

СТАТЬЯ

УДК 528.7:550.8

DOI 10.17513/use.38210

**ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ****Осинцева М.А., Рада А.О., Кузнецов А.Д.***ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово,**e-mail: pavvm2000@mail.ru*

В последние годы возросло применение дистанционного зондирования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга техногенно нарушенных земель, а направления применения расширились. И в настоящее время было проведено несколько обзорных исследований, посвященных конкретно техногенно нарушенным землям. Однако недостаточно систематических и всесторонних исследований применения беспилотных воздушных судов в мониторинге техногенно нарушенных экосистем. Целью данной работы являлось изучение технологии дистанционного зондирования Земли с применением беспилотных воздушных судов для контроля техногенно нарушенных земель Кемеровской области – Кузбасса. Впервые проанализировали тенденции применения беспилотных воздушных судов для дистанционного зондирования техногенно нарушенных земель. Основными аспектами сценариев применения дистанционного зондирования с беспилотных воздушных судов являются мониторинг растительности, физический и химический мониторинг почвы, мониторинг деградации почвы и мониторинг нарушений окружающей среды. Существующие ограничения и направления развития применения беспилотных воздушных судов были обобщены. Приведенные материалы будут полезны для лучшего понимания возможностей применения дистанционного зондирования с помощью беспилотных воздушных судов не только для мониторинга нарушенных земель угольных участков, но и в научных исследованиях биологических объектов экологических наблюдений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, беспилотные воздушные суда, цифровые аэросъемки техногенно нарушенных земель, рекультивация

Работа ведется в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» («Чистый уголь – зеленый Кузбасс»), мероприятие 3.1 «Экополигон мирового уровня технологий рекультивации и ремедиации» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №075-15-2022-1200 от 28.09.2022 г.).

**LAND REMOTE SENSING TECHNOLOGIES
USING UNMANNED AERIAL VEHICLES****Osintseva M.A., Rada A.O., Kuznetsov A.D.***Kemerovo State University, Kemerovo, e-mail: pavvm2000@mail.ru*

In recent years, the use of unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing for monitoring anthropogenically disturbed land has grown, as have the application areas. And there have been several review studies specifically on technogenically disturbed lands. However, there is insufficient systematic and comprehensive research on the application of unmanned aircraft in monitoring technogenically disturbed ecosystems. This paper aims to study the technology of remote sensing of the land using unmanned aircraft to control technogenically disturbed lands of Kemerovo region – Kuzbass. For the first time the trends in the use of unmanned aircraft for remote sensing of technogenically disturbed areas are analyzed. The primary aspects of unmanned aircraft remote sensing application scenarios were vegetation monitoring, soil physical and chemical monitoring, soil degradation monitoring, and environmental disturbance monitoring. The current limitations and future directions of unmanned aircraft applications have been summarized. The materials provided will aid in a better understanding of the applications of remote sensing by unmanned aircraft not only for monitoring of disturbed lands of coal sites, but also in scientific research of biological objects of ecological observations.

Keywords: remote sensing, unmanned aerial vehicles, digital aerial surveys of technogenically disturbed lands, reclamation

The work was carried out within the framework of Decree No. 1144-r of the Government of the Russian Federation dated 11.05.2022, a full innovation cycle comprehensive research and technical program "Development and implementation of a complex of technologies in the fields of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials with a consistent reduction of the environmental burden on the environment and risks to the life of the population" ("Clean coal – green Kuzbass"), event 3.1 "Ecopoligon of world-class reclamation and remediation technologies" with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2022-1200 dated 28.09.2022).

С начала 2000-х гг. аэрофотосъемка находит широкое применение в различных областях (картография, геодезия, геология, градостроительство и лесная инвентаризация, киноиндустрия, реклама и др.) [1]. Беспилотные летательные аппараты (беспилотные воздушные суда) обладают простотой в эксплуатации и управляются дистанционно, что расширяет их спектр применения в областях и территориях, недоступных для человека по разным причинам [2]. Беспилотные воздушные суда (БВС) способны получать изображения высокой четкости с точностью пространственного разрешения как минимум до сантиметров с больших площадей благодаря оснащению оборудованием (датчиками дистанционного зондирования) и соответствующим программным обеспечением (алгоритмы технологии позиционирования) [3]. Эти особенности БВС раскрывают всю широту их применения: военные операции (разведки, обнаружения цели и атаки на поле боя), гражданская авиация (мониторинг и наблюдения с воздуха, контроль лесных пожаров, инспекция инфраструктуры и др.), агрономия (выявление заболеваний растений, оценка, оптимизация использования земли и др.), киноиндустрия и шоу, транспорт и доставка, охрана окружающей среды и др. [4–7].

Широта областей совместного применения технологий дистанционного зондирования территорий и беспилотных воздушных судов определяет потенциал их использования. К таким областям относятся агрокультура, лесное хозяйство, гидрология, география, управление природными и экологи-

ческими катастрофами, транспорт и связь, научные исследования и др. [8]. Экспоненциальный рост числа научных публикаций по приложениям дистанционного зондирования территорий с помощью беспилотных воздушных судов [9] отображает рост авторитета аэрофотосъемки, как части исследований во многих дисциплинах. Тем не менее обзорных работ современных тенденций применения дистанционного зондирования с БВС для мониторинга нарушенных земель недостаточно [10].

Целью исследования являлось изучение возможности применения технологии дистанционного зондирования Земли с применением беспилотных воздушных судов для контроля техногенно нарушенных земель Кемеровской области – Кузбасса.

Материалы и методы исследования

Отвал вскрышных пород и сопредельные территории одного из угольных месторождений Кузбасса, расположенные в Прокопьевском районе Кемеровской области в непосредственной близости от лицензионных участков 1 и 2 (рис. 1), являлись территорией исследования. Согласно [11] рассматриваемый участок находится на территориях, где должны быть расположены луга.

По данным Единого государственного реестра недвижимости на отвале, в пределах которого расположен экспериментальный участок и сопредельные территории отвалов вскрышных пород угольных месторождений Кузбасса, расположены земли, относящиеся к категории земель лесного фонда.



Рис. 1. Границы объекта работ и лицензионные участки на недропользование: 1 и 2 лицензионные участки (фото из коллекции КемГУ, дата съемки 20.10.2022): черная линия – границы участка рекультивации; синяя линия – река Черновой Нарык, желтые линии – технологические дороги, серые линии – грунтовые дороги

Хотя непосредственно сам экспериментальный участок не попадает на земли лесного фонда, но в аналогичных условиях находятся другие части отвала, которые должны быть рекультивированы до возвращения земель в лесной фонд.

Для выполнения дистанционного зондирования отвала вскрышных пород угольного месторождения и сопредельных территорий использование программно-аппаратного комплекса (ПАК) в составе высокопроизводительных беспилотных воздушных судов коммерческого класса (DJI Phantom 4 Pro+, модернизированный набором TeoKit, воздушное судно мультироторного типа с четырьмя электрическими бесколлекторными двигателями (рис. 2), цифровой фотокамеры, воздушного лазерного сканера (лидара), мультиспектральной камеры, радиометрического тепловизора, газоанализатора, бортового и наземного спутниковых геодезических приемников, программное обеспечение (ПО) для фотограмметрической обработки, ПО для обработки данных геодезических измерений и ПО для создания ГИС является наиболее рациональным. Точка базовой станции представляла собой заранее заординированную точку в пространстве. Для удобства ее использования она была расположена максимально близко к точке взлета/посадки БВС, при этом расстояние точки базовой станции от крайних точек границ объекта работ не превышало 20 км. На данной точке при проведении полетов производилась запись наземным GNSS-приемником [12].



Рис. 2. Воздушное судно мультироторного типа DJI Phantom 4 Pro+ (фото из коллекции КемГУ)

Аэрофотосъемка территорий исследуемого участка и сопредельных участков техногенно нарушенных земель угольного месторождения Кемеровской области – Куз-

басса выполнялась 20 октября 2022 г. Погодные условия во время проведения работ: пасмурно, ветер 3 м/с, -5°C . Мультиспектральная съемка, съемка в ИК-спектре, детектирование утечек метана исследуемого участка выполнялись 1 ноября 2022 г. Погодные условия во время проведения съемок и детектирования: пасмурно, ветер 4 м/с, -5°C . На объекте работ наблюдался неустойчивый снежный покров. Высота полета 30 м относительно рельефа местности при детектировании утечек метана и 100 м при остальных съемках. При полете огибание рельефа местности не выполнялось.

С помощью программного обеспечения UGCS выполнялась подготовка полетного задания. В программном продукте ТЕОВОР относительно точки базовой станции tbs_kru выполнялось уравнивание полета для получения точных центров фотографирования. Программный продукт ТЕОВОХ 3 был использован для возможности применения смещения камеры относительно GNSS-приемника БВС.

Фотометрическую обработку данных аэрофотосъемки производили в ПО, позволяющем производить обработку снимков, полученных камерой видимого спектра, в автоматическом режиме. В результате фотограмметрической обработки получены ортофотоплан в формате GeoTiff и цифровая модель поверхности в формате GeoTiff.

Результаты исследования и их обсуждение

Работы по дистанционному зондированию Земли выполнялись специалистами КемГУ согласно утвержденной «Программе и методике проведения дистанционного зондирования экспериментального участка и сопредельных территорий отвалов вскрышных пород угольных месторождений Кузбасса», и включали в себя аэрофотосъемку, мультиспектральную съемку, воздушное лазерное сканирование, съемку в ИК-спектре, детектирование утечек метана.

Создание цифрового ортофотоплана и цифровой модели поверхности. Работы по созданию цифрового ортофотоплана и цифровой модели поверхности выполнялись в программном комплексе Agisoft Metashape Professional из цифровых аэрофотоснимков, с запасом покрывающих границы изучаемого объекта, с целью получения непрерывного ортофотоизображения местности без видимых швов и порезов. Цифровая модель поверхности создавалась в процессе построения ортофотоплана (рис. 3).

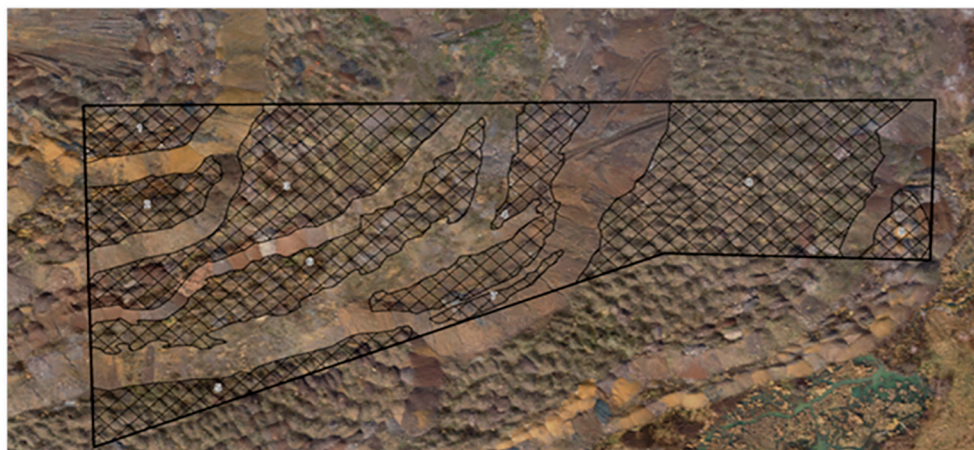


Рис. 3. Ортофотоплан и граница объекта исследований (фото из коллекции КемГУ) — границы рекультивации; □□ территория с плоским (неспланированным) рельефом

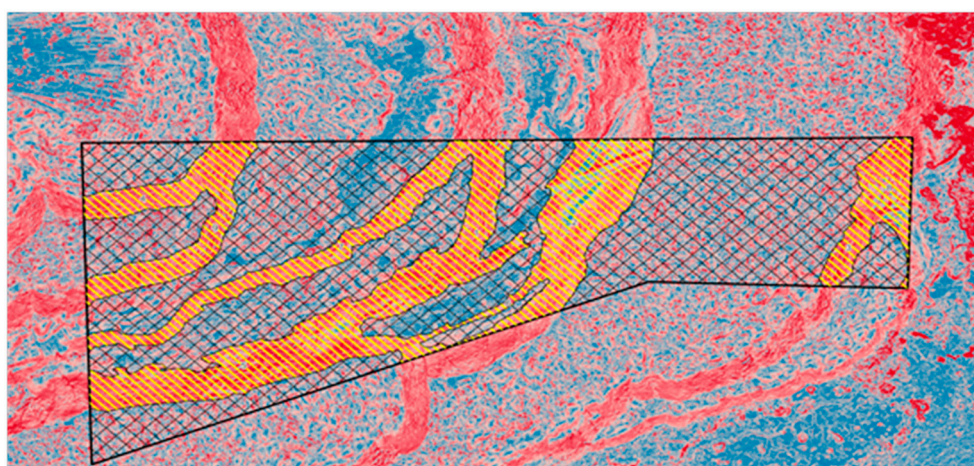


Рис. 4. Карта уклонов экспериментального участка и сопредельных территорий отвалов вскрышных пород угольных месторождений (фото из коллекции КемГУ)

Она во многом схожа с цифровой моделью рельефа, но имела более низкую точность построения. Поэтому цифровая модель поверхности была использована как модель земной поверхности при проектировании полетных заданий для последующих работ.

Крутые уклоны на участках рекультивации наиболее интересны с точки зрения исследования, поскольку их вертикальное профилирование – наиболее затратное мероприятие при рекультивации. На территории экспериментального участка и сопредельных территорий были выделены участки с крутыми уклонами (рис. 4), из которых было сформировано 9 участков, для каждого из которых были рассчитаны площадь,

минимальная высота на участке, максимальная высота на участке, перепад высот и средняя высота на участке.

Карта термографической съемки. Мониторинг возгораний угля осуществляется посредством тепловизионной аэрофотосъемки с БВС. Для анализа угольных пожаров собирают значительный объем данных по результатам аэрофотосъемки в тепловом диапазоне [8, 9]. Составленная по результатам съемки в ИК-спектре карта термографической съемки (рис. 5) содержит данные абсолютной температуры поверхности экспериментального участка и сопредельных территорий отвалов вскрышных пород угольных месторождений.



Рис. 5. Карта термографической съемки (фото из коллекции КемГУ)

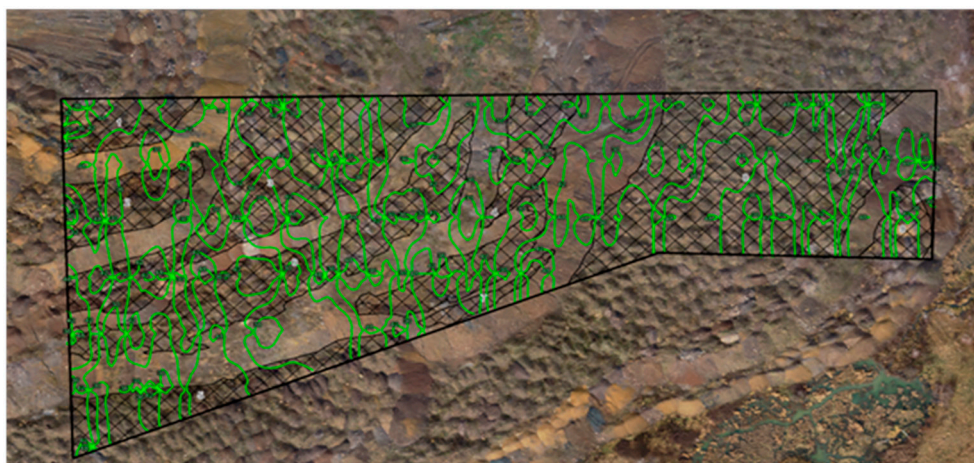


Рис. 6. Карта концентрации метана (фото из коллекции КемГУ)

На карте можно наблюдать локальные максимумы и минимумы температур. Температура на экспериментальном участке и сопредельных территориях отвалов вскрышных пород угольных месторождений имеет спокойный фон без выраженных максимумов, которые могли бы свидетельствовать о протекающих процессах окисления остатков угля в горной массе отвала.

Карта концентрации метана. Кузбасс является одной из крупнейших угольных территорий не только России, но и мира. Угледобыча сопровождается активными выбросами метана на территориях как угледобывающих разрезов, так и угольных отвалов [12]. Выбросы метана приводят к экологическим катастрофам, снижению качества воздуха, негативно влияют на здоровье и жизнь населения региона [13, 14]. В ме-

стах скопления метана в почве необходимо проводить мониторинг и контроль выбросов, что позволит отслеживать уровни выбросов и принимать меры для их снижения при необходимости.

Составленная по результатам детектирования утечек метана карта концентрации метана показывает наличие возможных выходов метана из угольной массы, оставшейся на экспериментальном участке и сопредельных территориях отвалов вскрышных пород угольных месторождений. Концентрация метана (рис. 6) не превышала значения 50 ppm. Возможно, полученные результаты отражают не фактическое состояние концентрации метана на экспериментальном участке и сопредельных территориях отвалов вскрышных пород угольных месторождений, а предел погрешности измерений.

Заключение

При проведении исследований техногенно нарушенных земель экспериментального участка и сопредельных территорий отвалов вскрышных пород территории угольного месторождения Кузбасса с помощью БВС были проведены аэрофотосъемка, мульти-спектральная съемка, воздушное лазерное сканирование, съемка в ИК-спектре, а также детектирование утечек метана. По результатам выполняемых работ для проведения анализа и визуализации пространственных данных, разных способов сбора и обработки полученных материалов аэросъемок, картографических материалов, геодезических измерений и дополнительных данных была создана специализированная ГИС.

Полученная достоверная информация об отсутствии на объекте температурных аномалий и возможных источников выбросов метана, которые могут негативно повлиять на развитие высаживаемых культур, позволит приступить к изучению существующих на участке вегетативных процессов, определить объем необходимых подготовительных работ по подготовке площадок к биологической рекультивации техногенно нарушенных территорий.

Список литературы

1. Isokangas E., Davids C., Kujala K., Rauhala A., Ronkanen A.-K., Rossi P.M. Combining unmanned aerial vehicle-based remote sensing and stable water isotope analysis to monitor treatment peatlands of mining areas // *Ecological Engineering*. 2019. Vol. 133. P. 137–147. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.04.024.
2. Feng L., Chen S., Zhang C., Zhang Y., He Y. A comprehensive review on recent applications of unmanned aerial vehicle remote sensing with various sensors for high-throughput plant phenotyping // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 182. № 106033. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105223.
3. Zheng H., Zhou X., He J., Yao X., Cheng T., Zhu Y., Cao W., Tian Y. Early season detection of rice plants using RGB, NIR-G-B and multispectral images from unmanned aerial vehicle (UAV) // *Computers and electronics in agriculture*. 2020. Vol. 169. № 105223. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105223.
4. Рада А.О., Кузнецов А.Д., Зверев Р.Е., Тимофеев А.Е. Автоматизация мониторинга строительных работ на основе лазерного сканирования с беспилотных воздушных судов // *Нанотехнологии в строительстве*. 2023. Т. 15, № 4. С. 373–382.
5. Ivanova S., Prosekov A., Kaledin A. A Survey on Monitoring of Wild Animals during Fires Using Drones // *Fire*. 2022. Vol. 5, Is. 3. P. 60. DOI: 10.3390/fire5030060.
6. Бабич О.О., Рада А.О., Куликова Ю.В., Сухих С.А. Изучение уровня эвтрофикации прибрежных вод Гданьского залива Балтийского моря с использованием данных дистанционного зондирования Земли // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2023. № 1 (217). С. 35–42.
7. Prosekov A., Kuznetsov A., Rada A., Ivanova S. Methods for Monitoring Large Terrestrial Animals in the Wild // *Forests*. 2020. Vol. 11, Is. 8. P. 808. DOI: 10.3390/f11080808.
8. Reis B.P., Martins S.V., Fernandes Filho E.I., Sarcinelli T.S., Gleriani J.M., Leite H.G., Halassy M. Forest restoration monitoring through digital processing of high resolution images // *Ecological Engineering*. 2019. Vol. 127. P. 178–186. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.11.022.
9. Libran-Embid F., Klaus F., Tschamtk T., Grass I. Unmanned aerial vehicles for biodiversity-friendly agricultural landscapes—A systematic review // *The Science of the total environment*. 2020. Vol. 732. № 139204. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139204.
10. Gao J.T., Sun F.D., Huo F., Zhang L.B., Zhou S., Yang T.Y., Dabian Z.X. Application and evaluation of unmanned aerial vehicle remote sensing in grassland animal and plant monitoring // *Acta Agrestia Sinica*. 2021. Vol. 29. P. 1–9. DOI: 10.11733/j.issn.1007-0435.2021.01.001.
11. Постановление губернатора Кемеровской области № 80-пг от 08 ноября 2016 г. «Схема размещения, использования и охраны охотничьих угодий на территории Кемеровской области» [Электронный ресурс]. URL: https://depoozm.ru/index.php/dokumenty/58-postanovleniya-i-rasporyazheniya-gubernatora-kemerovskoj-oblasti/327-docs_327# (дата обращения: 10.11.2023).
12. Broda J., Franitza P., Herrmann U., Helbig R., Grobe A., Grzybowska-Pietras J., Rom M. Reclamation of abandoned open mines with innovative meandricly arranged geotextiles // *Geotextiles and Geomembranes*. 2020. Vol. 48, Is. 3. P. 236–242. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2019.11.003.
13. Wu H., Yao C., Li C., Miao M., Zhong Y., Lu Y., Liu T. Review of Application and Innovation of Geotextiles in Geotechnical Engineering // *Materials*. 2020. Vol. 13, Is. 7. № 1774. DOI: 10.3390/ma13071774.
14. Kamble S.S., Dod R.D. Management of coal mine overburden and fly ash using bamboo cultivation // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. Vol. 8, Is. 10. P. 4223–4226. DOI: 10.35940/ijitee.J9942.0881019.