

УДК 502.131

Л. Г. Ахметзянова¹
Б. М. Усманов
А. М. Гафуров
Д. С. Селиванова

***Применение дистанционного метода
контроля, основанного на использовании
данных БПЛА, для оценки остаточной
емкости полигона отходов***

ФГАОУ ВО Казанский (Приволжский) федеральный
университет, г. Казань, Российская Федерация
¹e-mail: leisan-ksu@mail.ru

Аннотация. Оценка остаточной емкости полигонов твердых коммунальных отходов является актуальной задачей природоохранной деятельности настоящего времени. Материалы, представленные в данной статье, являются частью комплексной работы по отработке методики оценки остаточной емкости полигонов ТКО на основе данных, полученных БПЛА на примере действующего полигона в Лениногорском районе Республики Татарстан. В работе использованы современные методы высокоточной трехмерной реконструкции на основе съемки с беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 Pro V2.0, оснащенного приемником глобальной спутниковой навигационной системы. Реализована реконструкция проектной пирамиды захоронения ТКО. Проектные данные и данные натурных обследований приведены в одну систему координат и высот, произведен расчет остаточной емкости полигона, которая на момент исследования составила 14% от проектной вместимости. Предложенный подход позволяет осуществлять активный дистанционный контроль природоохранного инженерного сооружения.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, БПЛА, цифровая модель рельефа, полигон отходов, остаточная емкость.

Введение

Полигон твердых коммунальных отходов (ТКО) является природоохранным сооружением, которое в процессе эксплуатации приводит к формированию искусственно созданной положительной формы рельефа. В современных условиях необходимо эффективно использовать имеющиеся полигоны отходов без вовлечения новых участков природной территории под строительство [1], при этом осуществлять изучение и оценку процессов, связанных с формированием тела полигона. Известно, что твердые коммунальные отходы обладают высокой способностью к уплотнению под влиянием давления свалочных масс, техники, а также биодegradации [2;3]. Конечные изменения в вертикальной структуре полигона вследствие процессы биодegradации могут составлять 25-50 % [4;5], стабилизации мусорных масс могут продолжаться на протяжении нескольких лет.

Большое практическое значение имеет определение фактических геометрических параметров массива захоронения отходов, так как количественная оценка свободного объема участка захоронения позволит более точно оценить достижение проектных размеров полигона и срок его дальнейшей эксплуатации.

Геоинформационные методы пространственного анализа широко используются для определения состояния полигонов ТКО [6]. Более точные результаты позволяют получить современные полевые методы исследования [7]. Весьма интересным является способ определения объемов отходов по данным долгосрочного мониторинга полигона с использованием стереокамеры, установленной на столбе [8]. Наиболее распространенным методом является топографическая съемка территории полигона с использованием таких геодезических инструментов, как нивелиры, тахеометры и лазерные сканеры, и в последнее время, приемники глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС-приемники) [9]. Все чаще для получения данных об изменении объемов отходов на полигонах ТКО используется съемка беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) с последующим получением 3D-моделей методом фотограмметрии [10; 11]. Интеграция технологий наземного лазерного сканирования (НЛС) и беспилотных летательных аппаратов демонстрирует высокую эффективность метода БПЛА, который обеспечивает высокую точность и эффективность вычисления объема отходов [12-14]. Особенно привлекательным является использование недорогих дронов, которые позволяют получать точные модели полигонов и проводить повторную съемку, обеспечивая необходимыми данными для оценки остаточной емкости [15].

Представленная работа продолжает цикл определения остаточной емкости действующих полигонов отходов на территории Республики Татарстан [16]. Материалы, представленные в данной статье, являются частью работы по отработке методики оценки остаточной емкости полигонов ТКО на основе данных, полученных БПЛА.

Материалы и методы

В настоящей работе приведены результаты исследования, объектом которого является действующий полигон ТКО в Лениногорском районе Республики Татарстан. В геологическом строении участка принимают участие пермские отложения казанского яруса, представленные глинами твердыми, полутвердыми, плотными с прослоями песчаников. Коэффициент фильтрации грунта при незначительном уплотнении составляет 0,0080 м/сут, что незначительно отличается от нормативного – 0,0086 м/сут. Подземные воды на проектируемой площадке строительства на период изысканий скважинами до глубины 15,0 м не вскрыты.

Фактическая вместимость полигона ТБО составляет 504 840 м³ и должна обеспечить срок его функционирования не менее 15 лет. Зона складирования ТБО запроектирована в виде холма, должен иметь полную высоту равную 18,6 м над поверхностью земли. На момент обследования полигон работает, огорожен, охраняется. Организация работ по приему, складированию, уплотнению и изоляции ТБО определяется технологической схемой и графиком эксплуатации полигона.

Для оценки современного состояния полигона были проведены полевые и инструментальные работы в июле 2020 года. Метеорологические условия на момент съемки имели следующие характеристики: переменная облачность, скорость ветра – 5 м/сек.

Работы производились с использованием беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 PRO v2, оснащенного 20 мегапиксельной камерой. В модификацию квадрокоптера были внесены изменения – был установлен внешний ГНСС-приемник EMLID Reach M+ со спиральной антенной TOPGNSS TOP508. Внесенные изменения позволяют осуществлять запись координат с частотой 1 Гц, а время срабатывания затвора камеры сокращено до 0,05 секунд.

Полет и съемка объектов исследования производились с помощью мобильного ПО DroneDeploy. При формировании полетного задания устанавливалась высота полета над точкой взлета (100 м), а также продольное и поперечное перекрытие между соседними снимками (75 %).

Данные с ГНСС-приемника были пересчитаны на основе данных с ближайшей к участку базовой станции. Среднеквадратические отклонения (СКО) уравнивания координат центров проекций снимков по осям X, Y, Z не превысили 1 см. Полученные координаты центров проекций снимков в дальнейшем сопоставляли с файлами снимков с БПЛА, после чего обрабатывали в фотограмметрическом программном обеспечении Agisoft Metashape. Далее производил фототриангуляция и создание плотного облака точек, после чего создаются цифровая модель рельефа (ЦМР) и ортофотоплан.

Ортофотоплан изготовлен в электронном виде в системе координат UTM зона 39 (север). Разрешение ортофотоплана составило 0,1 м.

Построение карты рельефа по облаку точек, цифровая модель рельефа и поперечные профили через площадь захоронения выполнены в программе Surfer 15, цифровая модель рельефа (ЦМР) выполнена с шагом 0,5 м.

Результаты и обсуждение

Для рассматриваемого объекта исследования была произведена обработка проектных материалов строительства. Основным источником для построения 3D-модели проектного холма полигона являлись схемы, содержащие проектные геометрические характеристики зоны захоронения.

Для сопоставления проектных характеристик с современным состоянием полигона, была осуществлена пространственная привязка сканов проектных схем средствами QGIS (модуль Georeferencing). В качестве опорных точек использовали поворотные точки границы участка (ограждения) и сооружения, фигурирующие на проектных данных и на момент съемки полигона. При привязке проводили контроль размеров полигона, указанных на схемах. После привязки проводилась оцифровка схем с учетом высотных характеристик зоны складирования. Помимо котлована и пирамиды векторизовали рельеф за пределами зоны складирования для сопоставления с современной ситуацией. На основании полученных данных строили цифровую модель зоны складирования в соответствии с проектом (рис. 1).

Далее произвели фотограмметрическую обработку результатов аэрофотосъемки территории объекта исследования, которая позволяет использовать полученные данные для проведения оценки современного состояния территории полигона.

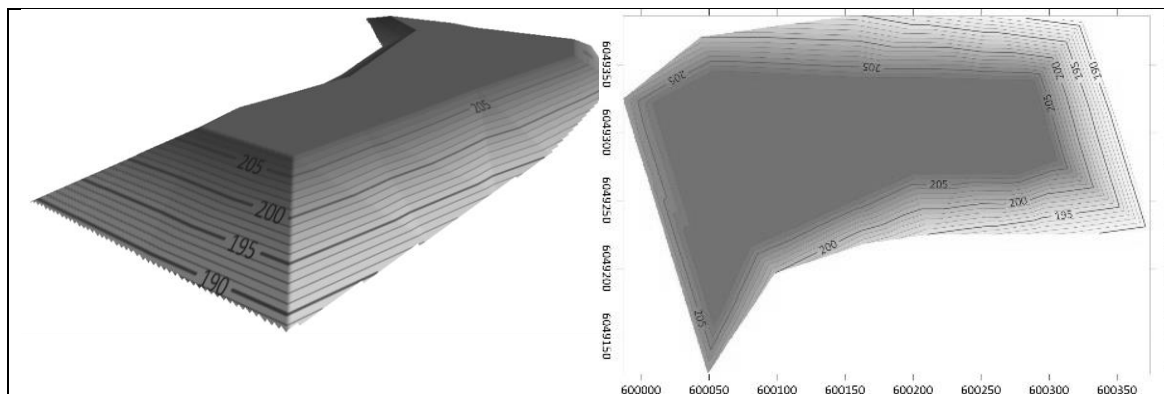


Рис. 1. Модель и карта рельефа надземной части проектного холма захоронения

Составлено авторами

Первое, что позволяют выявить данные съемки БПЛА – несоответствия организации полигона проектным решениям и нарушение границ зоны складирования. Сопоставление проектных и фактических характеристик геометрии зоны складирования показало несоответствие проектным решениям в юго-западной и юго-восточной части исследуемого полигона (рис. 2).

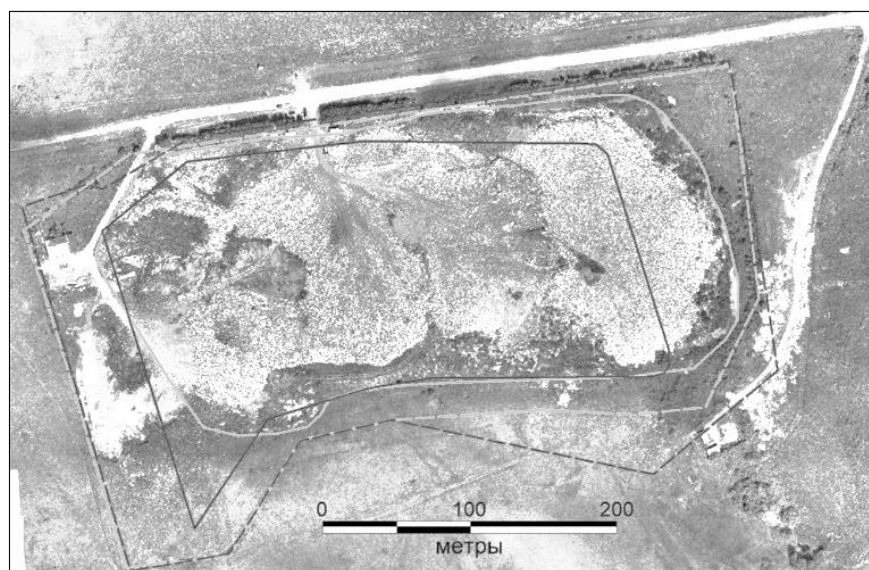


Рис. 2. Ортофотоплан территории полигона ТКО
(сплошная темная линия – проектный контур площади захоронения,
сплошная светлая линия – фактический контур площади захоронения)

Составлено авторами

По результатам обработки проектных данных, была построена объемная модель холма захоронения исследуемого полигона, а также карта рельефа надземной части проектного холма захоронения (рис. 3).

Результаты полевых исследований позволяют детально описать рельеф зоны захоронения и сопоставить высотные характеристики с проектными данными. По состоянию на момент обследования высота холма захоронения имеет отметки от

2,0 до 13,0 м, при этом проектная высота надземной части холма должна составлять 18,6 м.

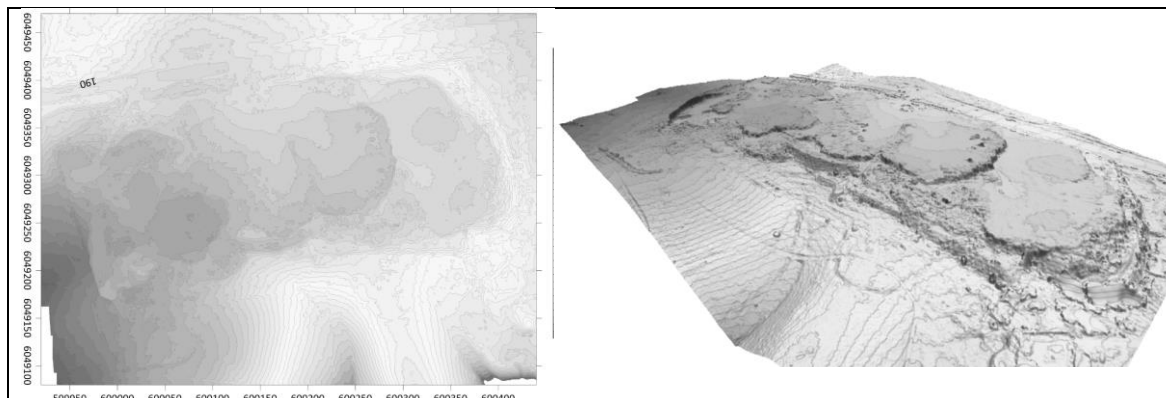


Рис. 3. Карта рельефа территории и объемная модель полигона ТКО
Составлено авторами

Для решения основной задачи исследования на следующем этапе необходимо было провести сопоставление проектных данных и результатов полевых работ. Основную сложность для данного объекта исследования представляло низкое качество схем, а также условная система координат и высот в проектной документации. Необходимо отметить, что самым главным при приведении проектных схем в мировую систему координат является сохранение геометрии и размеров зоны складирования. Поэтому при привязке схем необходимо добиваться сохранения размеров и площадей, указанных в проекте.

При наличии отклонений от проекта, найти общие точки бывает крайне сложно, в связи с этим привязка осуществлялась путем нахождения общих точек на цифровой модели рельефа (ЦМР) территории на момент проектирования полигона, и современных полевых исследований [17]. После приведения данных в единую систему координат появляется возможность оценить степень заполненности полигона и его остаточную емкость.

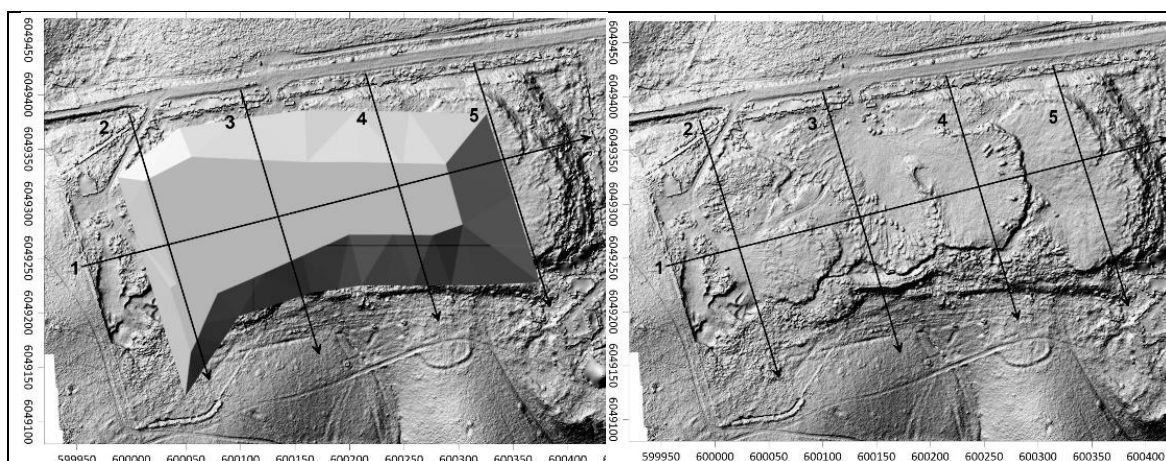


Рис. 4. Цифровая модель рельефа полигона ТКО: слева – проектная, справа – фактическая (цифрами обозначены номера профилей, представленных на рис. 5).

Составлено авторами

Сравнение ЦМР путем построения профилей через зону складирования позволяет оценить ситуацию на каждом участке полигона. Кроме того сопоставление цифровой модели фактического рельефа полигона с проектным наглядно демонстрирует выход зоны складирования за проектные границы (рис. 5).

Построение профилей через тело полигона дает возможность легко оценить соответствие заложения внешних откосов холма складирования. На рассматриваемом полигоне откосы дифференцируются слабо и не соответствуют проектному соотношению.

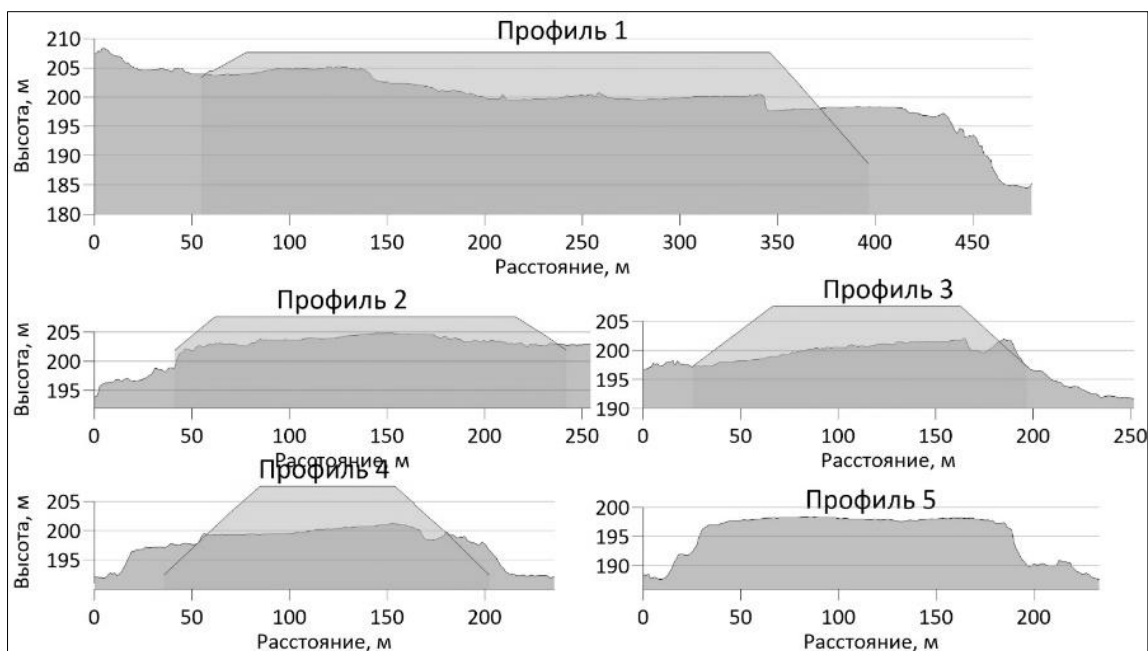


Рис. 5. Поперечные профили через проектный и фактический холмы захоронения
Составлено авторами

Необходимость оценки остаточной емкости чаще возникает на заключительных этапах формирования пирамиды полигонов. В том случае, если полевые исследования подтверждают организацию полигона в соответствии с проектом, достаточно провести расчеты на основании проектных данных и полученного с помощью фотограмметрической обработки полевых наблюдений рельефа. То есть оценку остаточной вместимости полигона можно проводить, исходя из проектного объема надземной части холма захоронения и фактически накопленного объема ТКО в надземной части холма захоронения.

В данном случае мусор складывается за пределами проектных границ пирамиды, и простое «вычитание» фактического рельефа из проектного приведет к значительной ошибке измерений. Поэтому для рассматриваемого полигона была построена модель «нулевого» рельефа по периметру зоны захоронения в соответствии с проведенными фотограмметрическими работами. Далее производили вычисление объема надземной части пирамиды путем вычитания модели «нулевого» рельефа из проектного и фактического на момент съемки.

Для исследуемого полигона проектная вместимость составляет 504 840 м³. По результатам вычислений остаточная емкость полигона на момент съемки составляет 70 284 м³ или 14% от проектной вместимости. Остаточная вместимость позволяет продолжать эксплуатировать данный объект размещения отходов, однако значение менее 20% свидетельствует о том, что проектная мощность данного природоохранного объекта близка к исчерпанию. Очевидно, что необходимо привести откосы тела полигона и границы зоны захоронения к проектным. Выявлено, что полигон находится на завершающей стадии эксплуатации, поэтому кроме оптимизации складирования отходов хозяйствующему субъекту необходимо подготовиться к этапу рекультивации тела полигона. Муниципальным службам необходимо разработать и запланировать внесение корректировок в территориальную схему обращения с отходами.

Выводы

Применение дистанционного метода, основанного на результатах обработки данных низковысотной аэрофотосъемки позволяет получить объективные данные текущего фактического состояния полигонов отходов. Анализ ЦМР и ортофотопланов также позволяют выявить как отклонения в реализации проектных решений, так и нарушения правил эксплуатации полигонов, а также дает возможность оценить остаточную емкость полигонов, как в случае соблюдения проектных решений при организации полигонов, так и в случае отклонения от них.

Активный мониторинг текущего состояния рельефа территории размещения полигона позволяет продлить срок службы (жизни) полигона, минимизировать негативные последствия воздействия на окружающую среду, а также выработать рекомендации для планированию деятельности хозяйствующих субъектов и муниципалитета.

Литература

1. Van Geel P. J., Murray K. E. Simulating settlement during waste placement at a landfill with waste lifts placed under frozen conditions // *Waste Management*. 2015. № 46. P. 352–361.
2. Chen Y. M., Zhan, L.T., Wei, H. Y., Ke, H. Aging and compressibility of municipal solid wastes // *Waste Management*. 2009. № 29 (1), P. 86–95
3. Hunte C., Hettiaratchi, P., Meegoda, J.N., Hettiarachchi, C.H. Settlement of bioreactor landfills during filling operation // *Geoenvironmental Engineering*. 2007. №152 (163). P. 1–10.
4. Wall D. K., Zeiss, C. Municipal landfill biodegradation and settlement // *J. Environ. Eng.* 1995. № 121 (3). P. 214–224.
5. Ling H. I., Leshchinsky D., Mohri Y., Kawabata T. Estimation of municipal solid waste landfill settlement // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1998. № 124 (1). P. 21–28.
6. Esposito G. F. Matano M. Sacchi. Detection and Geometrical Characterization of a Buried Landfill Site by Integrating Land Use Historical Analysis, Digital Photogrammetry and Airborne Lidar Data // *Geosciences*. 2018. Vol. 8. No 9. P. 348.

7. Yermolaev O. P., Usmanov B. M., Mishanina O. E., Khisamutdinova E. V. Basin approach to evaluation of human impact on the environment in oil production regions // *Neftyanoe Khozyaistvo – Oil Industry*. 2014. (12). P. 156-160.
8. Gasperini D. Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills // *International J. Environmental Technology and Management*. 2014. Vol. 17. № 1. P. 1.
9. Baiocchi V. UAV for monitoring the settlement of a landfill // *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52(3). P.41–52.
10. Yoo H.T. A Preliminary Study on Disaster Waste Detection and Volume Estimation Based on 3D Spatial Information // *Computing in Civil Engineering 2017*. Seattle, Washington: American Society of Civil Engineers, 2017. P. 428–435.
11. Athirah A. A. Manganese Removal in Groundwater Treatment Using Marble // *International Journal of Integrated Engineering*. 2019. V. 11. № 2.
12. Silva da C. A., Duarte C. R., Souto M., Silva dos Santos A.L. et al. Evaluating the accuracy in volume calculation in a pile of waste using UAV, GNSS and LiDAR // *Boletim de Ciencias Geodesical*. 2016. V. 22. № 1. P. 73–94.
13. Tucci G. Monitoring and Computation of the Volumes of Stockpiles of Bulk Material by Means of UAV Photogrammetric Surveying // *Remote Sensing*. 2019. Vol.11(12). P. 1471.
14. Son S. W. Integrating UAV and TLS Approaches for Environmental Management: A Case Study of a Waste Stockpile Area // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12(10). P. 1615.
15. Incekara A. Investigating the Utility Potential of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicles in the Temporal Monitoring of a Landfill // *International Journal of Geo-Information*. 2019. Vol. 8(1). P. 22.
16. Ахметзянова Л. Г., Усманов Б. М., Курицин И. Н., Кузьмин Р. С., Гафуров А. М., Сироткин В. В. Применение результатов аэрофотосъемки, полученных с использованием данных БПЛА, для оценки остаточной емкости полигона отходов на примере Республики Татарстан // *Вестник Удмуртского университета. Серия биология. Науки о земле*. 2021. Т. 31, вып. 4. С. 404-415.
17. Gafurov A. M., Yermolayev O. P., Usmanov B. M., Khomyakov P. V. Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV // *InterCarto, InterGIS*. 2021. Vol.27(2). P.327-339.

L. G. Akhmetzyanova¹
B. M. Usmanov
A. M. Gafurov
D. S. Selivanova

***Application of a remote control method
based on the use of UAV data to assess
the residual capacity of the landfill***

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

¹e-mail: leisan-ksu@mail.ru

Abstract. *The assessment of the residual capacity is a fundamentally important task of environmental protection. The solution of task offered in this work on the example of one of the landfills of MSW located on the territory of the Republic of Tatarstan. The work uses modern methods of high-precision three-dimensional reconstruction based on shooting from the DJI Phantom 4 unmanned aerial vehicle*

equipped with a receiver of the global satellite navigation system (GNSS). Reconstruction of the project pyramid of MSW burial carried out. The project data and the data of field surveys calculated in one coordinate system. The residual capacity of the landfill was calculated. It amounted to 14% of the project capacity. The proposed approach allows for active remote monitoring of environmental engineering structures.

Keywords: *remote monitoring, UAV, digital terrain model, waste landfill, residual capacity.*

References

1. Van Geel P. J., Murray K. E. Simulating settlement during waste placement at a landfill with waste lifts placed under frozen conditions // *Waste Management*. 2015. № 46. P. 352–361. (in English).
2. Chen Y.M., Zhan, L.T., Wei, H.Y., Ke, H. Aging and compressibility of municipal solid wastes // *Waste Management*. 2009. № 29 (1), P. 86–95 (in English).
3. Hunte C., Hettiaratchi, P., Meegoda, J.N., Hettiarachchi, C.H. Settlement of bioreactor landfills during filling operation // *Geoenvironmental Engineering*. 2007. P. 1–10. (in English).
4. Wall D. K., Zeiss, C. Municipal landfill biodegradation and settlement // *J. Environ. Eng.* 1995. № 121 (3). P. 214–224. (in English).
5. Ling H. I., Leshchinsky D., Mohri Y., Kawabata T. Estimation of municipal solid waste landfill settlement // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1998. № 124 (1). P. 21–28. (in English).
6. Esposito G. F. Matano M. Sacchi. Detection and Geometrical Characterization of a Buried Landfill Site by Integrating Land Use Historical Analysis, Digital Photogrammetry and Airborne Lidar Data // *Geosciences*. 2018. Vol.8(9). P. 348. (in English).
7. Yermolaev O. P., Usmanov B. M., Mishanina O. E., Khisamutdinova E. V. Basin approach to evaluation of human impact on the environment in oil production regions // *Neftyanoe Khozyaistvo - Oil Industry*. 2014. (12). P. 156-160. (in English).
8. Gasperini D. Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills // *International J. Environmental Technology and Management*. 2014. Vol.17(1). P. 1. (in English).
9. Baiocchi V. UAV for monitoring the settlement of a landfill // *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol.52(3). P.41–52. (in English).
10. Yoo H.T. A Preliminary Study on Disaster Waste Detection and Volume Estimation Based on 3D Spatial Information // *Computing in Civil Engineering 2017*. Seattle, Washington: American Society of Civil Engineers, 2017. P. 428–435. (in English).
11. Athirah A. A. Manganese Removal in Groundwater Treatment Using Marble // *International Journal of Integrated Engineering*. 2019. Vol. 11. № 2. (in English).
12. Silva da C.A., Duarte C.R., Souto M., Silva dos Santos A.L. et al. Evaluating the accuracy in volume calculation in a pile of waste using UAV, GNSS and LiDAR // *Boletim de Ciencias Geodesical*. 2016. Vol.22(1). P. 73–94. (in English).
13. Tucci G. Monitoring and Computation of the Volumes of Stockpiles of Bulk Material by Means of UAV Photogrammetric Surveying // *Remote Sensing*. 2019. Vol.11(12). P. 1471. (in English).

14. Son S. W. Integrating UAV and TLS Approaches for Environmental Management: A Case Study of a Waste Stockpile Area // Remote Sensing. 2020. Vol.12(10). P. 1615. (in English).
15. Incekara A. Investigating the Utility Potential of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicles in the Temporal Monitoring of a Landfill // International Journal of Geo-Information. 2019. Vol.8(1). P. 22. (in English).
16. Akhmetzyanova L.G., Usmanov B.M., Kuritsin I.N., Kuzmin R.S., Gafurov A.M., Sirotkin V.V. Application of aerial photography results, obtained using UAV data to estimate the residual capacity of the landfill. Practice of the Republic of Tatarstan // Bulletin of the Udmurt University. Biology series. Earth sciences. 2021. Vol. 31(4). P. 404-415. (in Russian)
17. Gafurov A.M., Yermolayev O.P., Usmanov B.M., Khomyakov P.V. Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV // InterCarto, InterGIS. 2021. Vol.27(2). P.327-339. (in English).

Поступила в редакцию 10.10.2022 г.