ru*

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University, 10, Ajax settlement, Russian Island, Vladivostok, Russia, 690090,  
*e-mail: lialushko.ea@dvfu.ru*

<sup>3</sup> Far Eastern Federal University, 10, Ajax settlement, Russian Island, Vladivostok, Russia, 690090,  
*e-mail: nagornyi.ka@dvfu.ru*

<sup>4</sup> Far Eastern Federal University, 10, Ajax settlement, Russian Island, Vladivostok, Russia, 690090,  
*e-mail: yaroslavtsev.am@gmail.com*

<sup>5</sup> Far Eastern Federal University, 10, Ajax settlement, Russian Island, Vladivostok, Russia, 690090,  
*e-mail: kostyk.va@dvfu.ru*

<sup>6</sup> Far Eastern Federal University, 10, Ajax settlement, Russian Island, Vladivostok, Russia, 690090,  
*e-mail: lisina.ia@dvfu.ru*

<sup>7</sup> Приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371. Электронный ресурс: <https://carbonreg.ru/pdf/Общие%20НПА/Приказ%20Минприроды%20РФ%20от%2027.05.2022%20№%20371.pdf> (дата обращения 28.12.2024)

карбоновые полигоны как проект имеют широкий охват расположения площадок, что позволяет на глобальном и региональном уровне изучать динамику климата<sup>1</sup>. Несколько десятилетий внимание научного сообщества приковано к проблеме климатических изменений, вызванных антропогенной эмиссией парниковых газов. В частности, для изучения эмиссии парниковых газов и проведения испытания технологий контроля углеродного баланса в представительных экосистемах создаются карбоновые полигоны.

Растительность играет ведущую роль в поддержании и сохранении баланса атмосферных парниковых газов. Этот факт отражен в рамочной конвенции ООН, в Киотском протоколе<sup>2,3</sup>. Российская Федерация взяла на себя обязательства контроля объемов выбросов парниковых газов, это отражено в федеральном законе от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»<sup>4</sup>.

Одной из площадок реализации большого проекта карбоновых полигонов является бух. Аякс в Японском море. Площадка относится к Дальневосточному карбоновому полигону. Земельный участок приморской террасы побережья занимает 4 га, морская акватория — 20 га. Кроме того, район исследования расположен на территории кампуса Дальневосточного федерального университета. Акватория бухты расположена на северо-востоке о. Русский, в зал. Петра Великого. Бухта находится между мысами Новосильского и Балка и доходит до южного берега пр. Босфор-Восточный (рис. 1).

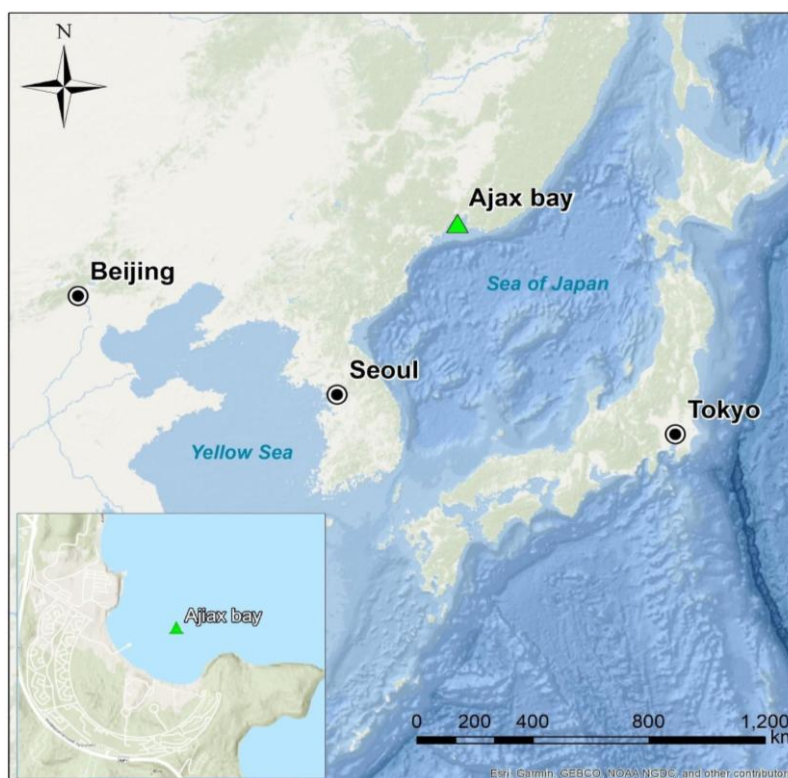


Рис. 1. Схема расположения исследуемого участка  
Fig. 1. Map of the location of the studied area

- <sup>1</sup> Дальневосточный Карбоновый полигон. Электронный ресурс: <https://carbon-polygons.ru/polygons/karbonovyyj-poligon-v-primorskom-krae?ysclid=m4xm41uudr391111969> (дата обращения 20.12.2024)
- <sup>2</sup> Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Official Russian translation. UN, 1997. P. 1–27
- <sup>3</sup> United Nations Framework Convention on Climate Change. Official Russian translation. UN, 1992. P. 1–30
- <sup>4</sup> Федеральный закон от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». Электронный ресурс: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47013> (дата обращения 25.12.2024)

Ближайшим крупным городом является Владивосток с населением 600 тыс. чел. Расстояние до Сеула — 740 км, до Токио — 1 000 км, до Пекина — 1 300 км.

Акватория является полукругом. Береговые линии оформлены осушками и рифами. В некоторых местах рифы выступают на 1 км от линии берега. Расстояние до дна в заводи уменьшается постепенно по направлению к берегу. В грунте преобладает галечник, на севере наблюдаются илистые и песчаные грунты. Бухта удобно расположена для проведения стационарных гидрологических и атмосферных измерений.

На суше распространена в основном луговая прибрежная растительность. Почвы на участке луговые, дерновые с маломощным гумусовым горизонтом на морских отложениях. Наблюдается легкосуглинистый гранулометрический состав, слабокислая реакция среды и содержание гумуса до 4 % [Рогачев и др., 2022]. В лесной зоне находятся: дуб монгольский (*Quercus mongolica*), айлант высочайший (*Ailanthus Altissima*), ива козья (*Salix caprea* L.), клен уссурийский (*Acer barbinerve*).

Дистанционные методы зондирования широко распространены в научной практике карбоновых полигонов России. Так, Институтом океанологии Российской академии наук создана цифровая модель карбонового полигона в Краснодарском крае на берегу Черного моря с использованием аэрофото- и батиметрической съемки [Lian, 2022; Xiaofan et al., 2023]. По результатам обработки было получено: цифровая модель рельефа (ЦМР), карта высот растительности, схема рельефа дна (точность по вертикали составляет от 0,2 м на открытой местности, 0,4 м — на участках с фрагментарным растительным покровом). Полученные модели в дальнейшем могут быть использованы для решения широкого круга задач исследований в области цикла углерода: геолого-геоморфологических, биогеографических и геоэкологических, моделирования переноса парниковых газов в атмосферном воздухе, процессов их поглощения, трансформации, выбросов в морской среде.

В статье [Куклев, 2022] описано создание ЦМР и ортофотоплана с помощью аэрофотосъемки и лазерного сканирования. На горную территорию было получено: цифровая модель рельефа (ЦМР), ортофотоплан, гипсометрическая карта, карта крутизны склонов, карта экспозиции склонов и карта террас. Ортофотоплан позволил выявить активное лесовозобновление, а ЦМР в сочетании с метеорологическими наблюдениями может служить для моделирования микроклиматических условий.

В работе [Гафуров и др., 2023] описывается создание цифровой модели местности (ЦММ) для оценки наземной биомассы. С помощью БВС была проведена мультиспектральная съемка для расчетов вегетационных индексов (Chlorophyll Index (CIg), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Leaf Index (GLI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)), которые используются для оценки биомассы и запасов углерода. Проведена съемка лидаром, в результате которой были получены: ЦМР и карта высот деревьев.

Авторами статьи [Бекмурзаева и др., 2024] рассчитана биомасса отдельных деревьев различных пород в сложных насаждениях путем объединения мультиспектральных данных и данных лазерного сканирования. Результаты показывают, что при объединении мультиспектральной съемки и лазерной съемки можно идентифицировать деревья и рассчитывать их биомассу по отдельности. Похожие результаты представлены в статье [Xiaofan et al., 2023], где описывается классификация деревьев с помощью фотограмметрии и воздушного лазерного сканирования (ВЛС) на базе БВС. Авторы предлагают классифицировать деревья при помощи объединения мультиспектральных изображений ортофотопланов и облака точек ВЛС для увеличения точности классифицируемых объектов. В результате проделанной работы авторами предложена новая модель, которая интегрирует данные аэрофотосъемки с ВЛС и создает структуру, которая точнее классифицирует виды деревьев. Для оценки больших территорий удобнее использовать спутниковые данные [Winsemsius et al., 2024], которые поддаются обработке схожими алгоритмами.



Направление дистанционных методов построения цифровых моделей местности и расчетов на их основе является перспективным и показывающим высокую эффективность в сравнении с ручными способами.

Целью работы является тестирование эффективности комбинированного подхода наземной и воздушной съемки местности для мониторинга углеродного баланса на площадке Дальневосточного карбонового полигона. Для осуществления цели необходимо произвести съемку и сравнение результатов съемки в холодный и теплый период года, использовать возможности мультиспектральных и лидарных технологий в рамках прибрежно-морских экосистем и произвести предварительную оценку запасов биомассы и углерода на исследуемой площадке.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках развития карбонового полигона кампуса ДВФУ были проведены комплексные геодезические работы для обеспечения картографической основы карбонового полигона и сбора первичных данных для дальнейшего анализа.

Выполнена аэрофотосъемка с использованием мультироторного (БВС) DJI Mavic 3 Enterprise (DJI M3E) с модулем глобальных навигационных спутниковых сетей (ГНСС). Съемка производилась на скорости 15 м/с с высоты 100 м в режиме следования рельефу в реальном времени, с продольным и поперечным перекрытием снимков 80 и 60 % соответственно. Характеристика местности на момент съемки является репрезентативной для зимнего периода.

Произведено наземное лазерное сканирование (НЛС) с помощью мобильного лазерного сканера, работающего по технологии SLAM (Simulation Localization and Mapping) LiGrip H300, смонтированного на специализированный рюкзак с ГНСС-модулем. Оператор двигался плавно со средней скоростью около 4 км/ч.

Выполнена аэрофотосъемка на БВС DJI Mavic 3 Multispectral (DJI M3M) с высоты 60 м в режиме следования рельефу. Другие параметры полета остались без изменений. Характеристика местности на момент съемки является репрезентативной для летнего периода (рис. 2).



Рис. 2. Приборы, используемые в работе (слева — БВС, справа — наземный лазерный сканер с рюкзаком)  
 Fig. 2. The devices used in the work (on the left — the UAV, on the right — the ground laser scanner with a backpack)

Координаты центров фотографирования рассчитаны в пространственной системе координат World Geodetic System (WGS) 1984 и трансформированы в плоские прямоугольные координаты The Universal Transverse Mercator (UTM) зона 52, в то время как траектория движения лазерного сканера сразу получена в UTM зона 52. Координаты получены по секундным ГНСС данным в относительном режиме позиционирования «Post Processing Kinematic». За опорный пункт принята постоянно действующая ГНСС-станция VLDV, установленная на крыше лабораторного корпуса ДВФУ примерно в 800 м от зоны исследований. Станция оснащена антенной Topcon CR-G3 и мультисистемным приемником PrinCe P5U.

Для обработки результатов аэрофотосъемки использовался программный пакет Agisoft Metashape Professional 2.1. Облако точек было построено по фотографиям без сжатия и с мягкой фильтрацией карты глубин. Для построения ЦММ и ЦМР использовались исходное облако точек и классифицированные точки поверхности земли соответственно (рис. 3).

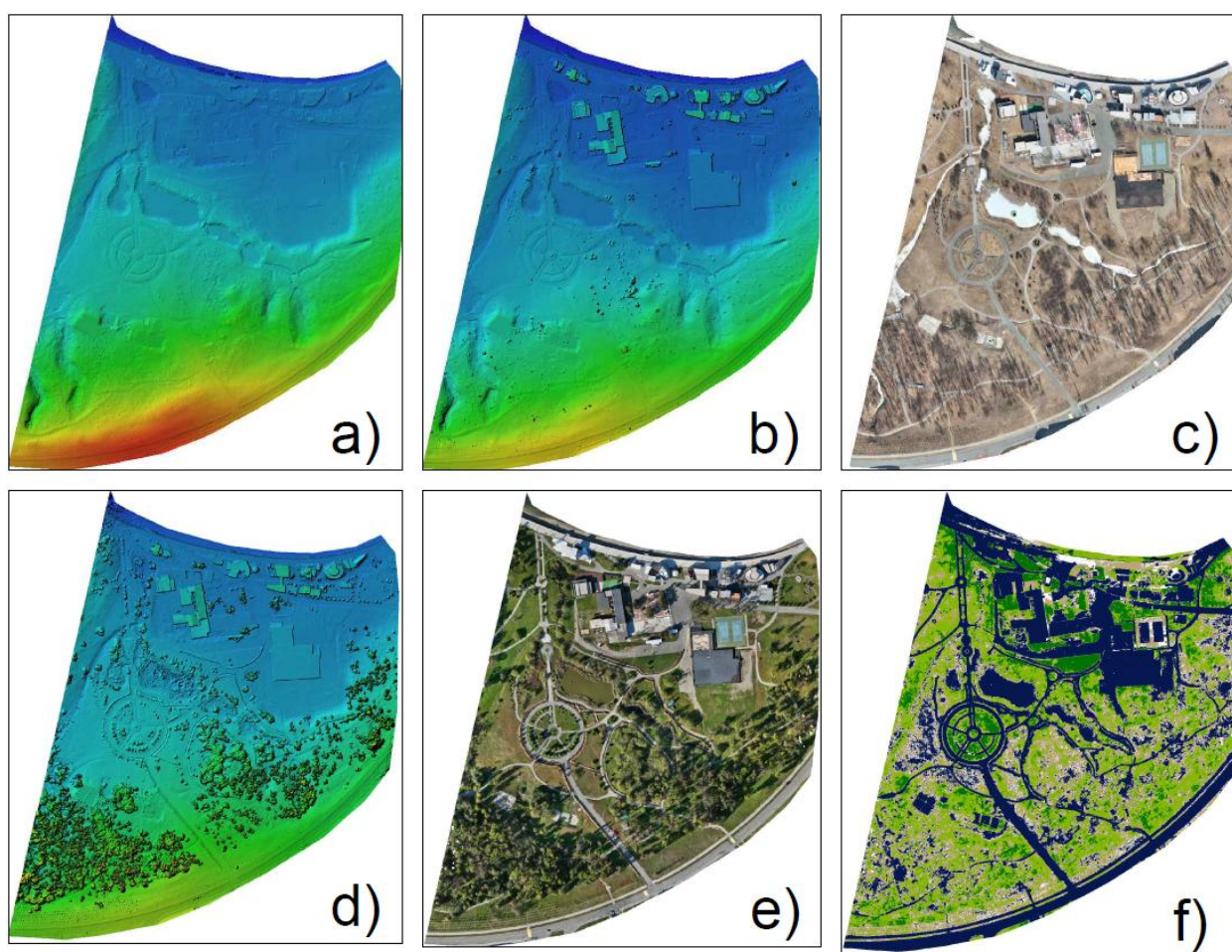


Рис. 3. Результаты обработки АФС. Рисунки за 7 марта 2024 г.: а) ЦМР, б) ЦММ, в) Ортофотоплан. Рисунки за 4 октября 2024 г.: д) ЦММ, е) Ортофотоплан в RGB, ф) ортофотоплан по индексу NDVI  
 Fig. 3. API processing results. Figures for March 7, 2024: a) DEM, b) MM, c) Orthophotoplane. Drawings for October 4, 2024: d) MM, e) Orthophotoplane in RGB, f) Orthophotoplane according to NDVI index

Разрешение ЦММ и ЦМР составили 8,8 см/пикс. На основе ЦММ построен орто-фотоплан местности на зимний сезон с минимальным объемом растительности с разрешением 4,0 см/пикс (рис. 3с). ЦММ и ортофотоплан по мультиспектральным данным за 4.10.2024 были получены с пространственным разрешением 3,8 см/пикс и 1,9 см/пикс и содержат стандартные RGB каналы, а также:

- зеленый, G (560 нм ± 16 нм),
- красный, R (650 нм ± 16 нм),
- красный край, RE (730 нм ± 16 нм),
- ближний инфракрасный, NIR (860 нм ± 26 нм).

Данные НЛС в ходе постобработки были геопривязаны, колоризованы и объединены в единое облако точек в программном обеспечении GreenValley LiFuser BP. Классификация облака точек и дальнейшая обработка выполнялась в ПО LIDAR 360. Классифицированное облако было отфильтровано от шума, нормализовано и фрагментировано на отдельные деревья для дальнейшей таксации.

В общей сложности на территорию в 18 га за три съемки 2024 г. получено более 1 300 снимков, более 1,5 млрд точек с плотностью 10 точек на 1 см<sup>3</sup>. В дополнение к использованным инструментам обработки применены географические информационные системы (ГИС) ArcGIS и QGIS, в которых производилась работа с полученными растровыми данными с помощью калькулятора раstra, классификации, конвертации, извлечения, зональной статистики. Рассчитан NDVI для уточнения при расчете растительности и биомассы.

Определение надземной биомассы производилось по результатам полученных растровых изображений классификации растений, таксационной ведомости, справочных данных. Величина надземной биомассы рассчитана по формуле (1):

$$b \times (dbh \times dbh) \times h \quad (1),$$

где  $dbh$  — это диаметр ствола на высоте груди,  
 $b$  — это коэффициент для породы дерева,  
 $h$  — высота дерева [Vazirabad et al., 2011].

На основе полученных данных создана схема с усредненными участками биомассы. Запас углерода определен по формуле (2):

$$V_{ij} \times KP_{ij} \quad (2),$$

где  $V_{ij}$  — объемный запас стволовой древесины насаждений группы возраста  $i$  преобладающей породы  $j$ ,  
 $KP_{ij}$  — конверсионный коэффициент для расчета запаса углерода в биомассе древостоев группы  $i$  преобладающей породы  $j$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проделанной работы получена классификация местности по типу объектов (табл. 1). Разделение произведено на классы по видам растительности, высоте, антропогенной нарушенности.

Как видно из таблицы, наибольшую площадь занимает луговая растительность, представленная травой (47 % территории). В меньшей степени представлен класс низких деревьев, который занимает 1 % площади территории.



Табл. 1. Результаты проведения классификации местности  
Table 1. The results of the classification of the area

Тип объектов	Количество, шт.	Средняя высота, м	Занимаемая площадь, м <sup>2</sup>	Процент от всей площади, %
Деревья высокие	217	12	73 529,3	40,9
Деревья низкие	27	3	1 844,6	1
Кустарники	69	1,2	2 534,2	1,4
Трава	–	0,15	84 621,7	47
Здания	13	2,5	2 123,9	1,2
Остальное	–	–	15 346,6	8,5

Кроме традиционных методов оценки был использован метод вычитания цифровой модели рельефа из цифровой модели местности. В результате получена поверхность, содержащая информацию в локальной высоте каждого объекта на рельефе. Полученный растр можно использовать как дополнительный инструмент в определении высот растительности, классификации, оценки площади и объемов. Подобным образом получена разница между летней ЦММ и зимней ЦМР (рис. 4).

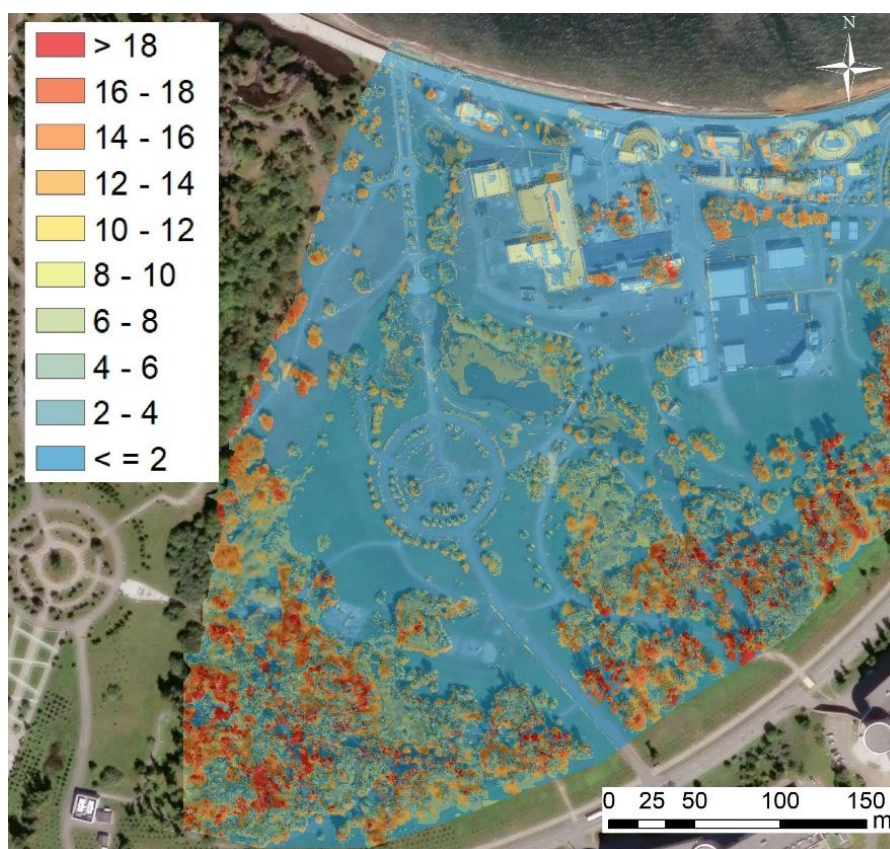


Рис. 4. Высоты надземных объектов (м) на основе данных ЦМР и ЦММ  
Fig. 4. Heights of aboveground objects (m) based on DEM and DSM data



По результатам, представленным на рис. 4, средняя высота деревьев равна 12–14 м, максимальные значения высот достигают 20 м, что подтверждается данными с наземного сканера. Большая часть полигона находится в диапазоне 10–30 см, что сопоставимо с высотой травянистого покрова летом по данным наземной съемки. Метод вычитания ЦМР из ЦММ имеет возможность быть применимым для оценки средних параметров на объект. Для получения точных оценок следует использовать данные наземного сканирования.

По результатам обработки данных составлены обобщенные схемы на основе классификации местности по содержанию биомассы и запасов углерода (рис. 5).

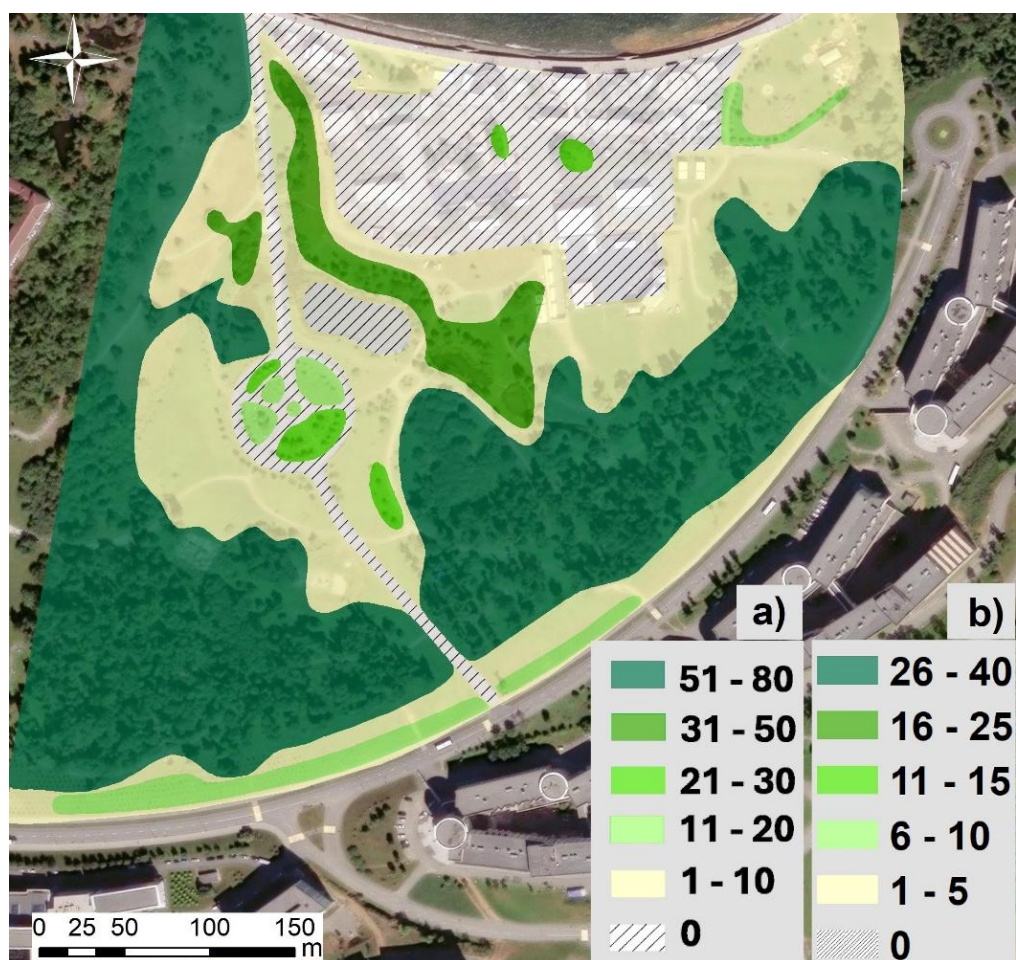


Рис. 5. Запасы: а) углерода и б) надземной биомассы (т/га) по классам растений на территории дальневосточного карбонового полигона  
 Fig. 5. Reserves: a) carbon and b) aboveground biomass (t/ha) by plant classes on the territory of the Far Eastern carbon landfill

Из рис. 5 видно, что запасы биомассы (51–80 т/га) и углерода (26–40 т/га) в большей степени сосредоточены в лесной зоне. Бухта расположена на севере исследуемого участка, следовательно, является закономерным то, что содержание биомассы и углерода будет уменьшаться, несмотря на наличие большого числа зданий. Луговая растительность составляет значительную часть площадки, но имеет наименьшие показатели по содержанию биомассы (1–10 т/га) и углерода (1–5 т/га). Средние показатели содержания биомассы (11–50 т/га) и углерода (6–25 т/га) относятся к классам высокой травы, кустарников и низких деревьев, которые занимают меньшую часть всей площади.

## ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы протестирован комбинированный подход, включающий наземное лазерное сканирование и воздушную съемку с беспилотного воздушного судна. Он показал высокую эффективность для мониторинга углеродного баланса на площадке Дальневосточного карбонового полигона. Проведенная съемка в разные сезоны — холодный и теплый периоды года — позволяет учитывать сезонные изменения в структуре растительности и повышает достоверность оценки биомассы и углеродных запасов. Использование мультиспектральных данных, включая вегетационный индекс NDVI совместно с лидарными технологиями, обеспечило точное классифицирование типов землепользования и видов объектов, что необходимо для оценки углеродного секвестра. Предварительная количественная оценка биомассы деревьев, кустарников и травянистой растительности, а также запасов углерода на площадке подтверждает возможность применения данного метода для регулярного мониторинга углеродного баланса прибрежно-морских экосистем. Полученные цифровые модели рельефа и ортофотопланы создают надежную картографическую основу для дальнейших исследований и моделирования углеродных потоков, что важно для адаптации экосистем к изменению климата.

Разработанный комплексный метод мониторинга демонстрирует большой потенциал для научных и практических применений в области углеродного менеджмента и экологического мониторинга. Авторы планируют продолжить дистанционный мониторинг ДВКП в зимний, весенний, летний и осенний сезоны для изучения изменения растительного покрова и других показателей, помогающих оценивать климатические показатели.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2025-0004 «Оценка секвестрационного потенциала прибрежно-морских экосистем».

## ACKNOWLEDGEMENTS

The Ministry of Science supported funding the work and Higher Education of the Russian Federation, project No. FZNS-2025-0004 “Assessment of Sequestration Potential of Coastal Marine Ecosystems”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бекмурзаева Р. Х., Баранов И. С., Скрыпичина Т. Н., Братков В. В., Булаева Н. М.* Особенности микрорельефа карбонового полигона регенеративного животноводства ЧГУ им. А. А. Кадырова. Мониторинг. Наука и технологии, 2024. № 3. С. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2024.61.001>.

*Гафуров А. М., Усманов Б. М., Хомяков П. В.* Мониторинг полигона «Карбон-Поволжье» по данным дистанционного зондирования. Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем. Материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Казань, 2023. С. 75–80.

*Куклев С. Б., Кременецкий В. В., Крыленко В. В., Руднев В. И.* Цифровая модель «Карбонового полигона в Краснодарском крае» на базе ЮО ИО РАН (г. Геленджик). Экология гидросферы, 2022. № 1. С. 18–28. Электронный ресурс: <https://hydrosphere-ecology.ru/281> (дата обращения 21.12.2024). DOI: 10.33624/2587-9367-2022-1(7)-18-28.

*Рогачев В. Е., Агапитов Е. М., Фомин В. В., Суханов М. П., Рогачев Л. Е.* Оценка запаса углерода в древостоях карбонового полигона Свердловской области на участке «Урал-Карбон» (Северка). Леса России и хозяйство в них, 2022. № 4. С. 4–9. DOI: 10.51318/FRET.2022.88.53.001.

*Lian X., Zhang H. Xiao W., Lei Y., Ge L., Qin K., He Y., Dong Q., Li L., Han Y., Fan H., Li Yu, Shi L., Chang J.* Biomass Calculations of Individual Trees Based on Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery and Laser Scanning Combined with Terrestrial Laser Scanning in Complex Stands. *Remote Sensing*, 2022. V. 14. No. 19. 4715. 18 p. DOI: 10.3390/rs14194715.

*Vazirabad Y. F., Kararlioglu M. O.* Lidar for Biomass Estimation. *Biomass — Detection, Production and Usage*. UK, 2011. P. 1–30. DOI: 10.5772/16919.

*Winsemius S., Babcock Ch., Kane V. R., Bormann K. J., Safford H. D., Jin Yu.* Improved Aboveground Biomass Estimation and Regional Assessment with Aerial Lidar in California's Subalpine Forests. *Carbon Balance and Management*, 2024. No. 19. Art. 41. 22 p. DOI: 10.1186/s13021-024-00286-w.

*Xiaofan L., Lanying W., Haiyan G., Ke C., Yufu Z., Yongtao Y.* Urban Tree Species Classification Using UAV-Based Multispectral Images and LiDAR Point Clouds. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2023. V. 8. Art. 5. DOI: 10.1007/s41651-023-00167-9.

## REFERENCES

*Bekmurzayeva R. H., Baranov I. S., Skrypitsyna T. N., Bratkov V. V., Bulaeva N. M.* Features of the Microrelief of the Carbon Landfill of Regenerative Animal Husbandry of the Kadyrov Chechen State University. *Monitoring. Science and Technologies*, 2024. No. 3. P. 6–13 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2024.61.001>.

*Gafurov A. M., Usmanov B. M., Khomyakov P. V.* Monitoring of the Carbon-Volga Landfill Using Remote Sensing Data. *Current Issues in Geodesy and Geoinformation Systems. Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*. Kazan, 2023. P. 75–80 (in Russian).

*Kuklev S. B., Kremenetsky V. V., Krylenko V. V., Rudnev V. I.* Digital Model of the “Carbon Test Site in Krasnodar Region” on the Base of SBIO of RAS (Gelendzhik). *Hydrosphere Ecology*, 2022. No. 1. P. 18–28. Web resource: <https://hydrosphere-ecology.ru/281> (accessed 21.12.2024) (in Russian). DOI: 10.33624/2587-9367-2022-1(7)-18-28.

*Lian X., Zhang H. Xiao W., Lei Y., Ge L., Qin K., He Y., Dong Q., Li L., Han Y., Fan H., Li Yu, Shi L., Chang J.* Biomass Calculations of Individual Trees Based on Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery and Laser Scanning Combined with Terrestrial Laser Scanning in Complex Stands. *Remote Sensing*, 2022. V. 14. No. 19. 4715. 18 p. DOI: 10.3390/rs14194715.

*Rogachev V. E., Agapitov E. M., Fomin V. V., Sukhanov M. P., Rogachev L. E.* Carbon Reserve Assessment at the Ural Carbon Landfill. *Forests of Russia and economy in them*, 2022. No. 4. P. 4–9 (in Russian). DOI: 10.51318/FRET.2022.88.53.001.

*Vazirabad Y. F., Kararlioglu M. O.* Lidar for Biomass Estimation. *Biomass — Detection, Production and Usage*. UK, 2011. P. 1–30. DOI: 10.5772/16919.

*Winsemius S., Babcock Ch., Kane V. R., Bormann K. J., Safford H. D., Jin Yu.* Improved Aboveground Biomass Estimation and Regional Assessment with Aerial Lidar in California's Subalpine Forests. *Carbon Balance and Management*, 2024. No. 19. Art. 41. 22 p. DOI: 10.1186/s13021-024-00286-w.

*Xiaofan L., Lanying W., Haiyan G., Ke C., Yufu Z., Yongtao Y.* Urban Tree Species Classification Using UAV-Based Multispectral Images and LiDAR Point Clouds. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2023. V. 8. Art. 5. DOI: 10.1007/s41651-023-00167-9.