

¹Л.Г. Ахметзянова, ¹Б.М. Усманов, ¹М.Р. Зиннатов, ²И.Н. Курицин

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, leisan-ksu@mail.ru

²ООО «Рекульто»

КОНТРОЛЬ ЗАПОЛНЯЕМОСТИ ПОЛИГОНА ОТХОДОВ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ АЭРОФОТОСЪЁМКИ

В работе произведена оценка остаточной ёмкости полигона твёрдых коммунальных отходов, располагающегося на территории Республики Марий Эл, с использованием метода сравнительной высокоточной трехмерной реконструкции проектного и фактического рельефа полигона с построением его цифровых моделей на базе результатов аэрофотосъёмки территории. Функционирующий полигон размещается в отработанном карьере по добыче глины. Зона складирования отходов разделена на две карты, проектом предусмотрено поочередное заполнение карт. Надземная часть тела полигона запроектирована в виде усеченной пирамиды. Для решения поставленной цели был использован беспилотный летательный аппарат DJI Phantom 4, оснащённый приёмником глобальной спутниковой навигационной системы. Метод определения остаточной ёмкости полигона заключается в приведении проектных данных и результатов натурных обследований в одну систему координат и высот, что позволяет произвести расчёт разности объемов и оценить степень наполненности полигона. Фактическая площадь зоны захоронения полигона на 1.0 га меньше предусмотренной проектом (3.5 га), геометрические характеристики тела полигона также не соответствуют проектным данным. Накопленный на момент проведения съёмки объём ТБО (313204 м³) меньше предусмотренного проектом (380500 м³). В результате остаточная вместимость исследуемого полигона составила 67296 м³.

Ключевые слова: полигон отходов; остаточная ёмкость; рельеф; трехмерная реконструкция; цифровая модель рельефа.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.1.30.38>

Введение

Общая масса твёрдых коммунальных отходов (ТКО), захороненных в Российской Федерации в 2021 г., составила 44481.7 тыс. т. В Республике Марий Эл образование ТКО увеличилось на 17.4%, захоронению было подвергнуто 140237 т, что составило более 90% от общей массы образованных в республике коммунальных отходов (О состоянии ..., 2022). Эксплуатация полигонов ТКО для Республики Марий Эл, как и для других регионов Российской Федерации, имеет важное эколого-экономическое значение.

В процессе функционирования полигона коммунальных отходов в свалочной массе непрерывно идут процессы разложения органического вещества с выделением биогаза и фильтрата (Mondal et al., 2023; Santos et al., 2023), стабилизация свалочных масс занимает от 2 до 10 лет.

В ходе биodeградации органического вещества разлагается 40–60% захороненной органики (De et al., 2013; Scheutz et al., 2011), что приводит к изменению фактической высоты террикона и крутизны откосов на 25–50 % от значений, указанных

в проекте. Происходят изменения соотношения органических и неорганических фракций, уплотнение, потеря массы и объёма отходов (Мирный и др., 2012; Bareither et al., 2012; Chen et al., 2009).

Таким образом, для существующих полигонов расчётный проектный объём принимаемых коммунальных отходов может быть увеличен, а сроки его использования продлены без вовлечения новых земельных участков под их строительство (Висков, 2020).

Чаще всего необходимость оценки остаточной ёмкости возникает на стадии окончательного формирования пирамиды полигона. В этом случае оценить накопленный объём отходов на момент исследования можно либо путем отбора проб методом бурения с оценкой глубины складирования, либо расчетным методом. Проведение сплошного исследования методом бурения довольно дорогостоящая процедура, которая по факту дает информацию о глубине захоронения в нескольких точках.

Геоинформационные методы пространственного анализа широко используются для определе-

ния состояния полигонов ТКО. Наиболее распространенным методом является топографическая съёмка территории полигона с использованием таких геодезических инструментов, как нивелиры, тахеометры и лазерные сканеры (Babu et al., 2013; Gao et al., 2017).

Положительное влияние на улучшение экологической обстановки оказывают цифровые платформы, которые позволяют актуализировать информацию, полученную, в том числе, с беспилотников, и обеспечивают контроль за текущей ситуацией (Esposito et al., 2018; Gasperini, 2014; Gafurov et al., 2021; Yermolaev et al., 2014).

Все чаще для получения данных об изменении объемов отходов на полигонах ТКО используется съемка беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) с последующим получением 3D-моделей методом фотограмметрии (Baiocchi, 2019; Yoo, 2017). Интеграция технологий наземного лазерного сканирования (НЛС) и беспилотных летательных аппаратов демонстрирует высокую эффективность применения БПЛА, обеспечение высокой точности и эффективности вычисления объема отходов (Silva et al., 2016; Tucci, 2019; Son, 2020). Особенно привлекательным является использование недорогих дронов, которые позволяют получать точные модели полигонов и проводить повторную съемку, обеспечивая необходимыми данными для оценки остаточной ёмкости полигона (Insekaга, 2019). Подобное решение не требует больших вычислительных мощностей. Один из актуальных сценариев использования систем мониторинга – контроль заполняемости полигонов ТКО.

В связи с этим, целью данной работы является количественная оценка степени соответствия фактического состояния полигона ТКО Республики Марий Эл проектным геометрическим характеристикам с применением предложенного ранее метода (Ахметзянова и др., 2021, 2022) для возможности сопровождения технической эксплуатации инженерного сооружения. Основными задачами исследования являлись оцифровка графических материалов проекта и приведение проектных данных и результатов натурных обследований в единую систему координат и высот, расчет разности объемов и оценка степени наполненности полигона и его остаточной емкости.

Материалы и методы исследований

Объектом обследования является действующий полигон ТКО Республики Марий Эл. Под строительство исследуемого полигона был отведён земельный участок общей площадью 3.5 га. Полигон функционирует с 2001 г. и размещается

в отработанном карьере по добыче глины. Основание карьера глинистое, грунтовые воды отсутствуют. Рельеф участка спокойный с незначительным уклоном на юго-запад.

Зона складирования ТКО запроектирована в виде усеченной пирамиды – выше относительно отметки дневной поверхности и в виде котлована – ниже отметки дневной поверхности, занимает 96% от площади всего участка, представляет собой котлован глубиной до 10 м и разбита на две карты. Согласно проектным решениям, предусмотрено очередное заполнение карт. На территории объекта имеются административно-бытовые помещения, площадка для размещения техники. Вместимость рассматриваемого полигона определена с учётом складирования твёрдых коммунальных отходов на расчётный срок эксплуатации. Вместимость полигона, согласно проекту, составляет 380500 м³.

Прием ТКО ведется по объёму в неуплотненном состоянии. Плотность поступающих на полигон ТКО – 300 кг/м³. При соблюдении правил уплотнения объем отходов снижается в 2–2.5 раза. На момент обследования полигон работает, огорожен, охраняется. Общий вид полигона ТКО в современном состоянии представлен на рисунке 1.

Для оценки фактического состояния полигона в сентябре 2021 г. были проведены полевые и инструментальные работы. Метеорологические условия в зоне размещения на момент съемки имели следующие характеристики: переменная облачность, скорость ветра 5 м/с.

Аэрофотосъемка, фотограмметрическая обработка результатов и размещение опорных точек произведены в соответствии с действующими нормативными документами (ГОСТ Р 51833–2001, ГОСТ 32453–2017, ГОСТ Р 58854–2020).

Полевые работы производили с использованием БПЛА «DJI Phantom 4». Полет и съемку объектов исследования производили с помощью мобильного программного обеспечения DroneDeploy. При формировании полетного задания устанавливали высоту полета (50 м) над точкой взлета, продольное и поперечное перекрытие между соседними снимками составляло 75%.

Координаты выбранных пяти опорных точек определяли с применением приемника системы (ГНСС-приемник E-Survey) методом кинематика в реальном времени (RTK) с точностью 1–2 см. Данные с ГНСС-приемника были пересчитаны на основе данных с ближайшей к участку базовой станции сервиса высокоточного позиционирования. Среднеквадратические отклонения (СКО) уравнивания координат центров проекций снимков по осям X, Y, Z не превысили 1 см. Полученные

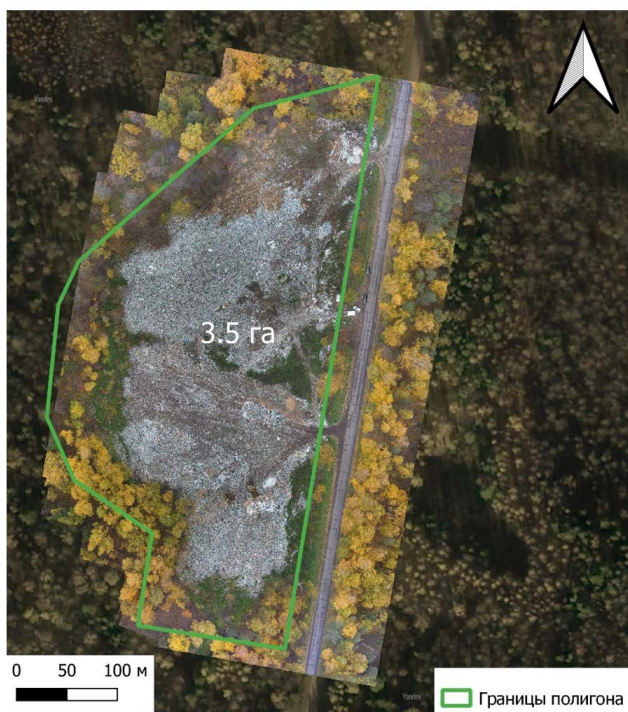


Рис. 1. Общий вид полигона
Fig. 1 General view of the landfill

координаты центров проекций снимков в дальнейшем сопоставляли с файлами снимков с БПЛА, после чего обрабатывали в фотограмметрическом программном обеспечении Agisoft Metashape. Расчёты проводили в компьютерных программах Agisoft PhotoScan и Golden Software Surfer 19.

Далее методом фототриангуляции было создано плотное облако точек, а также разработана цифровая модель рельефа (ЦМР) и ортофотоплан для территории размещения полигона на момент проектирования и натурных инструментальных исследований. Ортофотопланы изготовлены в электронном виде в системе координат UTM зона 39 (север). Разрешение ортофотопланов составило 0.15 м.

Построение карт рельефа по облаку точек, цифровые модели проектного и фактического рельефа и поперечные профили через площадь захоронения выполняли в программе Surfer 15, цифровую модель рельефа – с шагом 0.25 м.

Результаты и их обсуждение

Для оценки остаточной вместимости полигона отходов прежде всего была произведена оцифровка проектных материалов строительства полигона ТКО с последующим построением модели проектной пирамиды полигона. Основным источником для построения 3D-модели проектной пирамиды полигона являлись схемы, содержащие проектные геометрические характеристики зоны захоронения (рис. 2).

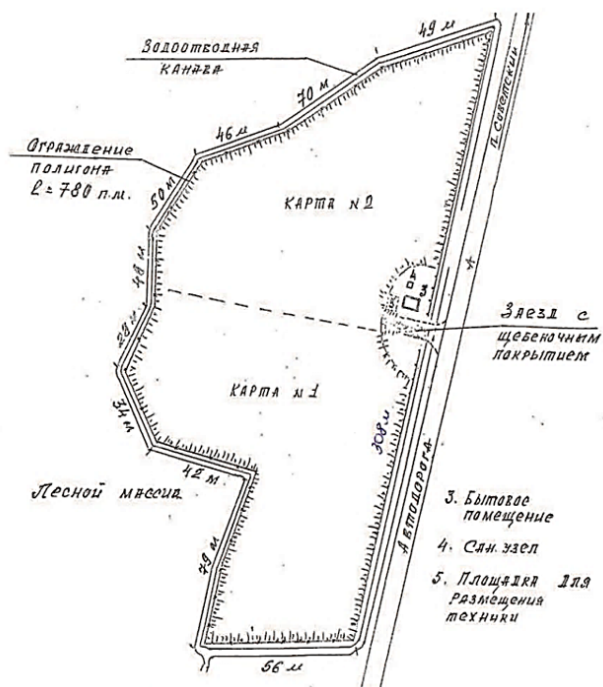


Рис. 2. Проектные характеристики полигона
Fig. 2. Design characteristics of the landfill location

Сопоставление проектных данных и результатов исследования современного состояния полигона было осуществлено путем пространственной привязки проектных схем средствами QGIS (модуль Georeferencing). В качестве опорных точек использовали поворотные точки границы участка и сооружения, фигурирующие на проектных данных и на момент съёмки полигона. При привязке проводили контроль размеров полигона, указанных на схемах.

После привязки провели оцифровку схем с учетом высотных характеристик зоны складирования. Помимо котлована и пирамиды векторизовали рельеф за пределами зоны складирования. На основании полученных данных построили цифровую модель проектной зоны складирования (рис. 3).

По результатам обработки проектных данных была построена объёмная модель тела исследуемого полигона, а также карта рельефа надземной части проектной пирамиды захоронения. По проектным данным, высота площадки пирамиды захоронения должна находиться на 128 абс. м, высота надземной части пирамиды должна составлять от 4 м на западе и 2 м на востоке.

Переходя к результатам полевого обследования территории, отметим, что фактическая площадь зоны захоронения полигона составила 2.5 га, что на 1.0 га меньше, чем по соответствующим проектным данным (3.5 га). Следовательно, отходы складировались не по всей территории, запланированной по проекту. Расстояние от основания фак-

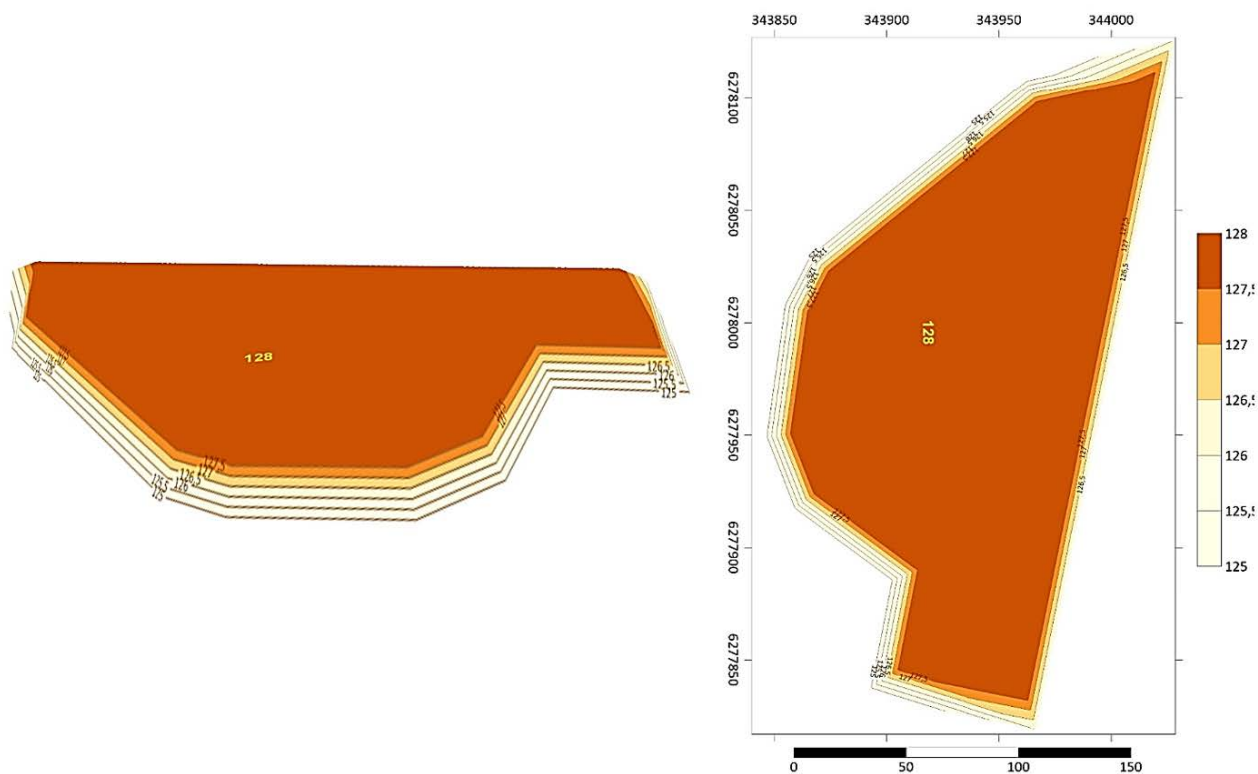


Рис. 3. Модель и карта рельефа проектной надземной части полигона
Fig. 3. Model and relief map of the aboveground part of the landfill

тической надземной части полигона до разрешенной границы зоны складирования варьирует от 12 м на северной и северо-западной границах и до 40 м на западной границе.

В восточной части территории отходы складываются вдоль дороги, не примыкая вплотную к

ограждению. По остальному периметру полигона имеется незаполненное пространство, не используемое на момент наблюдения под складирование отходов и представляющее собой понижение в рельефе глубиной от 1 до 4 м, поскольку полигон спроектирован под размещение в старом карьере.

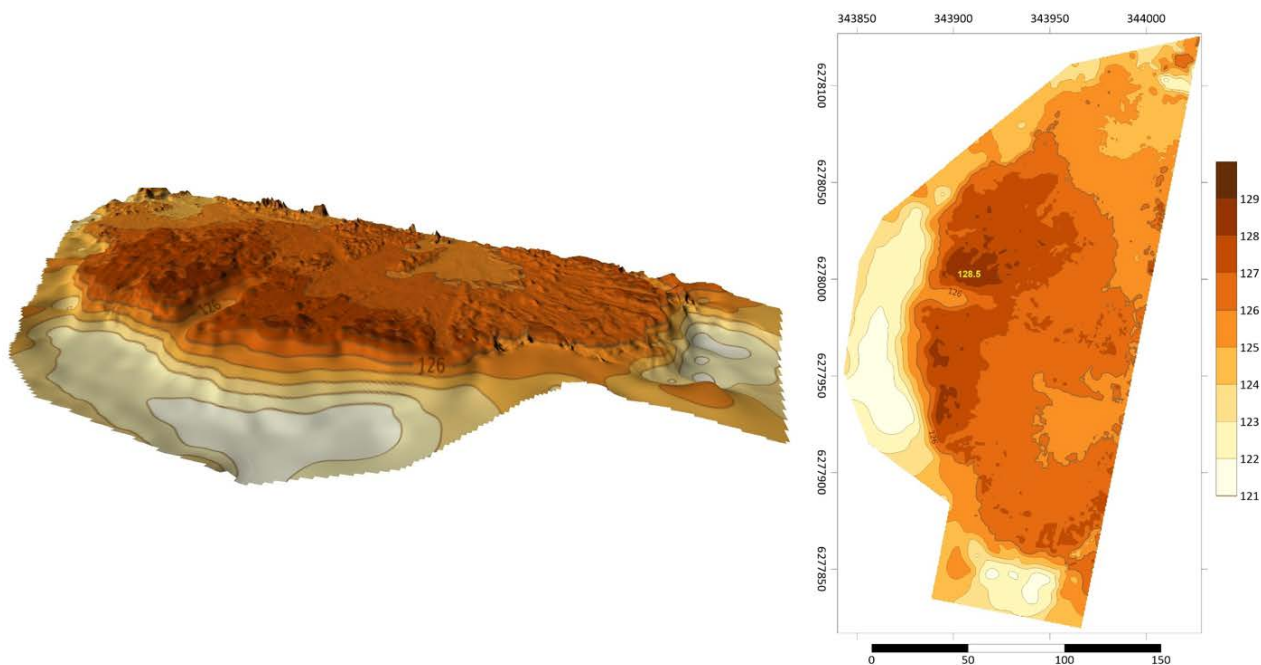


Рис. 4. Объемная модель и карта рельефа территории полигона на момент исследования
Fig. 4. Volumetric model and terrain map of the landfill on the moment of the study

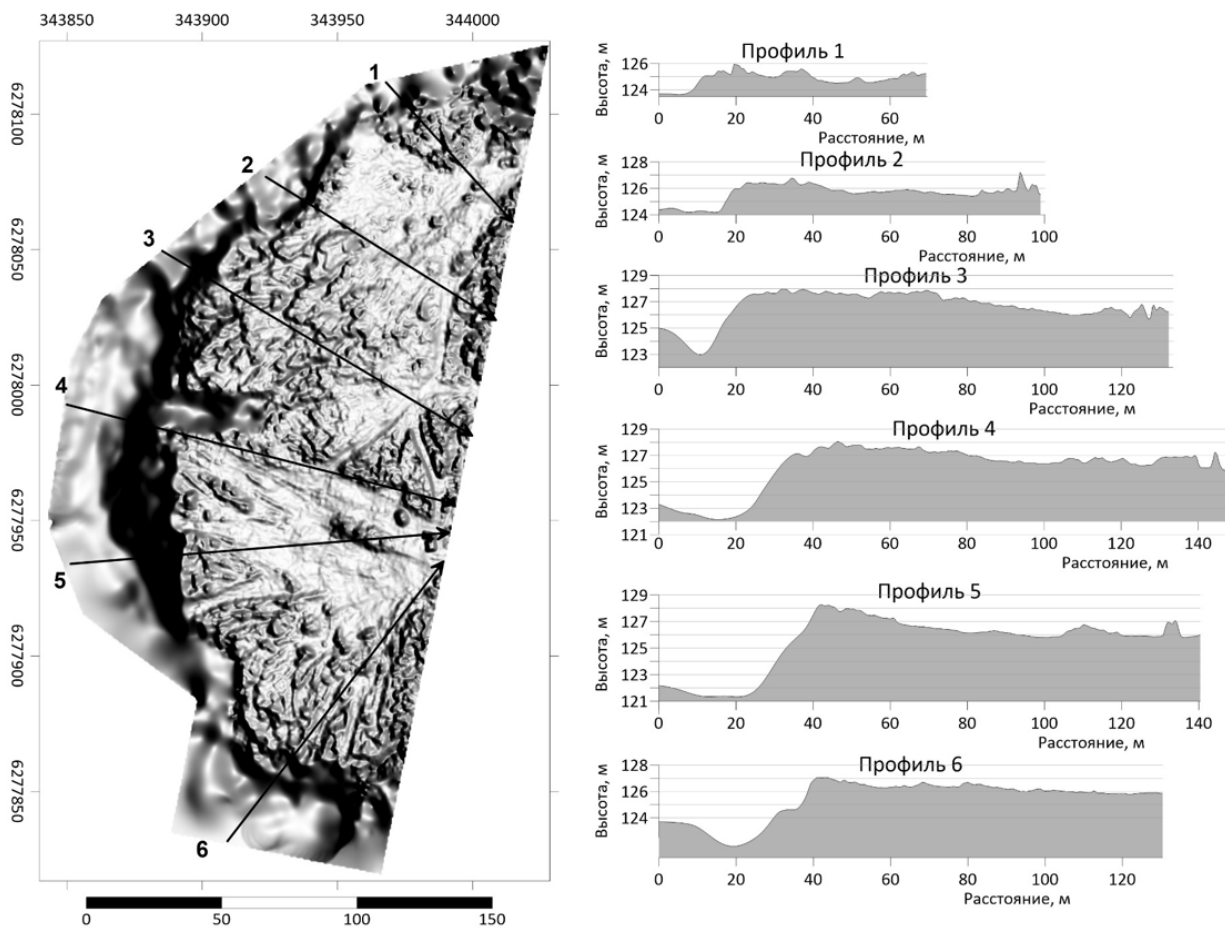


Рис. 5. Цифровая модель рельефа и поперечные профили через пирамиду полигона
Fig. 5. Digital relief model and transverse profiles through the landfill burial pyramid

Результаты полевых исследований позволяют детально описать рельеф зоны захоронения и сопоставить высотные характеристики с проектными данными. Так, согласно результатам обработки данных аэрофотосъёмки, полигон заполнен до отметок 124.5-128.0 абс. м с минимальными высотами северной и восточной части и максимальными в западной части зоны захоронения. Основание наземной части захоронения располагается на отметке 124 абс. м, в восточной части – 125.5 абс. м. Высота пирамиды захоронения плавно увеличивается в западном направлении и имеет отметки 3–4 м на западе, 2–3 м на юге и 1 м на севере. Максимальная высота составила 128.5 абс. м (4.5 м относительно западной стороны и 2.5 м относительно восточной). Заложение внешних откосов в восточной части составляет 1:2.5, что не соответствует проектным данным (1:4).

Для оценки остаточной емкости полигона захоронения ТКО в данной работе использован предложенный ранее (Ахметзянова и др., 2021, 2022) метод сравнительной высокоточной трехмерной реконструкции проектного и фактического рельефа полигона отходов с построением его цифро-

вых моделей на базе результатов аэрофотосъёмки территории.

После фотограмметрической обработки результатов аэрофотосъёмки территории исследуемого полигона отходов, построения цифровых моделей рельефа и приведения проектных и фактических данных в единую систему координат появляется возможность оценить степень наполненности полигона и его остаточную ёмкость.

В том случае, если полигон организован согласно проекту, то привязку к местности проводят с помощью опорных точек, в качестве которых могут выступать элементы капитальных конструкций. В нашем случае при отсутствии последних была использована привязка путём нахождения общих точек на цифровой модели рельефа территории на момент проектирования полигона и современных полевых исследований. В процессе приведения проектных схем организации полигона в мировую систему координат обязательным условием является сохранение геометрии и размеров зоны складирования. Поэтому при привязке схем контролировали сохранение размеров и площадей, указанных в проекте. Построенная цифровая мо-

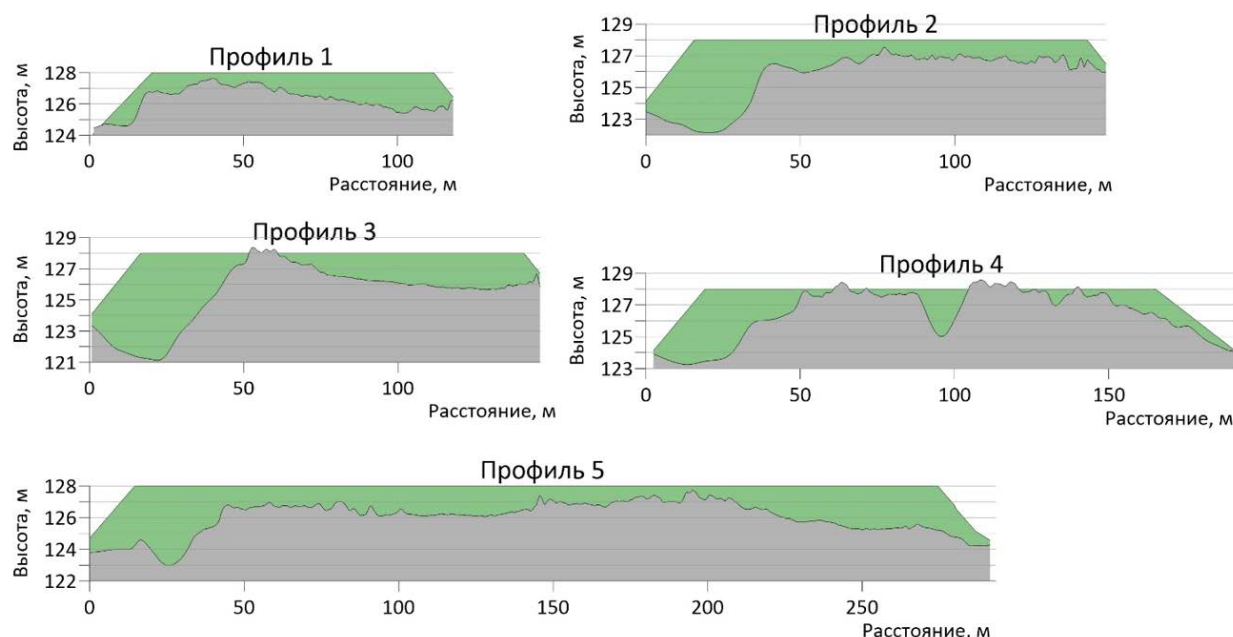


Рис. 6. Профили проектной и фактической пирамиды захоронения полигона (серый – фактическое, зеленый – проектное расположение тела полигона)
 Fig. 6. Profiles of the design and actual pyramid of landfill (gray – the actual, green – the design location of the landfill body)

дель рельефа надземной части зоны захоронения приведена на рисунке 5.

Построение профилей через зону складирования позволяет получить визуализацию различия морфометрических характеристик цифровых моделей проектного и фактического рельефа (рис. 6). Сопоставление цифровых моделей демонстрирует различия зон складирования и позволяет оценить ситуацию на каждом участке полигона.

На двух локальных участках имеет место незначительное превышение фактических высот относительно предполагаемого проектного уровня – не более 0.5 м. Относительно самой низкой точки полигона до проектной отметки осталось 7 м, от тела существующего полигона – в среднем 2 м.

В случае, когда зона складирования организована без нарушений и полевые исследования подтверждают организацию полигона в соответствии с проектом, для вычисления остаточного объема достаточно «вычесть» высоту фактического рельефа из соответствующего значения, предусмотренного проектом. Поскольку для данного объекта выход свалочных масс за проектные границы зоны складирования не зафиксирован, то оценку остаточной емкости полигона производили указанным выше способом. Согласно полученным данным, накопленный на момент проведения съемки объем ТКО (313204 м³) меньше предусмотренного проектом (380500 м³). По результатам поведенных расчётов остаточная емкость полигона составила 67296 м³.

В момент проведения обследования полигон твердых коммунальных отходов функционирует, на объекте продолжается прием отходов. При этом объем накопленных отходов приближается к проектным значениям. В результате протекания процессов деградации органического вещества и уплотнения свалочных масс возникает дополнительный объем надземной части пирамиды полигона, скорость заполнения полигона снижается, что позволяет увеличить проектный срок эксплуатации данного объекта с учетом изменений, происходящих в жизненном цикле полигона.

Заключение

Таким образом, на базе результатов полевого обследования территории и построения цифровых моделей рельефа ландшафтов получены объективные данные текущего фактического состояния полигона ТКО Республики Марий Эл и выявлено их достоверное несоответствие проектным решениям в части срока службы полигона как природоохранного сооружения. Проведенные исследования позволяют заключить, что использованный в работе метод сравнительной трехмерной реконструкции рельефа полигона отходов (Ахметзянова и др., 2021, 2022) обеспечивает построение высокоточных и корректных цифровых моделей рельефа, что позволяет осуществлять грамотное, обоснованное и своевременное регулирование работы полигонов отходов, минимизировать негативные последствия их воздействия на

окружающую среду, а также выработать рекомендации по приведению полигона в соответствии с проектными решениями.

Исследования выполнялись за счёт средств субсидий, выделенных Казанскому (Приволжскому) федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003.

Список литературы

1. Ахметзянова Л.Г., Усманов Б.М., Курицин И.Н., Кузьмин Р.С., Гафуров А.М. Оценка остаточной емкости полигона отходов с использованием данных БПЛА // *Материалы 65-й Международной научной конференции Астраханского государственного технического университета. Секция Биология и природопользование. Астрахань, 2021. С. 155–158.*
2. Ахметзянова Л.Г., Усманов Б.М., Гафуров А.М., Селиванова Д.С. Применение дистанционного метода контроля, основанного на использовании данных БПЛА, для оценки остаточной емкости полигона отходов // *Геополитика и экогеодинамика регионов. 2022. Т. 8, вып. 4. С. 94–103. doi: 10.35634/2412-9518-2021-31-4-404-415*
3. Висков М.В. Изменение емкости массива захоронения отходов в процессе эксплуатации объектов захоронения твердых коммунальных отходов // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2020. №1. С. 126–134. doi: 10.35634/2412-9518-2021-31-4-404-415*
4. ГОСТ Р 51833–2001. Фотограмметрия. Термины и определения.
5. ГОСТ 32453–2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек.
6. ГОСТ Р 58854–2020. Фотограмметрия. Требования к созданию ориентированных аэроснимков для построения стереомоделей застроенных территорий.
7. Мирный А.Н., Мурашов В.Е., Корецкий В.Е. Государственное управление отходами в рамках концепции устойчивого развития. М.: Академия коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова, 2012. 351 с.
8. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. 685 с.
9. Babu G., Kumar S., Reddy K.R. Approach for the use of MSW settlement predictions in the assessment of landfill capacity based on reliability analysis // *Waste management. 2013. Vol. 33, №10. P. 2029–2034. doi: 10.1016/j.wasman.2013.05.018.*
10. Baiocchi V. UAV for monitoring the settlement of a landfill // *European journal of remote sensing. 2019. Vol. 52, №3. P. 41–52. doi: 10.1080/22797254.2019.1683471.*
11. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Compression behavior of municipal solid waste: immediate compression // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2012. Vol. 138, №9. P. 1047–1062. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000672.*
12. Chen Y.M., Zhan L.T., Wei H.Y., Ke H. Aging and compressibility of municipal solid wastes // *Waste management. 2009. Vol. 29, №1. P. 86–95. doi: 10.1016/j.wasman.2008.02.024.*
13. De F.B., Chanton J.P., Barlaz M.A. Measurement of carbon storage in landfills from the biogenic carbon content of excavated waste samples // *Waste management. 2013. Vol. 33, №10. P. 2001–2005. doi: 10.1016/j.wasman.2012.12.012.*
14. Esposito G.F., Matano F., Sacchi M. 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. 348. doi: 10.3390/geosciences8090348.*

15. Gafurov A. The methodological aspects of constructing a high-resolution DEM of large territories using low-cost UAVs on the example of the Sarycum Aeolian complex, Dagestan, Russia // *Drones. 2021. Vol. 5, iss.1. P. 1–17. doi: 10.3390/drones5010007.*

16. Gafurov A., Yermolaev O., Usmanov B., Khomyakov P. Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV // *InterCarto InterGIS. 2021. T. 27, №2. P. 327–339. doi: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339*

17. Gao W., Xu W., Bian X., Chen Y. A practical approach for calculating the settlement and storage capacity of landfills based on the space and time discretization of the landfilling process // *Waste management. 2017. Vol. 69. P. 202–214. doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.048.*

18. Gasperini D. Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills // *International journal of environmental technology and management. 2014. Vol. 17, №1. P. 1–13. doi: 10.1504/IJETM.2014.059456*

19. Incekar A. Investigating the utility potential of low-cost unmanned aerial vehicles in the temporal monitoring of a landfill // *ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8, №1. P. 22. doi: 10.3390/ijgi8010022.*

20. Mondal T., Choudhury M., Kundu D., Dutta D., Samanta P. Landfill: An eclectic review on structure, reactions and remediation approach // *Waste management. 2023. Vol. 164. P. 127–142. doi: 10.1016/j.wasman.2023.03.034.*

21. Santos J., Amaral L., Martinho G. Effects of landfill age, climate, and size on leachate from urban waste landfills in Portugal: A statistics and machine learning analysis // *Waste management. 2023. Vol. 172. P. 192–207. doi: 10.1016/j.wasman.2023.10.027.*

22. Scheutz C., Samuelsson J., Fredenslund A.M., Kjeldsen P. Quantification of multiple methane emission sources at landfills using a double tracer technique // *Waste management. 2011. Vol. 31, №5. P. 1009–1017. doi: 10.1016/j.wasman.2011.01.015.*

23. Silva C.A., Duarte C.R., Souto M.V., Santos A.L., Amaro V.E., Bicho C.P., Sabadia J.A. Evaluating the accuracy in volume calculation in a pile of waste using UAV, GNSS and LiDAR // *Boletim de ciências geodésicas. 2016. Vol. 22, №1. P. 73–94. doi: 10.1590/S1982-21702016000100005*

24. 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. 1615. doi: 10.3390/rs12101615*

25. 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. 1471. doi: 10.3390/rs11121471.*

26. 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. Vol. 12. P. 156–160.*

27. 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. doi: 10.1061/9780784480823.051.*

References

1. Akhmetzyanova L.G., Usmanov D.M., Kuritsin I.N., Kuz'min R.S., Gafurov A.M. Otsenka ostatochnoj yomkosti poligona otkhodov s ispol'zovaniem dannykh BPLA [Assessment of the residual capacity of the landfill using UAV data] // *Materials of the 65th International scientific conference of Astrakhan state*

technical university. Biology and Environmental Management section. Astrakhan, 2021. P. 155-158.

2. Akhmetzyanova L.G., Usmanov D.M., Gafurov A.M., Selivanova D.S. Primenenie distancionnogo metoda kontrolya, osnovannogo na ispol'zovanii dannyh BPLA, dlya ocenki ostanochnoj emkosti poligona otkhodov [The use of a remote control method based on UAV data to assess the residual capacity of a landfill] // *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and ecogeodynamics of regions]. 2022. Vol. 8, iss. 4. P. 94–103. doi: 10.35634/2412-9518-2021-31-4-404-415

3. Viskov M.V. Izmenenie yomkosti massiva zakhoronenija otkhodov v protsesse ekspluatatsii ob'ektov zakhoronenija tverdyykh kommunal'nykh otkhodov [Changing the capacity of the waste disposal array during the operation of municipal solid waste disposal facilities] // *Vestnik PNP. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika* [Bulletin of PNRPU. Applied ecology. Urbanistics]. 2020. No 1. P. 126–134. doi: 10.15593/2409-5125/2020.01.10

4. GOST R 51833–2001. Fotogrammetriya. Terminy i opredeleniya [Photogrammetry. Terms and definitions].

5. GOST 32453–2017. Global'naya navigacionnaya sputnikovaya sistema. Sistemy koordinat. Metody preobrazovaniy koordinat opredelyaemyh tochk. [Global navigation satellite system. Coordinate systems. Methods of transformation of coordinates of defined points].

6. GOST R 58854–2020. Fotogrammetriya. Trebovaniya k sozdaniyu orientirovannykh aerosnimkov dlya postroeniya stereo-modelej zastroennykh territorij [Photogrammetry. Requirements for the creation of oriented aerial photographs for the construction of stereo models of built-up areas].

7. Mirnyj A.N., Murashov V.E., Koretskiy V.E. Gosudarstvennoe upravlenie otkhodami v ramkakh kontseptsii ustojchivogo razvitiya [State waste management within the framework of the concept of sustainable development. Moscow, 2012. 351 p.

8. O sostojanii b ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2021 godu. Gosudarstvennyj doklad [On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2021. State report]. Moscow, 2022. 685 p.

9. Babu G., Kumar S., Reddy K.R. Approach for the use of MSW settlement predictions in the assessment of landfill capacity based on reliability analysis // *Waste management*. 2013. Vol. 33, No 10. P. 2029–2034. doi: 10.1016/j.wasman.2013.05.018.

10. Baiocchi V. UAV for monitoring the settlement of a landfill // *European journal of remote sensing*. 2019. Vol. 52, No 3. P. 41–52. doi: 10.1080/22797254.2019.1683471.

11. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Compression behavior of municipal solid waste: immediate compression // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2012. Vol. 138, No 9. P. 1047–1062. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000672.

12. Chen Y.M., Zhan L.T., Wei H.Y., Ke H. Aging and compressibility of municipal solid wastes // *Waste management*. 2009. Vol. 29, No 1. P. 86–95. doi: 10.1016/j.wasman.2008.02.024.

13. De F.B., Chanton J.P., Barlaz M.A. Measurement of carbon storage in landfills from the biogenic carbon content of excavated waste samples // *Waste management*. 2013. Vol. 33, No 10. P. 2001–2005. doi: 10.1016/j.wasman.2012.12.012.

14. Esposito G.F., Matano F., Sacchi M. 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. 348. doi: 10.3390/geosciences8090348.

15. Gafurov A. The methodological aspects of constructing a high-resolution DEM of large territories using low-cost UAVs on the example of the Sarycum Aeolian complex, Dagestan, Russia // *Drones*. 2021. Vol. 5, iss.1. P. 1–17. doi: 10.3390/drones5010007.

16. Gafurov A., Yermolaev O., Usmanov B., Khomyakov

P. Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV // *InterCarto InterGIS*. 2021. T. 27, No 2. P. 327–339. doi: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339

17. Gao W., Xu W., Bian X., Chen Y. A practical approach for calculating the settlement and storage capacity of landfills based on the space and time discretization of the landfilling process // *Waste management*. 2017. Vol. 69. P. 202–214. doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.048.

18. Gasperini D. Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills // *International journal of environmental technology and management*. 2014. Vol. 17, No 1. P. 1–13. doi: 10.1504/IJETM.2014.059456

19. Incekara A. Investigating the utility potential of low-cost unmanned aerial vehicles in the temporal monitoring of a landfill // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019. Vol. 8, №1. P. 22. doi: 10.3390/ijgi8010022.

20. Mondal T., Choudhury M., Kundu D., Dutta D., Samanta P. Landfill: An eclectic review on structure, reactions and remediation approach // *Waste management*. 2023. Vol. 164. P. 127–142. doi: 10.1016/j.wasman.2023.03.034.

21. Santos J., Amaral L., Martinho G. Effects of landfill age, climate, and size on leachate from urban waste landfills in Portugal: A statistics and machine learning analysis // *Waste management*. 2023. Vol. 172. P. 192–207. doi: 10.1016/j.wasman.2023.10.027.

22. Scheutz C., Samuelsson J., Fredenslund A.M., Kjeldsen P. Quantification of multiple methane emission sources at landfills using a double tracer technique // *Waste management*. 2011. Vol. 31, No 5. P. 1009–1017. doi: 10.1016/j.wasman.2011.01.015.

23. Silva C.A., Duarte C.R., Souto M.V., Santos A.L., Amaro V.E., Bicho C.P., Sabadia J.A. Evaluating the accuracy in volume calculation in a pile of waste using UAV, GNSS and LiDAR // *Boletim de ciencias geodésicas*. 2016. Vol. 22, №1. P. 73–94. doi: 10.1590/S1982-21702016000100005

24. Son S.W. Integrating UAV and TLS Approaches for environmental management: a case study of a Waste Stockpile Area // *Remote sensing*. 2020. Vol. 12, No 10. 1615. doi: 10.3390/rs12101615

25. Tucci G. Monitoring and computation of the volumes of stockpiles of bulk material by means of UAV photogrammetric surveying // *Remote sensing*. 2019. Vol. 11, No 12. 1471. doi: 10.3390/rs11121471.

26. 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. Vol. 12. P. 156–160.

27. 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. doi: 10.1061/9780784480823.051.

Akhmetzyanova L.G., Usmanov B.M., Zinnatov M.R., Kuritsyn I.N. **Control of the occupancy of the landfill of the Mari El Republic using the results of aerial photography.**

The paper presents an assessment of the residual capacity of a municipal solid waste landfill located in the Republic of Mari El. We used the method of comparative high-precision three-dimensional recon-

struction of the design and actual relief of the landfill with the construction of its digital models based on the results of aerial photography of the territory. The landfill operates and is located in a spent clay quarry. The waste storage area is divided into two maps, the project provides for alternate filling of maps. The aboveground part of the polygon body is designed in the form of a truncated pyramid. Taking into account the forecasted filling conditions, the design capacity of the landfill is 380500 m³. To achieve our task, the DJI Phantom 4 unmanned aerial vehicle equipped with a receiver of the global satellite navigation system was used. The method of determining the residual capacity of the landfill consists in carrying out design

data and the results of field surveys in one coordinate system and heights, it allows us to calculate the volume difference and assess the degree of fullness of the landfill. According to the data obtained, the actual area of the landfill burial area is less than the project one (3.5 ha) for 1.0 ha. The geometric characteristics of the polygon body also do not correspond to the design data. The volume of solid waste accumulated at the time of the survey (313204 m³) is less than that provided for by the project (380500 m³). The residual capacity of the test site was 67296 m³.

Keywords: landfill; residual capacity; relief; three-dimensional reconstruction; digital terrain model.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 23.01.2024

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 02.02.2024

Принята к публикации / Accepted for publication: 09.02.2024

Информация об авторах

Ахметзянова Лейсан Габбасовна, кандидат биологических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: leisan-ksu@mail.ru.

Усманов Булат Мансурович, старший преподаватель, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: busmanof@kpfu.ru.

Зиннатов Марат Рифатович, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: mzinn424@gmail.com.

Курицин Иван Николаевич, кандидат биологических наук, эколог-аудитор, ООО «Рекульто», 420097, Россия, г. Казань, ул. Вишневого, 26, E-mail: ivan-kuritsin@yandex.ru.

Information about the authors

Leisan G. Akhmetzyanova, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: leisan-ksu@mail.ru.

Bulat M. Usmanov, Senior Lecturer, Kazan Federal University, 5, Tovarisheskaya st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: busmanof@kpfu.ru.

Marat R. Zinnatov, Postgraduate Student, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: mzinn424@gmail.com.

Ivan N. Kuritsyn, Ph.D. in Biology, Ecologist-auditor, LLC «Reculto», 26, Vishnevsky st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: ivan-kuritsin@yandex.ru.

