



УДК 504.064.36: 504.064.37

DOI: [10.46698/VNC.2022.58.33.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.33.001)

Оригинальная статья

Использование мультиспектральной съемки при наблюдении за состоянием лесного покрова Земли

И. А. Керимов ^{1, 2}, Т. Б. Эзирбаев ¹

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад.
М. Д. Миллионщикова, Россия, 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им.
Х. А. Исаева, д. 100;

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, Большая
Грузинская ул., 10, e-mail: kerimov@ifz.ru

Статья поступила: 28.07.2022, доработана: 21.08.2022, одобрена в печать: 05.09.2022

Резюме: Актуальность работы. Мировое сообщество ученых связывает рост средней температуры на Земле и глобального потепления климата с ростом концентрации углекислого CO₂, метана CH₄ и других парниковых газов в атмосфере. Наибольшее влияние среди парниковых газов играет CO₂. Россия как страна, ратифицировавшая Киотский протокол призвана контролировать уровень эмиссии углекислого газа в атмосферу. Общеизвестно что концентрация CO₂ в атмосфере растет не только за счет сжигания ископаемого топлива. Ощутимый вклад в процесс накопления вносит нарушение поглощения углерода зеленой растительностью, в частности лесами. **Цель работы.** Аналитический обзор наиболее известных отечественных и зарубежных технологий, методик и методов мультиспектральной съемки по материалам из открытых источников и публикаций зарубежных и отечественных исследователей с целью обоснования применимости и актуальности данного метода при исследовании и мониторинге углеродного баланса на территории Российской Федерации и в частности карбонового полигона Чеченской Республики. **Методы исследования.** Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных различными датчиками (например, лидарами, мультиспектральными, гиперспектральными датчиками и/или камерами), дает возможность довольно детально и продуктивно проводить мониторинг и даже «увидеть» отдельные деревья в лесу. Отдельные кроны деревьев служат «блоками» для создания точной целостной картины состояния леса, поскольку эти знания позволяют пользователям анализировать, моделировать и управлять состоянием леса на уровне отдельных деревьев путем сопоставления нескольких источников данных (например, данных дистанционного зондирования и полевых исследований). **Результаты исследования.** В статье приводится обзор зарубежных и отечественных источников о применении мультиспектральных датчиков и камер, лидарных камер, подвешенных к БПЛА для мониторинга состояния лесных массивов, с целью изучения углеродного баланса на предгорных и горных лесистых территориях. Обоснована применимость и актуальность данного метода при исследовании и мониторинге поглощения углекислого газа территориями покрытыми лесами.

Ключевые слова: Мультиспектральная съемка, таксация, карбон, углекислый газ, поглощение, углеродный баланс.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания № ФЗНУ-2021-0012 «Комплексная интерпретация геофизических и геоэкологических данных для изучения баланса парниковых газов».

Для цитирования: Керимов И. А., Эзирбаев Т. Б. Использование мультиспектральной съемки при наблюдении за состоянием лесного покрова Земли. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 182-194. DOI: [10.46698/VNC.2022.58.33.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.33.001).

DOI: [10.46698/VNC.2022.58.33.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.33.001)

Original paper

Experiences in the application of multispectral imagery in land cover observation

I. A. Kerimov^{1, 2}, T. B. Ezirbaev²

¹Grozny State Oil Technical University named after Academician M. D. Millionshchikov, 100Kh. A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation;

²Institute of Physics of the Earth RAS, 10/1 B. Gruzinskaya Str., Moscow 123995, Russian Federation, e-mail: kerimov@ifz.ru

Received: 28.07.2022, revised: 21.08.2022, accepted: 05.09.2022

Abstract: Relevance. The global scientific community links the rise in the Earth's average temperature and global climate warming to the rising concentrations of CO₂, CH₄ methane and other greenhouse gases in the atmosphere. CO₂ plays the greatest influence among greenhouse gases. Russia as a country that ratified the Kyoto Protocol is required to control the level of atmospheric carbon dioxide emissions. It is widely known that the concentration of CO₂ in the atmosphere is increasing not only through the burning of fossil fuels. A tangible contribution to the accumulation process is made by disturbances in carbon sequestration by green vegetation, in particular forests. **Aim.** Analytical review of the most known domestic and foreign technologies, methods and techniques of multispectral imagery based on open sources and publications of foreign and domestic researchers in order to justify the applicability and relevance of this method to study and monitor the hydrocarbon balance in the territory of the Russian Federation and in particular the carbonic range of the Chechen Republic. **Methods.** The use of unmanned aerial vehicles (UAV) equipped with various sensors (e. g. lidars, multispectral, hyperspectral sensors and/or cameras) enables quite detailed and productive monitoring and even "seeing" individual trees in the forest. Individual tree crowns serve as 'building blocks' to create an accurate holistic picture of forest health, as this knowledge allows users to analyses, model and manage forest health at the individual tree level by correlating several data sources (e. g. remote sensing and field data). **Results.** The paper gives a review of foreign and domestic sources on the application of multispectral sensors and cameras, lidar suspended from UAVs to monitor the state of forests, to study the hydrocarbon balance in foothills and mountainous forested areas. The applicability and relevance of this method in the study and monitoring of carbon dioxide absorption in areas covered by forests is justified.

Keywords: Multispectral survey, inventory, Carbon dioxide, absorption, hydrocarbon balance.

Acknowledgements: *The work was performed within the state task № FZNU-2021-0012 «Comprehensive interpretation of geophysical and geoecological data for studying the balance of greenhouse gases».*

For citation: Kerimov I. A., Ezirbaev T. B. Experiences in the application of multispectral imagery in land cover observation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 182-194. DOI: 10.46698/VNC.2022.58.33.001.

Введение

По данным ученых Института космических исследований (ИКИ) РАН экосистемы российских лесов за год поглощают почти 300 млн тонн углерода. Ранее официальные цифры были на уровне 160-180 млн тонн в год (https://mostpp.ru/guilds_news/vozmozhnosti-distantionnogo-zondirovaniya-zemli/).

Такая разница в результатах исследований зависит от интерпретации данных, для которой нужна актуальная информация о фактическом состоянии лесов. Офи-

циальная оценка основывается на документах государственного лесного реестра 25-тилетней давности.

Исходя из вышесказанного, чтобы получить приближенные к истине данные о стоке парниковых газов в России необходимо организовать постоянный мониторинг территорий с использованием беспилотных летательных аппаратов. Такой подход в комплексе с другими данными позволит получать точные и актуальные данные о реальном положении дел в реперных точках и на их основе проводить дешифровку снимков, полученных со спутника [Филипчук и др., 2020; Эльсункаева, Эзирбаев, 2020].

Для реализации рекомендаций Киотского протокола РКИК ООН (https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml) по ограничению выбросов в атмосферу «парниковых» газов необходима технология установления наиболее значимых источников – стоков (поглощения) CO_2 , CH_4 и др. газов. Такая технология может быть основана на использовании мультиспектральных съемок с БПЛА в мониторинговом режиме и наземного инструментального определения потоков этих газов в разных ландшафтно-климатических зонах и для различных видов растительности. Учитывая ослабевающую адсорбцию CO_2 тропическими лесами, особое внимание следует уделить бореальным и смешанным лесам Евразии, которые должны стать основным фактором смягчения последствий изменения климата [Лялько и др., 2005; Яицкая, Бригида, 2022]

Мультиспектральная съемка использует данные на определенных длинах волн в электромагнитном спектре, включая невидимый спектр. Поскольку разные типы земного покрова отражаются в разной степени с разной частотой, этот метод особенно полезен для сбора данных об изменении лесного покрова земной поверхности. Изменение лесного покрова может влиять на глобальное потепление, поэтому мониторинг изменений является важной мерой предосторожности. Операторы могут обрабатывать мультиспектральные данные и создавать ортофотопланы и трехмерные модели с высокой точностью привязки к местности без необходимости закладывать и координировать наземные опорные точки.

Мультиспектральная визуализация изначально была разработана для получения изображений из космоса, но, установка этих систем на БПЛА, позволила извлечь выгоду из ряда уникальных решений, которые предлагает этот метод [Свалова и др., 2019].

Мультиспектральная съемка применима для решения широкого спектра задач, включая мониторинг и классификацию лесного покрова, а также для определения геолого-геофизических характеристик исследуемой территории в связке с геофизическими информационными системами [Керимов и др., 2019]. Использование БПЛА имеет более низкие эксплуатационные расходы, меньшее время повтора (например, в случаях, когда погода не позволяет получить снимки оптимального качества) и отсутствие избыточности данных.

Методы исследования

Для обследования полей и лесов в нашем случае применяются дроны, оборудованные мультиспектральными камерами. Этот способ исследования позволяет оперативно собирать большой объем информации на довольно обширных территориях о свете, поглощенном растениями/деревьями и отраженном от них. На основе полученных данных можно делать вывод о породах, классификации и состоянии посадок.

Мультиспектральные камеры, установленные на БПЛА, обеспечивают инновационный подход к ведению мониторинга общего состояния лесного хозяйства, а также точечного обследования.

Главное преимущество мультиспектрального сенсора – точная фиксация цвета, отражаемого растениями. Мультиспектральная камера производит съёмку в следующих диапазонах: красный край – в этом канале, находящемся на границе инфракрасного излучения, наиболее заметен пигмент хлорофилл, при участии которого происходит фотосинтез; ближний инфракрасный – используется для аналогичных целей и расположен на границе видимого света и среднего инфракрасного излучения; зелёный – для визуализации вегетативной активности растений и процесса их старения, важен при созревании и подготовке к сбору сельскохозяйственных культур; красный – в аграрном секторе имеет первостепенное значение для анализа качества и состояния почвы, также позволяет визуализировать на мультиспектральном снимке рукотворные объекты; синий – служит для отображения на снимках воды, а также для изучения дна водоёмов, и наконец видимое излучение: съёмка стандартных RGB-фотографий.

Применение GPS модуля в составе оборудования БПЛА повышает точность съёмки, дает информацию о высоте, положении и скорости движения камеры в режиме реального времени [Токарева, 2010].

Результаты работы и их обсуждение

В своем исследовании Benjamin T. Fraser и Russell G. Congalton сравнили визуальную интерпретацию с цифровой обработкой мультиспектральных снимков девяти лесных участков, расположенных на юго-востоке Нью-Гэмпшира, общей площадью 605,15 га засаженных деревьями различных пород, классов сукцессии лесов с результатами наземного анализа по идентификации отдельных деревьев. Эти участки были выбраны из-за наличия на них данных полевой инвентаризации (например, участков непрерывной инвентаризации лесов).

Для этого исследования использовались три метода классификации: Classification and Regression Trees (CART), random forests (случайные леса) и support vector machine (SVM).

В своих исследованиях для классификации отдельных видов деревьев они сопоставляют мультиспектральные, разновременные данные, лидарные или гиперспектральные данные.

Полученные результаты показали, что эффективность машинной обработки снимков высокого разрешения превосходит обычное дешифрирование для специфического (+ 7,44%) и обобщенного (+ 16,04%) видового состава леса (рис. 1). Эти результаты указывают на то, что автоматизированные подходы обработки могут служить альтернативой для обследования лесов в местном масштабе, а применение мультиспектральных изображений или более продвинутых методов сегментации, еще больше увеличит значимость данного вида исследований [Benjamin et al, 2021].

Группой ученых из Италии в работе «Improving Tree Species Classification Using UAS Multispectral Images and Texture Measures» (Классификация пород деревьев с помощью мультиспектральной съёмки с БПЛА и метода текстур) приводятся результаты проведения мультиспектральной съёмки питомника растений в местечке Чиримидо, Комо, Италия, который был примечателен для ученых наличием разных

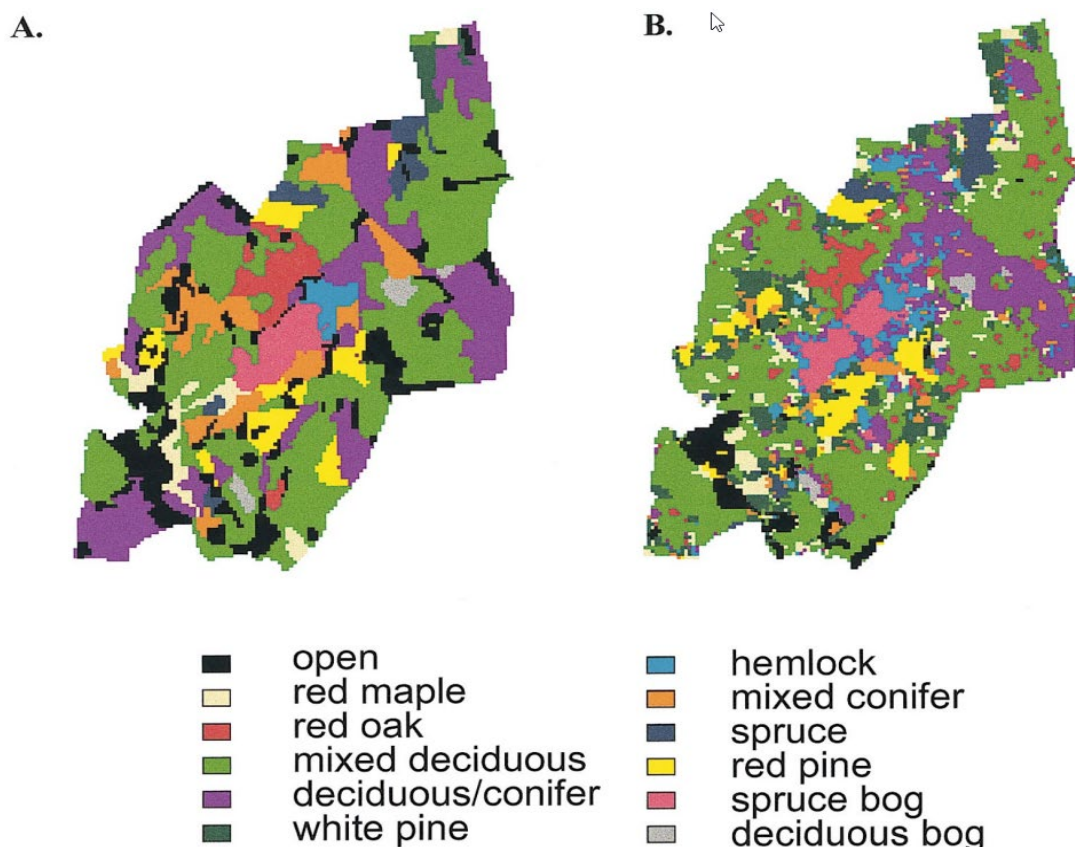


Рис. 1. Классификация видового насаждения: а) определяемая на основе полевых измерений базальной площади; б) классификация видов, полученная на основе данных дистанционного зондирования [Martin et. al, 1998] /

Fig 1. Classification of species stands: (a) determined from field measurements of basal area; (b) classification of species derived from remotely sensed data [Martin et. al., 1998]

видов деревьев: Клен, Граб, Каталпа, Кизил, Бук, Медовая акация и Дуб каштановый (рис. 2).

Были выполнены съемки трехцветного (RGB) и инфракрасного (CIR) форматов летом и осенью. На основе изображений были созданы цифровая модель поверхности (DSM) и мультиспектральный ортофотоплан (рис. 3).

Классификационные тесты доказали, что добавление функций текстуры улучшило общие значения точности. Некоторые виды деревьев, которые были вперемешку с другими в классификации на основе чистых радиометрических полос, были лучше идентифицированы путем применения метода текстур. Исследование доказывает, что использование функций текстуры приводит к значительному увеличению общей точности, значения которой изменяются от 58% до 78% или 87%, в зависимости от уменьшения компонентов [Gini et. al, 2018].

Метод классификации пород деревьев на основе сегментации и спектральных характеристик кроны отдельных деревьев в смешанных лесах представлен китайскими исследователями для национального заповедника Ляншуй на Северо-Востоке Китая.

Для классификации видов деревьев были применены методы опорных векторов «Support vector machine (SVM)» и углов отражения спектра «Spectrumanglermapper (SAM)». Сравнивались результаты классификации по пикселям, полученные на ос-



Рис. 2. Район работ: желтые линии – траектории полета БПЛА, красные треугольники – GPS отметки /
 Fig. 2. Work area: yellow lines – UAV flight paths, red triangles – GPS marks

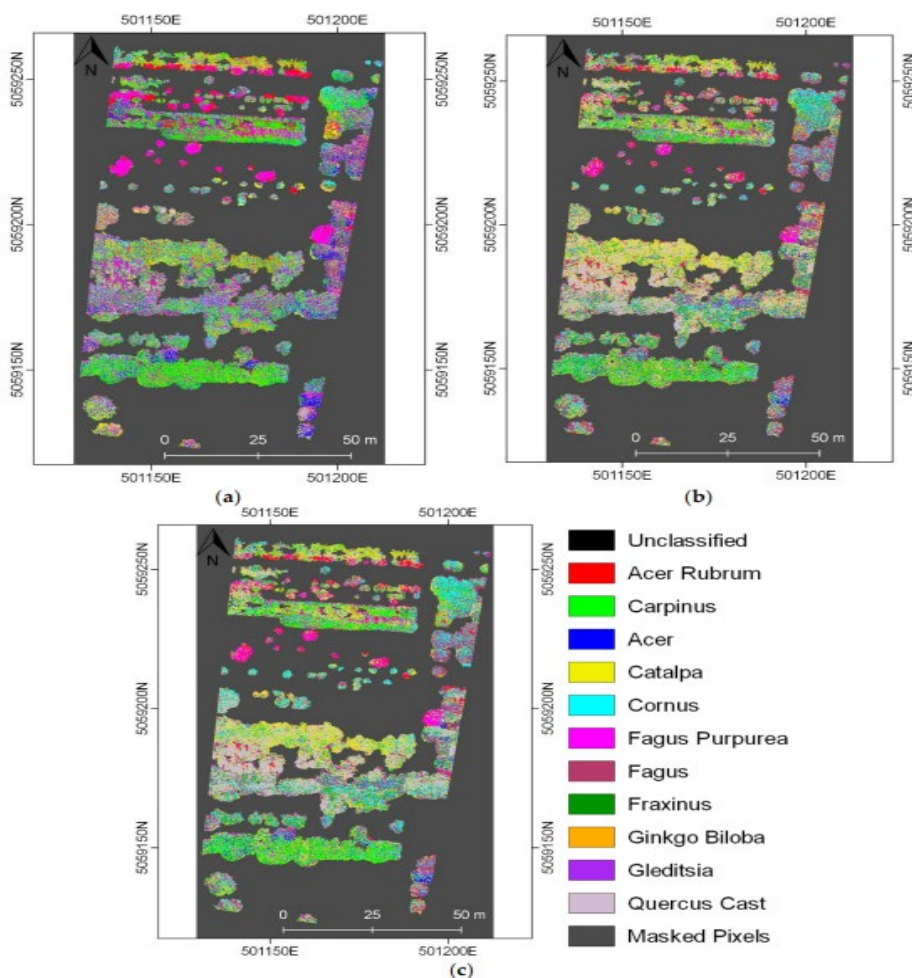


Рис. 3. Классификация видов деревьев по мультиспектральному ортофотоплану (цвета – породы деревьев) /
 Fig. 3. Classification of tree species by multispectral orthophotos

нове мульти – и гиперспектральных данных, и результаты выделения отдельных деревьев по данным LiDAR.

Результаты прямой классификации гиперспектральных изображений показаны на рисунке 4 – с помощью классификаторов SAM и SVM в программе ENVI a, b, наложение результатов выделения отдельных деревьев на результаты классификации – c, d. Окончательные результаты классификации совместно двумя методами приведены на рисунке 5.

Спектральный анализ эффективно определил классы доминирующих и субдоминирующих видов. Согласованность идентификации относительно полевых наблюдений для класса доминирующих видов составляла более 90%. В отличие от этого, согласованность классов субдоминантных видов составила около 60%, а общая согласованность, как метода опорных векторов, так и метода углов отражения спектра составила более 70% [Dan Zhao et. al., 2020].

Еще одно исследование по оконтуриванию деревьев по видам крон, с помощью мультиспектральных снимков, было проведено в природной зоне «College Woods Natural Area (CWNA)», в г. Дарем, США.

Снимки были обработаны программой Agisoft Photo Scan Pro (v. 1.6.2) и построены ортофотоплан, цифровая модель поверхности и модель высоты.

Оценка точности выявления была выполнена сравнением выборки деревьев, с эталонными деревьями. Результаты были представлены в виде матрицы ошибок. В матрице ошибок TP (True Positive) представляет собой количество правильно обнаруженных деревьев. FP (False Positive) – количество обнаруженных деревьев, виды которых не были подтверждены при сравнении с эталонами. FN (False Negative) – ошибка пропуска [Strech et. al., 2008].

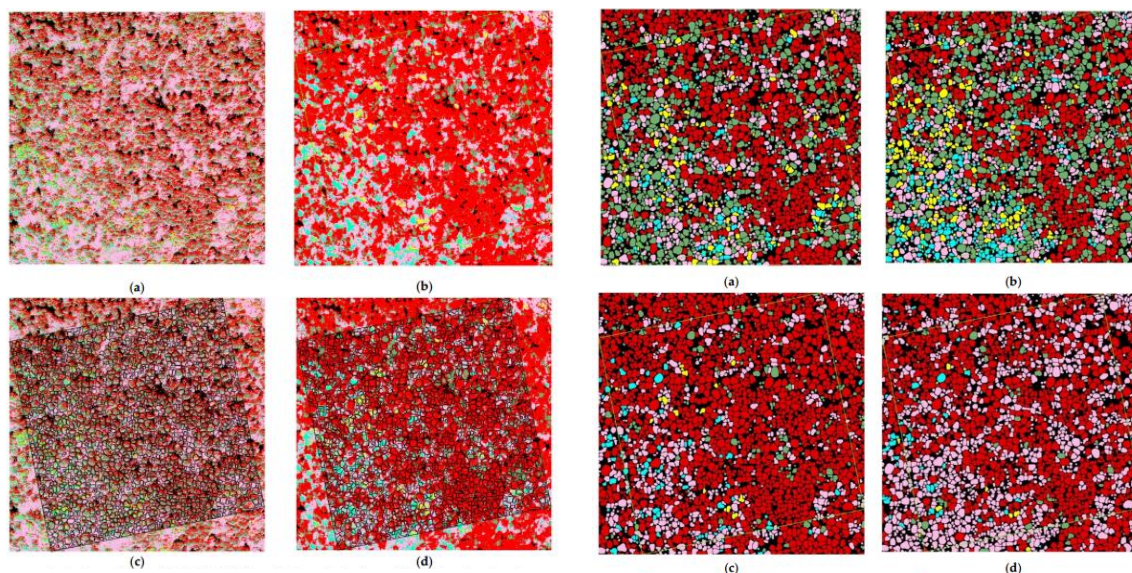


Рис. 4. Классификация деревьев по методам: (a) SAM; (b) SVM; (c, d) SAM и SVM с сегментацией отдельных деревьев; / Fig. 4. Classification of trees by methods: (a) SAM; (b) SVM; (c, d) SAM and SVM with segmentation of individual trees

Рис. 5. Конечные результаты классификации совместно двумя методами / Fig. 5. Final results of classification using two methods together

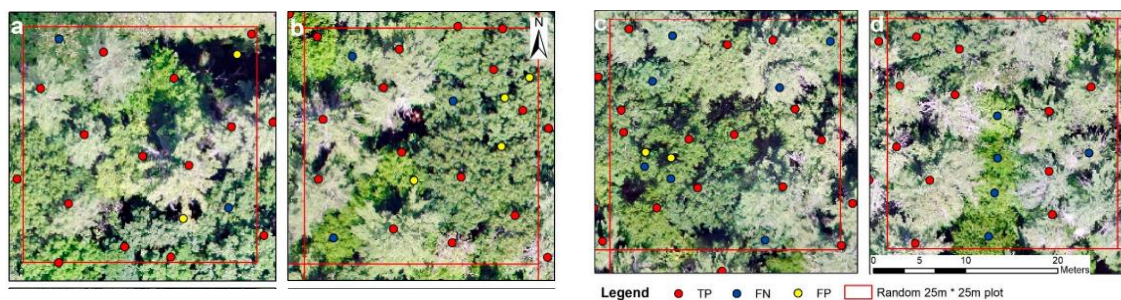


Рис. 6. Примеры распознавания деревьев, по матрице TP, FN и FP [Mohan, et. al., 2017] /
Figure 6. Examples of tree recognition, by TP, FN and FP matrix [Mohan, et. al., 2017]

Всего в эксперименте было обнаружено 4164 дерева со средней высотой 23,35 метра и средним диаметром кроны 7,43 метра. В общей сложности 971 дерево было идентифицировано на 60 случайно выбранных участках и использовано для анализа ошибок. На рисунке 6 показаны четыре примера обнаруженных верхушек деревьев.

Российская компания Topodrone (<https://topodrone.ru/news/article/multispectral/>) представила результаты мультиспектральной аэрофотосъемки лесного массива в провинции Pohjois-Karjala, Финляндия и показала возможность создания высокоточного ортофотоплана в мультиспектральном и видимом диапазонах.

Съемки проводились квадрокоптером DJI PHANTOM 4PRO с геодезическим навигационным приемником GNSS и мультиспектральной камерой PARROT SEQUOIA, что позволило выполнить съемку и получить координаты положения дрона с точностью до одного сантиметра.

После обработки GNSS измерений с высокой точностью определяются координаты изображений, затем данные обрабатываются в ПО для фотограмметрической обработки, и строятся цифровая модель рельефа и ортофотоплан с высокой точностью привязки.

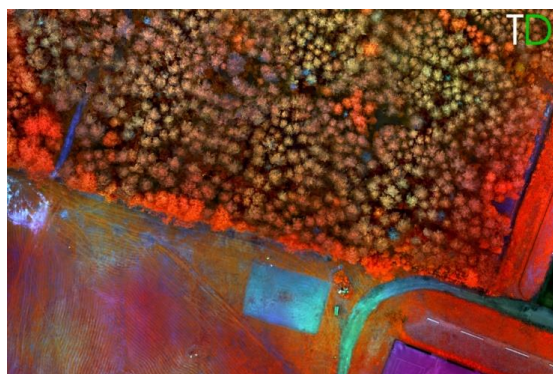
Для создания этого набора данных не потребовалось выполнение дополнительных работ по закладке наземных опорных точек, что позволило упростить процесс полевых работ в лесном массиве и значительно сократило сроки и стоимость выполнения проекта.

Совместная обработка полученных данных позволила определить вид, местоположение и высоту деревьев, а также выявить поврежденные и засыхающие растения дистанционно (рис. 7, 8).

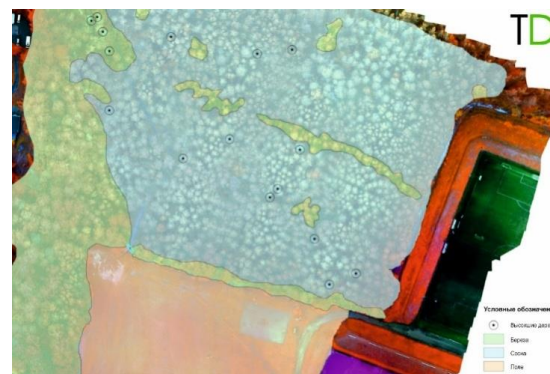
Таким образом, квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro с мультиспектральной камерой SEQUOIA позволил решить задачу мониторинга и таксации лесов, определения качественных и количественных характеристик лесных массивов, контроля вырубок [Алешко и др., 2020].

В 2019 году молодые ученые из Красноярского политехнического техникума представили квадрокоптер собственной сборки с установленным на нем помимо вспомогательных блоков модулем мультиспектральной камеры MapirSurvey 3, для определения вегетационного индекса NDVI, требующего проведения аэрофотосъемки в видимой и ближней ИК областях, что является основным инструментом получения информации о поражении леса [Рахматуллина и др., 2021].

Съемка проводилась согласно полетной траектории через определенное расстояние, исходя из фокусного расстояния объектива и разрешения сенсора. Перекрытие составило 50-70%. Обработка полученных изображений проводилась в



*Рис. 7. Ортофотоплан по данным
мультиспектральной съемки /
Fig. 7. Multispectral Orthophotoplane*



*Рис. 8. Классификация
мультиспектральных данных /
Fig. 8. Classification of multispectral data*

программе Agisoft Meta Shape professional с получением ортофотомозаики исследуемого участка леса. Дальнейшую обработку изображений можно производить в открытой программе Quantum GIS, что позволит определить пораженные по различным причинам участки леса [Акимов и др., 2019].

В докладе российских ученых «Возможности обработки и анализа данных сверхлёгкого БПЛА Sense Flye Vee в лесном хозяйстве» представлен пример фотограмметрической обработки и спектрального анализа данных, полученных с беспилотника Sense Flye Vee в сфере лесного хозяйства с применением сенсоров в различных диапазонах спектра.

Из данного доклада наиболее значимыми результатами обследования лесного участка для нас являются: карта степени фотосинтетической активности (рис. 8), подсчёт количества деревьев различных пород (рис. 9), анализ точности полученных результатов по материалам таксации.

Исходя из анализа, результаты позволяют построить карты вегетационных индексов с точностью 98%, подсчитывать количество крон различных пород с точностью 90%, строить границы выделов с точностью от 70% и проводить по ним статистическую обработку данных [Галецкая и др., 2015].

В мае 2022 года в журнале издательства MDPI, Sustainability вышла статья большой группы авторов из Бразилии «CO₂ Flux Model Assessment and Comparison between an Airborne Hyperspectral Sensor and Orbital Multispectral Imagery in Southern Amazonia (Оценка и моделирование выделения CO₂ и сравнение гиперспектрального зондирования с воздуха спутниковых мультиспектральных съемок в Южной Амазонии).

В своих исследованиях они сравнили полученные модели CO₂ Flux (выделение CO₂) с использованием четырех различных систем спутниковой съемки (Landsat 8, Planet Scope, Sentinel-2 и Aisa Fenix) в северной части штата Мату-Гросу, южная часть бразильской Амазонии. Исследуемая территория охватывает три различных вида землепользования: первичный тропический лес, голые почвы и пастбища. Обработка и радиометрическая калибровка позволили провести параметризованное сравнение величины CO₂ Flux, а также вегетационного индекса NDVI и фотохимического индекса PRI. Полученные результаты свидетельствуют о том, что снимки Planet Scope, MSI/Sentinel-2, OLI/Landsat-8 и AisaFENIX могут быть одинаково масштабированы, то есть изменчивость данных вдоль неоднородной сцены в вечнозеленом тропическом лесу схожа.

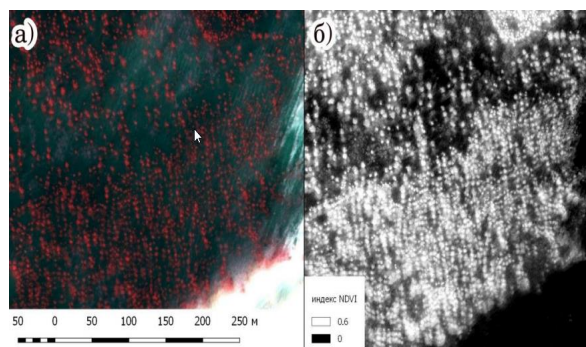


Рис. 11. Карта степени фотосинтетической активности: псевдоцветное отображение (а) и карта индексов NDVI (б) /
 Fig. 11. Map of the degree of photosynthetic activity: pseudocolor display (a) and NDVI index map (b)

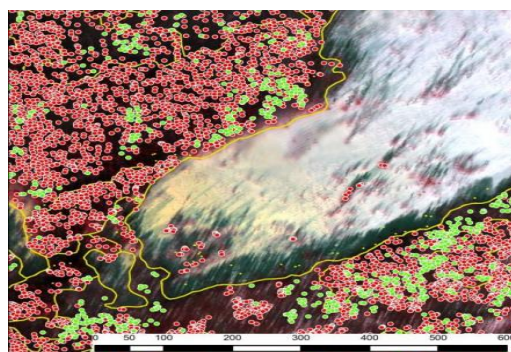


Рис. 12. Пример выделения деревьев различных пород /
 Fig. 12. Example of selecting trees of different species

В своих выводах ученые подчеркивают, что результаты их исследований позволяют лучше понять, как объединение и/или комбинация различных наборов данных, полученных с воздуха и орбиты, может обеспечить надежные оценки эмиссии и поглощения углерода в различных наземных экосистемах южной Амазонии а зависимость от выбросов и поглощения CO_2 пространственно-временной динамики сезонности осадков должна быть углубленно исследована в дальнейших исследованиях [João Lucas Della-Silva et al., 2022].

ВЫВОДЫ

Недостатком использования традиционных методов классификации космических снимков является зависимость спектральной яркости от сезонности, состояния атмосферы, положения носителя, ориентации съемочной камеры, а также ее типа и характеристики. Эти факторы влияют на достоверность дешифрирования, появляется необходимость исследования других признаков, характеризующих свойства лесной растительности [Манович и др., 2013]. Главное ограничение по применению аэрофотосъемки для мониторинга лесного хозяйства – высокая стоимость работ.

Мониторинг с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – метод, который включает в себя почти все достоинства и практически исключает все недостатки вышеперечисленных способов оценки и является наиболее доступным с финансовой и технологической точки зрения.

За последние годы мультиспектральная и лидарная съемки с использованием БПЛА, оснащенных глобальной навигационной спутниковой системой и инерциальной навигационной системой, все чаще используются для различных научных исследований окружающей среды, включая фотограмметрию и дистанционное зондирование [Colomina, Molina, 2014].

Низкая рабочая высота съемки с помощью БПЛА позволяет получать данные сверхвысокого разрешения. Данная особенность – способность генерировать изображения сверхвысокого разрешения в гибких временных масштабах позволяет нам заполнить пробел между полевыми исследованиями более мелкого масштаба и спутниковыми снимками глобального масштаба. И наконец, если в спутниковом дистанционном зондировании спектральные характеристики в основном используются для

грубого картирования почвенно-растительного покрова, то на снимках камер сверхвысокого разрешения полученных с помощью БПЛА спектральные характеристики позволяют дифференцировать поверхности на более детальном уровне, увеличивая количество различных классов (например, различных типов растительности).

Литература

1. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М.: Наука, 1993. – 293 с.
2. Гуня А. Н., Гакаев Р. А. Ландшафтная структура как основа для оценки динамики углерода в горах (на примере Макажойской котловины). // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XI. / Под ред. И. А. Керимова, В. А. Широковой, В. Б. Заалишвили, В. И. Черкашина. – М.: ИИЕТ РАН, 2021. – С. 332-339.
3. Гуня А. Н., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш., Алахвердиев Ф. Д. Комплексный подход к оценке изменений в землепользовании и их влияния на динамику углерода в горных ландшафтах Чеченской Республики. // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2021. – Т. 15. №4. – С. 39-52. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52
4. 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.
5. Кудяров В. Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор). // Почвоведение. – 2018. – №6. – С. 643-658.
6. Курбатова А. И. Аналитический обзор по современным исследованиям изменений биотических составляющих углеродного цикла. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2020. – Т. 28. №4. – С. 428-438. DOI: 10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438.
7. Пашкевич М. А., Коротаева А. Э. Анализ биологических методов для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 170-182. DOI: 10.46698/VNC. 2021.87.18.014.
8. Свалова В. Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (1). – С. 129-147. DOI: 10.46698/VNC. 2022.48.61.010.
9. Abalori T. A., Cao W., Weobong C. A.-A., Wang S., Anning D. K., Sam F. E., Liu W., Wang W. Spatial variability of soil organic carbon fractions and aggregate stability along an elevation gradient in the alpine meadow grasslands of the Qilian Mountains, China. // Chilean Journal of Agricultural Research. – 2022. – Vol. 82 (1). – pp. 52-64. DOI: 10.4067/s0718-58392022000100052
10. Amanuel W., Yimer F., Karlton, E. Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. // Journal of Ecology and Environment. – 2018. – Vol. 42 (1). – pp. 1-11.
11. Ewane E. B. Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192 (8). – pp. 1-35.
12. Garten C. J. Soil carbon dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. – 2004. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57407.pdf>
13. Hilton R. G., West A. J. Mountains, erosion and the carbon cycle. // Nature Reviews Earth and Environment. – 2020. – No. 1. – pp. 284-299. DOI: 10.1038/s43017-020-0058-6.
14. Jakšić S., Ninkov J., Milić S., Vasin J., Živanov M., Jakšić D., Komlen V. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. // Sustainability. – 2021. – Vol. 13 (15). – p. 8332. DOI: 10.3390/su13158332.

15. Joel L. M., Balthazar M. M., Didas N. K., John B. H., Proches M., Loth S. H., Jozef M., Hubert D. Variability of soil organic carbon with landforms and land use in the Usambara Mountains of Tanzania. // *Journal of Soil Science and Environmental Management*. – 2016. – Vol. 7 (9). – pp. 123-132. DOI: 10.5897/JSSEM2016.0557
16. Karchegani P. M., Ayoubi S., Mosaddeghi M. R., Honarjoo N. Soil organic carbon pools in particle-size fractions as affected by slope gradient and land use change in hilly regions, western Iran. // *Journal of Mountain Science*. – 2012. – Vol. 9 (1). – pp. 87-95. DOI: 10.1007/s11629-012-2211-2
17. Kurz W. A., Dymond C. C., White T. M., Stinson G., Shaw C. H., Rampley G. J., Smith C., Simpson B. N., Nielson E. T., Trofimow J. A., Metsaranta J., Apps M. J. CMS-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards // *Ecological Modelling*. – 2009. – Vol. 220. – pp. 480-504. DOI: 10.111016/j. ecolmodel. 2008.10.018
18. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. // *InterCarto. InterGIS*. – 2017. – Vol. 23. – pp. 373-382. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382
19. Mugagga F., Nagasha B., Barasa B., Buyinza M. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. // *International Journal of Regional Development*. – 2015. – Vol. 2. No. 1. – pp. 58-75.
20. Schepaschenko D. G., Shvidenko A. Z., Lesiv M. Yu., Ontikov P. V., Schepaschenko M. V., Kraxner F. Estimation of Forest Area and its Dynamics in Russia Based on Synthesis of Remote Sensing Products. // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2015. – Vol. 8. No. 7. DOI: 10.1134/S1995425515070136.
21. Sleeter B. M., Liu J., Daniel C., Frid L., Zhu Zh. An integrated approach to modeling changes in land use, land cover, and disturbance and their impact on ecosystem carbon dynamics: a case study in the Sierra Nevada Mountains of California. // *AIMS Environmental Science*. – 2015. – Vol. 2 (3). – pp. 577-606. DOI: 10.3934/environsci. 2015.3.577.
22. Zheng J., Mao F., Du H., Li X., Zhou G., Dong L., Zhang M., Han N., Liu T., Xing L. Spatiotemporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. No. 8. – p. 708. DOI: 10.3390/f10080708

References

1. Bazilevich N. I. Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia. – Moscow. Nauka. 1993. 293 p. (In Russ.)
2. Gunya A. N., Gakaev R. A. Landscape structure as a basis for assessing the dynamics of carbon in the mountains (by the example of the Makazhoy Depression). Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Vol. 11. Edited by I. A. Kerimov V. A. Shirokova, V. B. Zaalishvili, V. I. Cherkashin. Moscow. S. I. Vavilov Institute for the History of Natural Science and Technology, RAN, 2021. pp. 332-339. (In Russ.)
3. Gunya A. N., Gairabekov U. T., Makhmudova L. Sh., Alakhverdiev F. D. An integrated approach to the assessment of the changes in land use and their impact on carbon dynamics in the mountain landscapes of the Chechen Republic. Proceedings of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences. 2021. Vol. 15. No. 4. pp. 39-52. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-4-39-52 (In Russ.)
4. Kerimov I. A., Gairabekov U. T., Makhmudova L. Sh. Carboniferous polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. Grozny Natural Science Bulletin. 2021. Vol. 6. No. 3 (25). pp. 35-47. (In Russ.)
5. Kudyarov V. N. Soil respiration and biogenic carbon dioxide sink on the territory of Russia (analytical review). *Soil science*. 2018. No. 6. pp. 643-658. (In Russ.)
6. Kurbatova A. I. Analytical review of modern research on changes in the biotic components of the carbon cycle. Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and

Life Safety. 2020. Vol. 28. No. 4. pp. 428-438. DOI: 10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438. (In Russ.)

7. Pashkevich M.A., Korotaeva A. E. Analysis of biological methods for quarry wastewater treatment from nitrogen compounds. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 (4). pp. 170-182. DOI: 10.46698/VNC. 2021.87.18.014. (In Russ.)

8. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12 (1). pp. 129-147. DOI: 10.46698/VNC. 2022.48.61.010. (In Russ.)

9. Abalori T.A., Cao W., Weobong C.A.-A., Wang S., Anning D.K., Sam F.E., Liu W., Wang W. Spatial variability of soil organic carbon fractions and aggregate stability along an elevation gradient in the alpine meadow grasslands of the Qilian Mountains, China. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2022. Vol. 82 (1). pp. 52-64. DOI: 10.4067/s0718-58392022000100052

10. Amanuel W., Yimer F., Karlton, E. Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Ecology and Environment*. 2018. Vol. 42 (1). pp. 1-11.

11. Ewane E.B. Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192 (8). pp. 1-35.

12. Garten C.J. Soil carbon dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. 2004.

13. Hilton R. G., West A. J. Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2020. No. 1. pp. 284-299. DOI: 10.1038/s43017-020-0058-6.

14. Jakšić S., Ninkov J., Milić S., Vasin J., Živanov M., Jakšić D., Komlen V. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (15). p. 8332. DOI: 10.3390/su13158332.

15. Joel L.M., Balthazar M.M., Didas N.K., John B.H., Proches M., Loth S.H., Jozef M., Hubert D. Variability of soil organic carbon with landforms and land use in the Usambara Mountains of Tanzania. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 2016. Vol. 7 (9). pp. 123-132. DOI: 10.5897/JSSEM2016.0557

16. Karchegani P.M., Ayoubi S., Mosaddeghi M.R., Honarjoo N. Soil organic carbon pools in particle-size fractions as affected by slope gradient and land use change in hilly regions, western Iran. *Journal of Mountain Science*. 2012. Vol. 9 (1). pp. 87-95. DOI: 10.1007/s11629-012-2211-2

17. Kurz W.A., Dymond C. C., White T. M., Stinson G., Shaw C. H., Rampley G. J., Smith C., Simpson B. N., Nielson E. T., Trofimow J. A., Metsaranta J., Apps M. J. CMS-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*. 2009. Vol. 220. pp. 480-504. DOI: 10.111016/j. ecolmodel. 2008.10.018

18. Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. *InterCarto. InterGIS*. 2017. Vol. 23. pp. 373-382. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382

19. Mugagga F., Nagasha B., Barasa B., Buyinza M. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. *International Journal of Regional Development*. 2015. Vol. 2. No. 1. pp. 58-75.

20. Schepaschenko D. G., Shvidenko A. Z., Lesiv M. Yu., Ontikov P. V., Schepaschenko M. V., Kraxner F. Estimation of Forest Area and its Dynamics in Russia Based on Synthesis of Remote Sensing Products. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. Vol. 8. No. 7. DOI: 10.1134/S1995425515070136.

21. Sleeter B.M., Liu J., Daniel C., Frid L., Zhu Zh. An integrated approach to modeling changes in land use, land cover, and disturbance and their impact on ecosystem carbon dynamics: a case study in the Sierra Nevada Mountains of California. *AIMS Environmental Science*. 2015. Vol. 2 (3). pp. 577-606. DOI: 10.3934/environsci. 2015.3.577.

22. Zheng J., Mao F., Du H., Li X., Zhou G., Dong L., Zhang M., Han N., Liu T., Xing L. Spatiotemporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests. *Forests*. 2019. Vol. 10. No. 8. p. 708. DOI: 10.3390/f10080708