

УДК 528.7:504.064.47(470.41)(045)

*Л.Г. Ахметзянова, Б.М. Усманов, И.Н. Курицин, Р.С. Кузьмин, А.М. Гафуров, В.В. Сироткин***ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ БПЛА, ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ ЕМКОСТИ ПОЛИГОНА ОТХОДОВ НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

В работе на примере полигона твердых коммунальных отходов (ТКО), располагающегося на территории Республики Татарстан, произведена оценка остаточной емкости. Для решения поставленной задачи были использованы современные методы высокоточной трехмерной реконструкции на основе съемки с беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4, оснащенного приемником глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС-приемник). В результате приведения проектных данных и данных натурных обследований в одну систему координат и высот, реконструкции проектных подземной и наземной части захоронения ТКО рассчитаны разности моделей и остаточная емкость полигона. По состоянию на июль 2020 г. остаточная вместимость исследуемого полигона составляет 41,2 % от проектной вместимости, что позволяет продолжать эксплуатировать данный объект размещения отходов. Предложенный подход позволяет быстро и качественно осуществлять активный мониторинг инженерного сооружения. Примененный метод позволяет получить объективные данные текущего фактического состояния полигона отходов, это позволит минимизировать негативные последствия воздействия на окружающую среду и спрогнозировать выход на проектную емкость гораздо точнее.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, беспилотный летательный аппарат, цифровая модель рельефа, полигон отходов, остаточная емкость.

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-4-404-415

В 2020 г. по данным Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан на территории республики было образовано 4191,4 тыс. тонн отходов производства и потребления. Утилизации и обезвреживанию подвергнуто 3089,4 тыс. тонн отходов. Вывезено для размещения на полигоны 1457,6 тыс. тонн отходов¹.

Принципиальная схема организации полигонов отходов достаточно однообразна. Полигон отходов представляет собой инженерное сооружение, в основании которого используются естественные или искусственные понижения рельефа (карьеры, котлованы). Мусор свозится на участки полигона, рассыпается ровным слоем, уплотняется механически с помощью техники. В ходе складирования мусор переслаивается инертным грунтом и в результате образуется «слоеный пирог», высота которого часто достигает 40-60 м. После заполнения полигона поверхность захороненных отходов засыпается сверху гидроизоляционным грунтом и слоем почвы, который засеивается травосмесью, либо со временем зарастает травой и мелким кустарником.

В отходах, подлежащих размещению и захоронению на полигонах по-прежнему достаточно высока доля отходов, содержащих большое количество органических соединений. Многие из них разлагаются достаточно быстро, на деградацию других требуется несколько лет [1]. В теле свалок, подобно ферментеру, постоянно протекают процессы разложения органического вещества отходов с выделением биогаза и фильтрата [2-4]. Биодegradации подвергаются как вновь поступающие отходы, так и накопленные в предыдущие периоды функционирования. При таком способе утилизации мусора в ходе биодegradации органического вещества разлагается 40–60 % захороненной органики [5; 6].

В мире большое внимание уделяется изучению эмиссии образующихся в теле полигона токсиантов [7]. Многочисленные долгопериодные наблюдения за полигонами отходов свидетельствуют не только о негативном их влиянии на окружающую среду, но и об изменении морфологического состава, соотношения органических и неорганических фракций отходов, потери массы и объема, уплотнения масс отходов [8-11].

Твердые коммунальные отходы обладают высокой способностью к сжимаемости и уплотнению (прессуемости), которое может быть вполне значительным под влиянием давления свалочных масс, техники, а также биодegradации [9; 12]. Конечные изменения в вертикальной структуре полигона могут

¹ Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 г. Казань, 2021. С.159-193. URL: https://eco.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2856746.pdf.

составлять 25–50 % от исходных значений [13;14]. Процессы биодegradации и стабилизации мусорных масс могут продолжаться на протяжении нескольких лет.

Одной из положительных перспектив для данного способа утилизации отходов может явиться то, что полигон может увеличить свою расчетную емкость, что позволит продлить сроки его использования без вовлечения новых участков под строительство полигонов [15].

Полигон коммунальных отходов является динамически изменяющейся системой, контроль за которой необходим в целях эффективного функционирования системы управления обращения с отходами муниципальных образований. Система управления отходами должна учитывать сложные взаимодействия ее компонентов, непосредственно связанных с экологическими последствиями, а именно: баланс масс (поступление и выделение вещества), финансовые и логистические затраты, использование земельных ресурсов [16;17].

Изучение и оценка результатов процессов связанными с «жизнью» тела полигона, позволит осуществлять эффективную политику управления системы обращения с твердыми коммунальными отходами с наименьшими последствиями для окружающей среды. Большое практическое значение имеет определение фактических геометрических параметров полигона, потери массы отходов массива захоронения отходов, так как количественная оценка свободного объема участка захоронения позволит более точно оценить достижение проектных размеров полигона и срок его дальнейшей эксплуатации.

Существующие методические подходы к оценке изменения геометрических характеристик массива отходов не дают точного значения осадков. Полученные расчетные значения всегда ниже реальных, соответственно, свободный объем больше [18;19]. Расчетные модели рекомендуют применять для ориентировочной оценки осадков массива отходов, при этом эта оценка будет всегда обладать некоторым «запасным объемом». Использование моделей для краткосрочного периода нецелесообразно, это обусловлено тем, что отходы находятся в массиве непродолжительное время и процессы их преобразования не завершены [20].

Геоинформационные методы пространственного анализа широко используются для определения состояния полигонов ТКО. Так, коллективом итальянских ученых используется сравнительный анализ топографических карт и аэрофотоснимков [21]. Более точные результаты позволяют получить современные полевые методы исследования [22]. Весьма интересным является способ определения объемов отходов по данным долгосрочного мониторинга полигона с использованием стереокамеры, установленной на столбе [23]. 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) [24]. Все чаще для получения данных об изменении объемов отходов на полигонах ТКО используется съемка беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с последующим получением 3D-моделей методом фотограмметрии [25; 26]. Интеграция технологий наземного лазерного сканирования (НЛС) и беспилотных летательных аппаратов демонстрирует высокую эффективность метода БПЛА, который обеспечивает высокую точность и эффективность вычисления объема отходов [27-29]. Особенно привлекательным является использование недорогих дронов, которые позволяют получать точные модели полигонов и проводить повторную съемку, обеспечивая необходимыми данными для оценки остаточной емкости [30].

Материалы и методы исследований

В данной статье отражены работы по отработке методики оценки остаточной емкости на основе данных, полученных БПЛА на примере действующего полигона твердых коммунальных отходов (ТКО). Под его строительство был отведен земельный участок общей площадью 8,2 га. Полигон размещается в бывшем карьере глины с планировкой дна и расширением котлована на весь объем. Вместимость проектируемого полигона определена в проекте с учётом складирования твердых коммунальных отходов на расчётный срок эксплуатации, равный 15 годам. Фактическая вместимость полигона из условия заложения внешних откосов 1:4 м составляет 373000 м³.

Зона складирования ТКО запроектирована в виде холма – выше относительно отметки дневной поверхности и в виде котлована – ниже отметки дневной поверхности. Согласно проекту, полигон имеет полную высоту, равную 18,0 м, в том числе 12 м над поверхностью земли, глубина котлована в основании полигона составляет 6,0 м. В холме складирования предусматривается укладка отходов в восемь слоев по высоте. Высота каждого слоя 2,0 м, высота изолирующего слоя грунта 0,25 м.

На полигоне выполняются следующие основные работы: прием, складирование, уплотнение, изоляция ТКО. Прием ТКО ведется по объему в неуплотненном состоянии. Плотность поступающих на полигон ТКО – 300 кг/м^3 . При соблюдении правил уплотнения ТКО, уложенный за сутки на рабочую карту объем в 2–2,5 раза меньше объема доставляемых на полигон отходов. На момент обследования (июль 2020 г.) полигон работает, огорожен, охраняется. Общий вид полигона ТКО в современном состоянии представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид полигона ТКО

На первом этапе исследования была произведена обработка проектных материалов строительства полигона ТКО. Основным источником для построения 3D-модели проектного холма полигона являлись схемы, содержащие проектные геометрические характеристики зоны захоронения (рис.2).

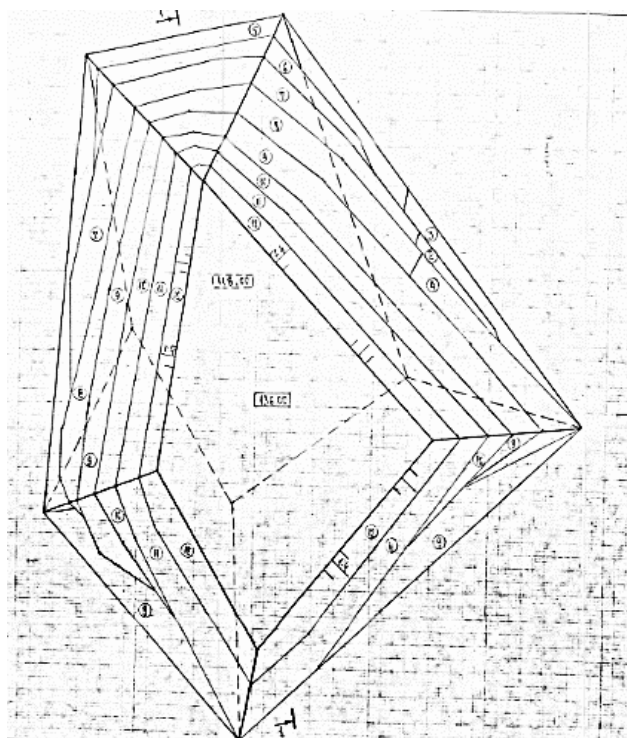


Рис. 2. Проектные геометрические характеристики пирамиды

Для сопоставления проектных данных с современным состоянием полигона была осуществлена пространственная привязка сканов проектных схем средствами QGIS (модуль Georeferencing). В качестве опорных точек использовались поворотные точки границы участка (ограждения) и сооружения, фигурирующие на проектных данных и на момент съемки полигона. При привязке проводился контроль размеров полигона, указанных на схемах. После привязки проводилась оцифровка схем с учетом высотных характеристик зоны складирования. Кроме котлована и пирамиды, векторизовался рельеф за пределами зоны складирования для сопоставления с современной ситуацией. На основании полученных данных строилась цифровая модель зоны складирования в соответствии с проектом (рис. 3).

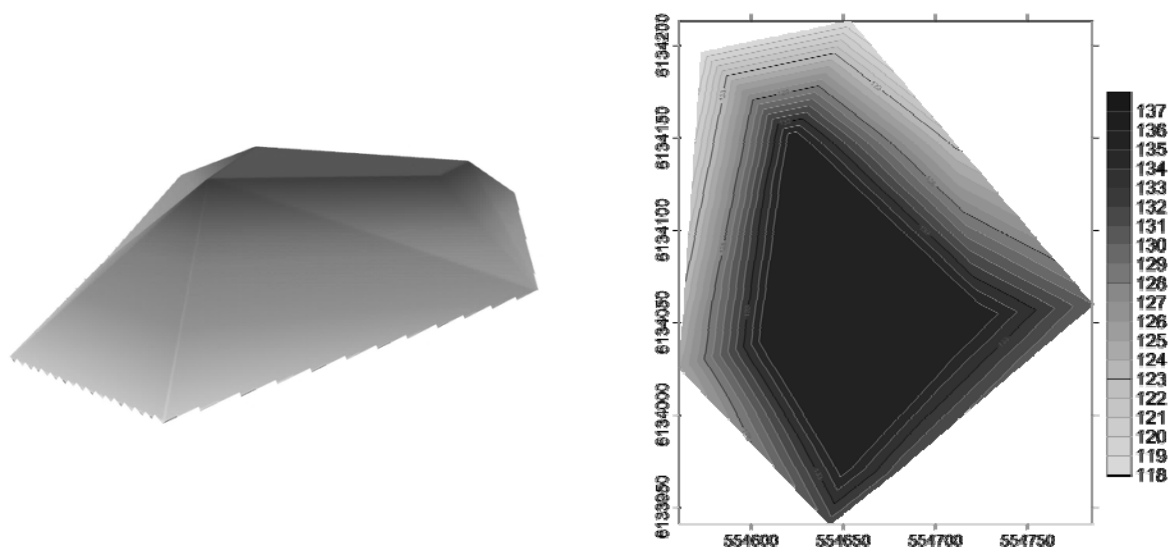


Рис. 3. Модель и карта рельефа надземной части проектного холма захоронения полигона ТКО

Для оценки современного состояния полигона были проведены полевые и инструментальные работы в июле 2020 г. Метеорологические условия на момент съемки имели следующие характеристики: переменная облачность, скорость ветра – 5м/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 (рис. 4). При формировании полетного задания устанавливалась высота полета над точкой взлета (100 м), а также продольное и поперечное перекрытие между соседними снимками (70 %).

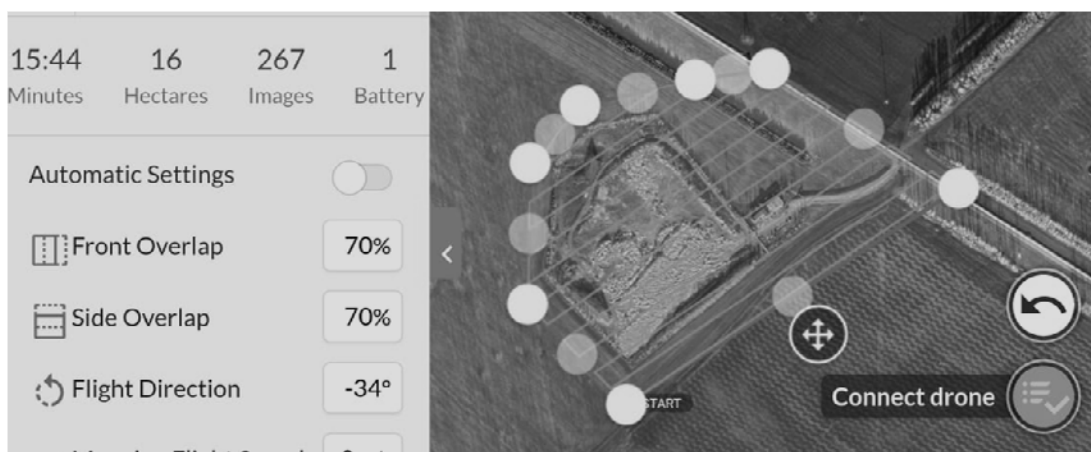


Рис. 4. Полетное задание для съемки территории полигона

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 сопоставлялись с файлами снимков с БПЛА, после чего обрабатывались в фотограмметрическом программном обеспечении Agisoft Metashape. Далее производится 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) (рис. 5). Разрешение ортофотоплана составило 0,1 м.

Построение карты рельефа по облаку точек, цифровая модель рельефа (рис. 6) и поперечные профили через площадь захоронения выполнены в программе Surfer 15, цифровая модель рельефа (ЦМР) выполнена с шагом 0,5 м.

Результаты и их обсуждение

Первое, что позволяет выявить данные съемки БПЛА, – несоответствия организации полигона проектным данным 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. 5).



Рис. 5. Ортофотоплан территории полигона ТКО

Фотограмметрическая обработка результатов аэрофотосъемки территории объекта исследования позволяет использовать полученные данные для проведения оценки остаточной вместимости полигона.

По результатам обработки проектных данных была построена объемная модель холма захоронения исследуемого полигона, а также карта рельефа надземной части проектного холма захоронения (рис. 6). Самым сложным при оценке остаточной емкости является сопоставление проектных данных и результатов полевых работ. Чаще всего это обусловлено низким качеством схем в проектной документации, а также условной системой координат и высот. В данном случае наиболее простым методом совмещения является привязка отсканированных схем к ортофотоплану с использованием в качестве опорных точек элементов строений и ограждений. Но это возможно только в том случае, если полигон организовывался согласно проекту. Если есть отклонения от проекта, найти общие точки бывает очень трудно. В этом случае приходится использовать другие способы привязки, в том числе путем нахождения общих точек на ЦМР территории на момент проектирования полигона, и по результатам современ-

ных полевых исследований. 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. После приведения данных в единую систему координат появляется возможность оценить степень заполненности полигона и его остаточную емкость.

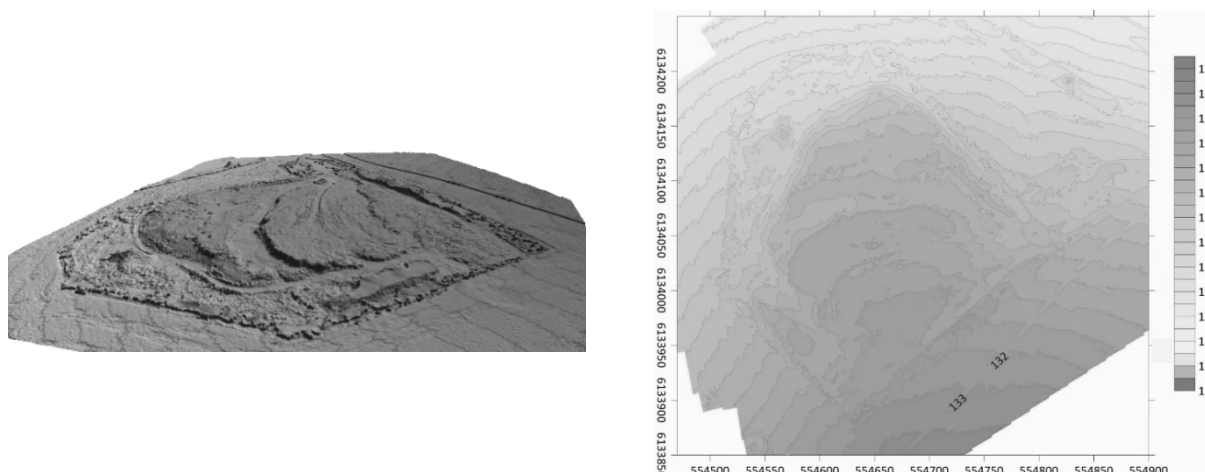


Рис. 6. Объемная модель (вид с запада) и карта рельефа территории полигона ТКО на момент исследования

Результаты полевых исследований позволяют детально описать рельеф зоны захоронения и сопоставить высотные характеристики с проектными данными. Так, на рассматриваемом полигоне, согласно результатам обработки данных аэрофотосъемки, основание наземного холма захоронения ТКО располагается на отметке 118–130 м абс. Отметки поверхности заполненной площади захоронения колеблются в интервале 120–132 м абс. (рис. 7). Таким образом, на момент съемки высота холма захоронения имеет отметки от 12 до 14 м. Проектная высота холма захоронения должна составлять 18 м. Эти цифры уже говорят о том, что полигон не заполнен до проектных отметок и может эксплуатироваться.

Наглядную картину можно получить при сопоставлении морфометрических характеристик объемных моделей (рис. 7, вверху). Сравнение ЦМР путем построения профилей через зону складирования либо карты разности позволяет оценить ситуацию на каждом участке полигона. Помимо оставшегося места, сопоставление цифровой модели фактического рельефа полигона с проектным наглядно демонстрирует выход зоны складирования за проектные границы (рис. 7, профиль 2).

Также по профилям легко оценить соответствие заложения внешних откосов холма складирования. На рассматриваемом полигоне откосы четко дифференцируются в северной части зоны захоронения и соответствуют проектному соотношению 1:4. Более крутые откосы могут привести к обрушению стенок холма и замусориванию территории.

Чаще всего необходимость оценки остаточной емкости возникает на стадии формирования пирамиды. В этом случае оценить накопленный объем отходов на момент исследования можно либо путем отбора проб методом бурения для оценки глубины складирования, либо расчетным методом. Проведение сплошного исследования методом бурения довольно дорогостоящая процедура, которая по факту дает информацию о глубине котлована в нескольких точках, по которой мы можем судить о соответствии ее проекту. 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.

Если зона складирования организована без нарушений, для вычисления остаточного объема достаточно «вычистить» фактический рельеф из проектного. В том случае, когда мусор складывается за пределами проектных границ, рассчитывается проектный и фактический объем в надземной части. Для этого строится модель «нулевого» рельефа по периметру зоны захоронения в соответствии с проведенными фотограмметрическими работами. Далее, объем надземной части считается путем вычитания модели «нулевого» рельефа из проектного и фактического на момент съемки.

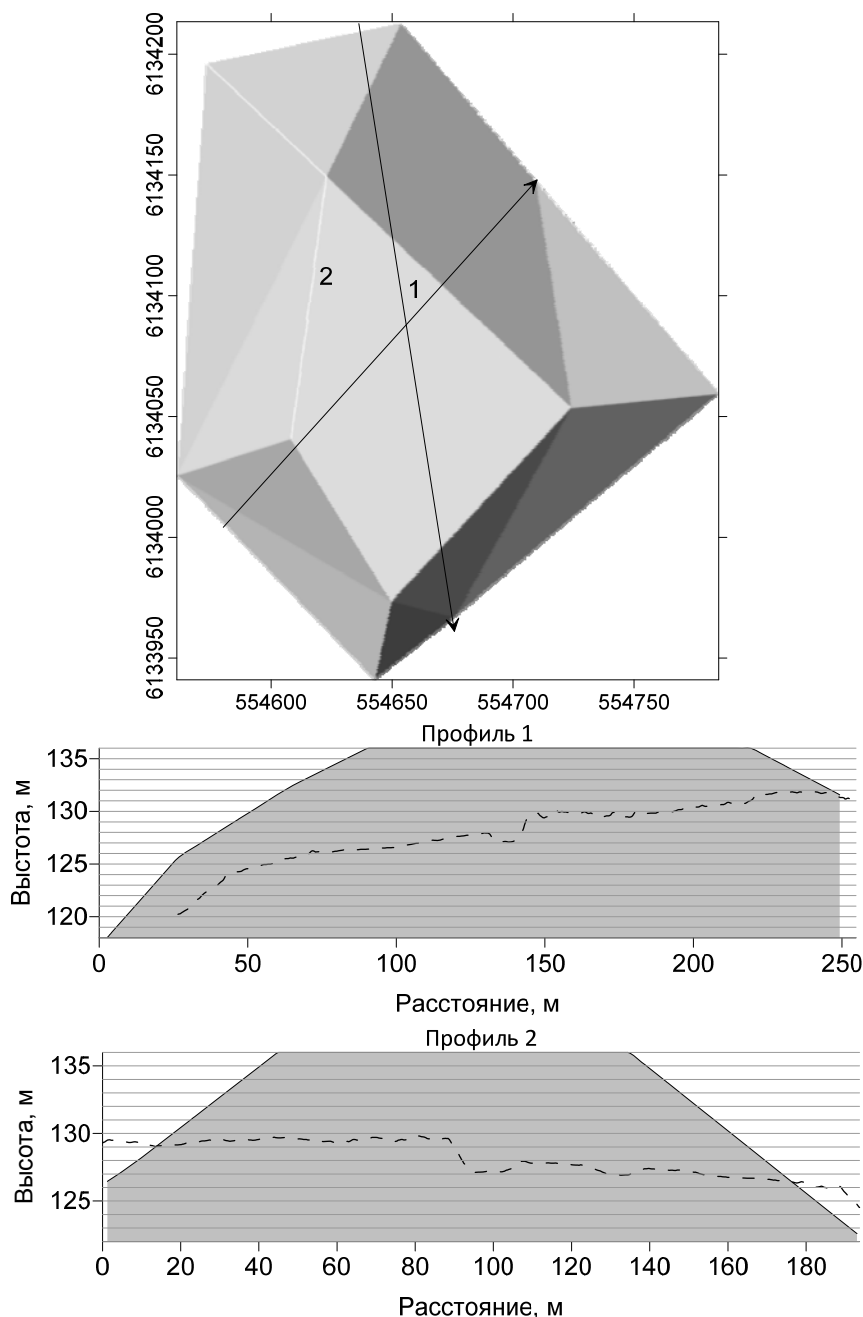


Рис. 7. Цифровая модель рельефа (сверху) и поперечные профили проектного холма захоронения (внизу). Пунктиром обозначено фактическое захоронение полигона ТКО

Следующим этапом является расчет объемов по моделям, которые находятся над поверхностью «нулевого» рельефа и остаточный объем получается путем вычитания объема фактически накопленных отходов из объема проектного холма складирования. После расчета свободного для складирования пространства необходимо учесть перекрытие слоев отходов изолирующими слоями и вычесть объем используемого для этих целей грунта.

Результаты расчета остаточной емкости полигона приведены в таблице.

Объемы отходов, полученные по моделям проектного и фактического рельефов

Проектная вместимость полигона ТКО, м ³	Фактический объем ТКО на момент съемки, м ³	Остаточная емкость на момент съемки, м ³
373 000	219 324 (58,8 %)	153 676 (41,2 %)

Для исследуемого полигона проектная вместимость составляет 373 000 м³. По результатам полевых исследований, обработки результатов съемки БПЛА, согласно проектным данным, остаточная емкость на момент съемки составляет – 153 676 м³ или 41,2 % от проектной вместимости, что позволяет продолжать эксплуатировать данный объект размещения отходов.

Важным этапом является разработка рекомендаций для руководства полигона по приведению зоны складирования в соответствии с проектом, в основном это формирование пирамиды в границах проекта и соблюдение соотношения откосов.

Ключевой задачей, которую должен решать метод, основанный на съемке ГНСС-БПЛА, является построение высокоточных и корректных ЦМР с минимальными трудозатратами [31]. Использование БПЛА помогает достичь значений точности достаточных для оценки остаточного объема полигонов ТКО. В среднем одна аккумуляторная батарея DJI Phantom 4 Pro V2 позволяет производить измерения на протяжении 15 минут, что, в зависимости от высоты полета и процента продольного и поперечного перекрытия соседних снимков, позволяет охватить до 1 км² территории. Расстановка и измерение координат опорных точек при использовании беспилотных аппаратов без ГНСС-приемника занимает от получаса и увеличивается пропорционально количеству марок, при этом число последних возрастает при увеличении площади исследования. Таким образом, использование ГНСС-БПЛА позволяет увеличивать производительность многократно. Отсутствие опорных точек позволяет получить модель без локальных понижений и искажений, что в перспективе позволяет производить работы по многолетним измерениям динамики экзогенных процессов [32].

К сожалению, при проведении работ по оценке остаточной емкости на первый план выходит не точность фотограмметрической обработки результатов съемки БПЛА, а точность совмещения проектных и полевых данных. Одно из главных условий успешного использования данного метода – наличие проектных данных и чертежей. Однако, не все полигоны имеют полный комплект документации, часто даже при ее наличии качество исполнения не позволяет осуществить точное сопоставление проекта и данных полевых исследований.

Заключение

Натурное инструментальное обследование территории полигона ТКО и последующая обработка данных позволяет оценить степень соответствия фактического состояния объекта проектным решениям.

Предложенный подход, основанный на съемке ГНСС-БПЛА и построении высокоточных ЦМР, реализованный на примере полигона твердых коммунальных отходов, располагающегося на территории Республики Татарстан, позволяет быстро и качественно осуществлять активный мониторинг инженерного сооружения по сравнению с традиционными геодезическими исследованиями.

Так, с помощью ЦМР, полученной по результатам фотограмметрической обработки данных БПЛА, можно получить высоту холма захоронения на момент съемки, и уже оценить заполненность полигона относительно проектных отметок. Сравнение проектной модели холма захоронения и с ЦМР зоны складирования на момент съемки позволяет рассчитать точные значения остаточной емкости и принять решение о необходимости дальнейшей эксплуатации полигона ТКО. Кроме того, заложение профилей через зону складирования и построение карт разностей наглядно позволяют оценить ситуацию на каждом участке зоны накопления отходов и оптимизировать процесс управления объектом.

Анализ ЦМР и ортофотопланов также позволяют выявить как отклонения в реализации проектных решений, так и нарушения правил эксплуатации полигонов.

Для исследуемого полигона могут быть даны следующие рекомендации по оптимизации складирования отходов: необходимо привести морфологию рельефа тела полигона в соответствии с проектом, убрать отходы, которые отнесены ветром с прилегающей территории, формировать откосы тела полигона привести границы зоны захоронения в соответствии с проектом.

Таким образом, фотограмметрическая обработка результатов низковысотной аэрофотосъемки позволяет получить объективные данные текущего фактического состояния полигонов отходов, осуществлять грамотное и обоснованное регулирование работы полигонов отходов. Кроме того, обработка полевых ГНСС-БПЛА наблюдений рельефа дает возможность оценить остаточную емкость полигонов, как в случае соблюдения проектных решений при организации полигонов, так и в случае отклонения от проектных решений.

Результаты аэрофотосъемки, полученные с использованием данных БПЛА, могут быть использованы не только для оценки остаточной емкости полигона отходов, но для активного мониторинга текущего состояния и организации работы сооружения. Немаловажно, что подобный мониторинг позволяет продлить срок службы (жизни) полигона, минимизировать негативные последствия воздействия на окружающую среду, а также выработать рекомендации по приведению полигона в соответствие с проектными данными как по площади складирования, так и по его объему.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования России по разработке и испытанию технологий контроля углеродного баланса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. No. 33 (10). P. 2001–2005.
2. 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. No. 31 (5). P. 1009–1017.
3. White J.K., Beaven R.P. Developments to a landfill processes model following its application to two landfill modelling challenges // *Waste Management*. 2013. No. 33 (10). pp. 1969–1981.
4. Kuryntseva P., Galitskaya P., Selivanovskaya S. Changes in the ecological properties of organic wastes during their biological treatment // *Waste Management*. 2016. No. 58. P. 90–97.
5. Galitskaya P., Selivanovskaya S., Gumerova R., Zvereva P., Shafigullin B., Akhmetzyanova L. Improving the efficiency of municipal organic waste recycling // *Materials of the VI Interregional Scientific and Practical Conference "Industrial Ecology and Safety"*, 2011. pp. 80–87.
6. Мирный А.Н., Мурашов В.Е., Корецкий В.Е. Государственное управление отходами в рамках концепции устойчивого развития / под ред. А.Н. Мирного. М.: Академия коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова. 2012. 351 с.
7. Hussein M., Yoneda K., Mohd-Zaki Z., Amir A., Othman N. Heavy metals in leachate, impacted soils and natural soils of different landfills in Malaysia: An alarming threat // *Chemosphere*. 2021. No. 267. P. 1–19.
8. Zhan L.T., Chen Y.M., Ling W.A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China // *Engineering Geology*. 2008. No. 97 (3). P. 97–111.
9. Chen Y.M., Zhan L.T., Wei H.Y., Ke H. Aging and compressibility of municipal solid wastes // *Waste Management*. 2009. No. 29 (1). P. 86–95.
10. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Compression behavior of municipal solid waste: immediate compression // *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2012. No. 138 (9). P. 1047–1062.
11. Fei X.C., Zekkos D. Factors influencing long-term settlement of municipal solid waste in laboratory bioreactor landfill simulators // *Journal of Hazardous, Toxic, Radioactive Waste*. 2013. № 17 (4). P. 259–271.
12. Hunte C., Hettiaratchi P., Meegoda J.N., Hettiarachchi C.H. Settlement of bioreactor landfills during filling operation // *Geoenvironmental Engineering*. 2007. P. 1–10.
13. Wall D.K., Zeiss C. Municipal landfill biodegradation and settlement // *J. Environ. Eng.* 1995. No. 121 (3). P. 214–224.
14. 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.
15. 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.
16. Kollikkathara N., Feng H., Yu D. A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues // *Waste Management*. 2010. № 30(11). P. 2194–2203.
17. Intharathirat R., Salam P.A., Kumar S., Untong A. Forecasting of municipal solid waste quantity in a developing country using multivariate grey models // *Waste Management*. 2015. № 39. P. 3–14.
18. 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. № 33(10): P.2029–34.
19. 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. No. 69. P. 202–214.
20. Висков М.В. Изменение емкости массива захоронения отходов в процессе эксплуатации объектов захоронения твердых коммунальных отходов // *Вестн. ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. 2020. № 1. С. 126–134.
21. 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.

22. 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.
23. Gasperini D. Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills // *International J. Environmental Technology and Management*. 2014. Vol. 17, no. 1. P. 1.
24. Baiocchi V. UAV for monitoring the settlement of a landfill // *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52, no. 3. P.41–52.
25. 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.
26. Athirah A. A. Manganese Removal in Groundwater Treatment Using Marble // *International Journal of Integrated Engineering*. 2019. Vol. 11, no. 1, pp.53-60.
27. 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. No.1. P. 73-94.
28. 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. P. 1471.
29. Son S.W., Kim D.V., Sung W.G., Yu J.J. Integrating UAV and TLS Approaches for Environmental Management: A Case Study of a Waste Stockpile Area // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 10. P. 1615.
30. 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, no.1. P. 22.
31. 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.
32. 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, iss. 2. P. 327-339. DOI:10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339.

Поступила в редакцию 30.11.2021

Ахметзянова Лейсан Габбасовна, кандидат биологических наук,
старший преподаватель кафедры прикладной экологии
E-mail: leisan-ksu@mail.ru

Усманов Булат Мансурович, старший преподаватель кафедры ландшафтной экологии
E-mail: busmanof@kpfu.ru

Кузьмин Руслан Сергеевич, аспирант кафедры прикладной экологии
E-mail: ekoaudit@mail.ru

Гафуров Артур Маратович, кандидат географических наук,
младший научный сотрудник кафедры ландшафтной экологии
E-mail: gafurov.kfu@gmail.com

Сироткин Вячеслав Владимирович, доктор географических наук,
профессор кафедры ландшафтной экологии
E-mail: sirotkin67@rambler.ru

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5

Курицин Иван Николаевич, кандидат биологических наук, эколог-аудитор
ООО «Рекульто»
420097, Россия, г. Казань, ул. Вишневого, 2б, корп. 1
E-mail: ivan-kuritsin@yandex.ru

L.G. Akhmetzyanova, B.M. Usmanov, I.N. Kuritsin, R.S. Kuz'min, A.M. Gafurov, V.V. Sirotkin
**APPLICATION OF AERIAL PHOTOGRAPHY RESULTS, OBTAINED USING UAV DATA TO ESTIMATE
THE RESIDUAL CAPACITY OF THE LANDFILL. PRACTICE OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN**

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-4-404-415

Assessment of the current residual capacity is a fundamentally important task, the solution of which is demonstrated on a landfill located in the Republic of Tatarstan. To solve the task, the modern methods of high-precision three-dimensional reconstruction were used based on the survey from an unmanned aircraft DJI Phantom 4, equipped with a global satellite navigation system (GNSS) receiver. As a result of combining the project data and data from field sur-

veys into one coordinate system and elevations and reconstruction of designed underground and ground parts of landfill calculation, the difference of models and the residual capacity of the landfill becomes possible. Based on the materials considered as of July 2020, the residual capacity of the studied landfill is 41.2 % of the project capacity, which allows us to continue to operate this landfill. The proposed approach allows for rapid and high-quality active monitoring of the engineered facility. Photogrammetric processing of the results of low-altitude aerial photography makes it possible to obtain objective data on the current actual state of the landfills, to carry out competent and valid management of the landfill functioning. Significant, this will extend the landfill's lifetime, minimize the adverse effects on the environment and predict the yield to the project capacity much more accurately.

Keywords: remote monitoring, unmanned aerial vehicle (UAV), digital terrain model, waste landfill, residual capacity.

REFERENCES

1. De F.B., Chanton J. P., Barlaz M.A. Measurement of carbon storage in landfills from the biogenic carbon content of excavated waste samples, in *Waste Management*, 2013, no. 33(10), pp. 2001–2005.
2. Scheutz C., Samuelsson J., Fredenslund A.M., Kjeldsen P. Quantification of multiple methane emission sources at landfills using a double tracer technique, in *Waste Management*, 2011, no. 31(5), pp. 1009–1017.
3. White J. K., Beaven R. P. Developments to a landfill processes model following its application to two landfill modelling challenges, in *Waste Management*, 2013, no. 33(10), pp. 1969–1981.
4. Kuryntseva P., Galitskaya P., Selivanovskaya S. Changes in the ecological properties of organic wastes during their biological treatment, in *Waste Management*, 2016, no. 58, pp. 90–97.
5. Galitskaya P., Selivanovskaya S., Gumerova R., Zvereva P., Shafigullin B., Akhmetzyanova L. Improving the efficiency of municipal organic waste recycling, in *Materials of the VI Interregional Scientific and Practical Conference "Industrial Ecology and Safety"*, 2011, pp. 80–87.
6. Mirny A., Murashev V., Koretsky V. [State waste management in the framework of the concept of sustainable development], Moscow: K. D. Pamfilov Academy of Public Utilities. 2012. 351p. (in Russ.).
7. Hussein M., Yoneda K., Mohd-Zaki Z., Amir A., Othman N. Heavy metals in leachate, impacted soils and natural soils of different landfills in Malaysia: An alarming threat, in *Chemosphere*, 2021, no. 267, pp. 1–19.
8. Zhan L.T., Chen Y.M., Ling W.A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China, in *Engineering Geology*, 2008, no. 97 (3), pp. 97–111.
9. Chen Y.M., Zhan L.T., Wei H.Y., Ke H. Aging and compressibility of municipal solid wastes, in *Waste Management*, 2009, no.29 (1), pp. 86–95.
10. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Compression behavior of municipal solid waste: immediate compression, in *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* of , 2012, no.138 (9), pp. 1047–1062.
11. Fei X.C., Zekkos D. Factors influencing long-term settlement of municipal solid waste in laboratory bioreactor landfill simulators, in *J. of Hazardous, Toxic, Radioactive Waste*, 2013, no. 17 (4), pp. 259–271.
12. Hunte C., Hettiaratchi P., Meegoda J.N., Hettiarachchi C.H. Settlement of bioreactor landfills during filling operation, in *Geoenvironmental Engineering*, 2007, pp. 1–10.
13. Wall D.K., Zeiss C. Municipal landfill biodegradation and settlement, in *J. Environ. Engineering*, 1995, no. 121 (3), pp. 214–224.
14. Ling H.I., Leshchinsky D., Mohri Y., Kawabata T. Estimation of municipal solid waste landfill settlement, in *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 1998, no. 124 (1), pp. 21–28.
15. Van Geel P.J., Murray, K.E. Simulating settlement during waste placement at a landfill with waste lifts placed under frozen conditions, in *Waste Management*, 2015, no. 46, pp. 352–361.
16. Kollikkathara N., Feng H., Yu D. A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues, in *Waste Management*, 2010, no. 30(11), pp. 2194–2203.
17. Intharathirat R., Salam P.A., Kumar S., Untong A. Forecasting of municipal solid waste quantity in a developing country using multivariate grey models, in *Waste Management*, 2015, no. 39, pp. 3–14.
18. 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, in *Waste Management*, 2013, no. 33(10), pp.2029–34.
19. 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, in *Waste Management*, 2017, no. 69, pp. 202–214.
20. Viskov M. [Changes in the capacity of the waste disposal array during the operation of solid municipal waste disposal facilities], in *Bulletin of the PNRPU. Applied Ecology. Urban Studies*, 2020, no. 1, pp. 126–134 (in Russ.).
21. 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 , in *Geosciences*, 2018, vol. 8, no. 9, p. 348.

22. 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, in *Neftyanoe Khozyaistvo – Oil Industry*, 2014, no. 12, pp. 156-160.
23. Gasperini D. Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills, in *International J. Environmental Technology and Management*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 1.
24. Baiocchi V. UAV for monitoring the settlement of a landfill, in *European Journal of Remote Sensing*, 2019, vol. 52, no. 3. pp. 41–52.
25. Yoo H.T.A Preliminary Study on Disaster Waste Detection and Volume Estimation Based on 3D Spatial Information, in *Computing in Civil Engineering 2017. Seattle, Washington: American Society of Civil Engineers*, 2017, pp. 428–435.
26. Athirah A.A. Manganese Removal in Groundwater Treatment Using Marble, in *International Journal of Integrated Engineering*, 2019, vol. 11, no 1, pp. 53-60.
27. 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.
28. Tucci G. Monitoring and Computation of the Volumes of Stockpiles of Bulk Material by Meansp of UAV Photogrammetric Surveying, in *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 12, pp. 1471.
29. Son S. W., Kim D.V., Sung W.G., Yu J.J. Integrating UAV and TLS Approaches for Environmental Management: A Case Study of a Waste Stockpile Area, in *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 10, p. 1615.
30. Incekara A. Investigating the Utility Potential of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicles in the Temporal Monitoring of a Landfill, in *International Journal of Geo-Information*, 2019, vol. 8, no. 1, p. 22.
31. 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, in *Drones*, 2021, vol. 5, iss. 1, pp.1-17.
32. Gafurov A.M., Yermolayev O.P., Usmanov B.M., Khomyakov P.V. Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV, in *InterCarto, InterGIS*, 2021, vol. 27, iss. 2, pp. 327-339. DOI:10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339.

Received 30.11.2021

Akhmetzyanova L.G., Candidate of Biology, Senior lecturer at Department of Applied ecology

E-mail: leisan-ksu@mail.ru

Usmanov B.M., Senior lecturer at Department of Landscape ecology

E-mail: busmanof@kpfu.ru

Kuz'min R.S, postgraduate student at Department of Applied ecology

E-mail: ekoaudit@mail.ru

Gafurov A.M., Candidate of Geography, Junior researcher at Department of Landscape ecology

E-mail: gafurov.kfu@gmail.com

Sirotkin V.V., Doctor of Geography, Professor at Department of Landscape ecology

E-mail: sirotkin67@rambler.ru

Kazan Federal University

Tovarisheskaya st. 5, Kazan, Russia, 420097

Kuritsin I.N., Candidate of Biology, Ecologist-auditor

LLC "Reculto"

Vishnevskogo st., 26/1, Kazan, Russia, 420097

E-mail: ivan-kuritsin@yandex.ru