

## Опыт моделирования горнорудных ландшафтов методами интеллектуального мониторинга

Ж. Ж. Айнакулов<sup>1</sup>, Н. Г. Макаренко<sup>2</sup>, Т. Т. Палташев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Казахский национальный университет им. аль-Фараби  
Алматы, 050040, Казахстан  
E-mail: jaras1987@mail.ru*

<sup>2</sup> *Институт информационных и вычислительных технологий  
Алматы, 050010, Казахстан  
E-mail: ng-makar@mail.ru*

<sup>3</sup> *Университет информационных технологий, механики и оптики  
Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: timpal@mail.npi.edu*

Статья имеет методический характер и содержит опыт применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга горнорудных объектов — отвалов и котлованов. Рассмотрена методика построения 3D-модели объектов, которая реализуется методами нейрокомпьютинга на основе наземной съёмки ландшафтов с борта БПЛА. Описывается наземная съёмка, которая получается с помощью лазерного сканера. Дальность действия лазерного сканера достигает полутора километров. В результате получается 3D-модель участка ландшафта с точностью до 10 мм при расстоянии сканирования 100 м. Дается пошаговая технология построения 3D-модели технологического отвала. Показана разница между традиционными аэросъёмочными комплексами на основе пилотируемых авианосителей и аэросъёмочными комплексами с искусственным интеллектом на основе БПЛА. Особое внимание уделено разработанной специализированной программе «Оценка объёмов», которая позволяет оценить и прогнозировать объёмы техногенных структур на основе картографических аэрофотоснимков с БПЛА. Представлены результаты исследования, полученные обработкой цифровых моделей. Созданы 3D-модели небольших отвалов. Рассмотрены характеристики эксплуатируемых БПЛА с искусственным интеллектом и дано обоснование эффективности их применения.

**Ключевые слова:** техногенные объекты, оценка, прогнозирование, нейрокомпьютинг, дистанционное зондирование, 3D-модель, аэросъёмка, ГИС, БПЛА

Одобрена к печати: 04.09.2018  
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-43-50

### Введение

Оценка и прогнозирование объёма техногенных объектов, связанных с горнорудным производством, таких как отвалы и котлованы, является необходимой задачей. Количественные оценки основаны обычно на 3D-модели исследуемого объекта, построенной с требуемой точностью. Современную основу решения задач, связанных с оценкой и прогнозом объёма объекта со сложной топографией, составляет методология построения подходящей 3D-модели объекта, которая реализуется системами с искусственным интеллектом на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и средств малой авиации (ГК «Геоскан», <https://www.geoscan.aero/>).

К наземной съёмке можно отнести измерения с помощью лазерного сканера. Дальность действия лазерного сканера достигает полутора километров. В результате можно получить 3D-модель исследуемого объекта с точностью до 10 мм при расстоянии сканирования 100 м (Фрейдин, 2007).

Для мониторинга изменения морфологии участков для открытых горных работ площадью до 10 км<sup>2</sup> эффективным способом считается аэрофотосъёмка с использованием лёгких

БПЛА массой менее 10 кг. Их отличие от пилотируемой авиации состоит в том, что БПЛА не требуют специальной взлетно-посадочной площадки: достаточной считается открытая площадка размером 70×70 см. Немалым преимуществом при сопоставлении со спутниковой съёмкой являются технические возможности современных БПЛА-комплексов (фотоаппаратура, системы навигации, управления и связи), которые обеспечивают пространственное разрешение до 5 см и мало зависят от погодных условий (Макаров и др., 2017). Целью этой работы является описание методики моделирования топографии горнорудных ландшафтов на основе БПЛА.

### Создание 3D-модели объектов по аэросъёмочным данным на основе БПЛА

Для создания 3D-модели были использованы аэросъёмочные комплексы на основе БПЛА с применением элементов искусственного интеллекта. Высота аэросъёмки составляла 200 м.

Прежде всего, была проведена серия тестовых испытаний аппаратов серии Геоскан 101, снабжённых фотокамерой с центральным затвором и полноразмерной матрицей (Sony NEX5N), применимой для задач фотограмметрии. Основной целью испытаний было определение погрешности измерений по материалам аэрофотосъёмки, которые важны при проведении картографических работ и построения цифровых моделей рельефа.

Для задач фотограмметрии известны следующие основные источники возможных ошибок аэрофотосъёмки (Макаров и др., 2017):

- искажения оптической системы (абберации, отсутствие резкости, смещение главной точки, неточное значение фокусного расстояния);
- искажения, вызванные наклоном оптической оси;
- искажения, вызванные рельефом местности.

В таких работах ошибки оптической системы исправляются путём калибровки фотокамеры и определением её точных параметров. Тогда наклон оптической оси в конструкции аппарата ГЕОСКАН 101 сводится к минимуму. Для оценки точности определения пространственных координат по данным аэрофотосъёмки с БПЛА был использован испытательный полигон площадью 1 км<sup>2</sup>. На *рис. 1* представлены ортофотоплан и 3D-модель рудного карьера.

В ходе последующей обработки результатов аэрофотосъёмки в качестве входных данных при уравнивании использовались элементы внешнего ориентирования снимков. Эти снимки, полученные с высокоточного ГНСС-приёмника, являются результатом калибровки фотокамеры и координат 10 опорных точек. Контроль точности производился по 200 контрольным точкам (Макаров и др., 2017).



*Рис. 1.* Пошаговая технология построения 3D-модели объекта: *а* — исследуемый техногенный объект; *б* — ортофотоплан объекта; *в* — цифровая модель (DEM) объекта, разрешение 5 см в плане, 10 см по высоте

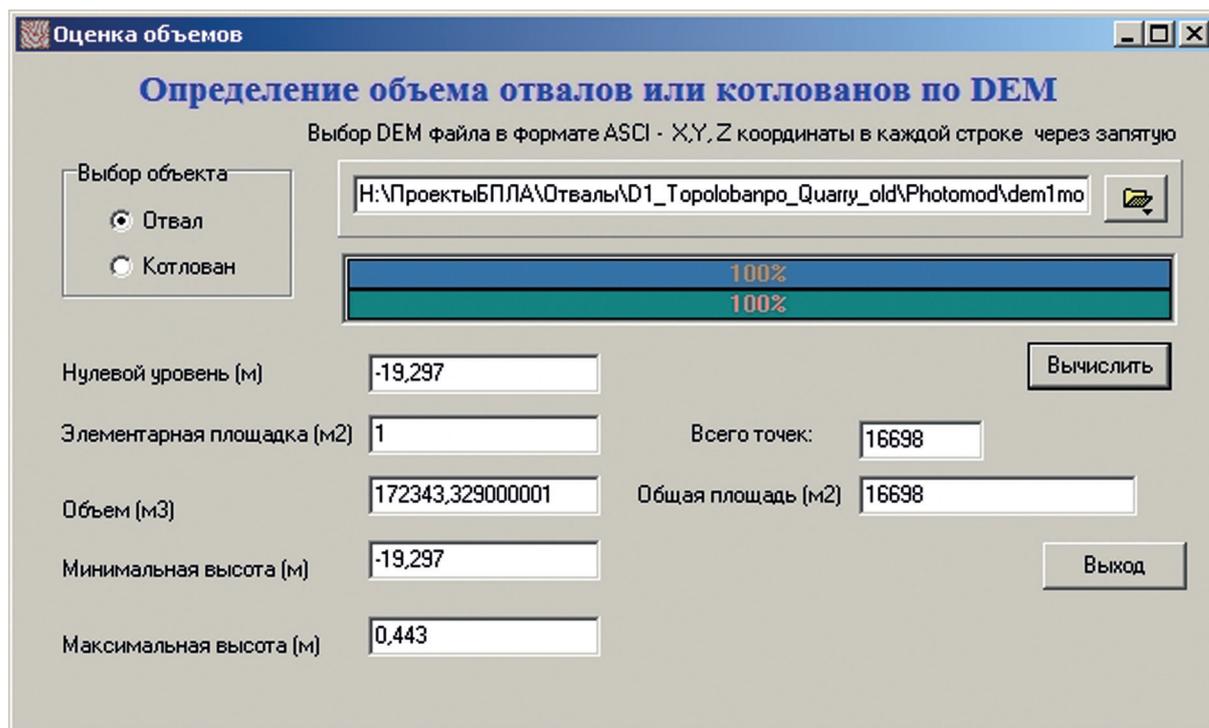


Рис. 2. Результат оценки и прогнозирования объёма отвала

Применение программы PHOTOMOD позволяет построить DEM-файл и экспортировать его в различные форматы, в том числе и в текстовый ASCII-файл или формат csv, содержащие координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  для каждой точки отвала (АО «Ракурс», <http://www.racurs.ru/>). На рис. 1 приведена пошаговая технология построения 3D-модели объекта.

Разработанная специализированная программа «Оценка объёмов», позволяющая получать оценки и прогноз объёма отвалов или котлованов, предназначена для обработки ASCII-файла. С помощью DEM-файла в формате ASCII вводятся координаты точек  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  выбранного отвала, а также нулевой уровень ( $-19$  м) и размер элементарной площадки; система рассчитывает объём отвала по заданным исходным данным ( $172\,343,329\text{ м}^3$ ). На рис. 2 показаны результаты оценки и прогнозирования объёма отвала.

По результатам исследования было выявлено, что для создания ортофотоплана с масштабом 1:1000 достаточно 11 опорных и трёх контрольных точек на  $6\text{ км}^2$  местности. Количество может зависеть от типа рельефа, целей проведения и условий съёмки.

Помимо оценки точности определения пространственных координат, данный полигон был использован для калибровки оборудования — уточнения фактической величины фокусного расстояния и координат главной точки. После калибровки средняя плановая невязка  $\Delta L_{\text{ср}}$  составила 10 см, высотная невязка  $\Delta Z_{\text{ср}}$  — 16 см.

В ходе последующей обработки результатов аэрофотосъёмок в качестве входных данных при уравнивании использовались элементы внешнего ориентирования снимков. Эти снимки были получены с высокоточного ГНСС-приёмника в результате калибровки фотокамеры и координат 11 опорных точек. Контроль точности производился по трём контрольным точкам.

Ошибки по опорным точкам после уравнивания приведены в табл. 1.

Полученные в результате вычислений данные представлены в табл. 2.

Таким образом, была продемонстрирована возможность оценки и прогнозирования объёмов карьерных объектов по картографическим аэрофотоснимкам. Полученные результаты указывают на возможность использования материалов аэрофотосъёмок с БПЛА в качестве топографической основы для моделей, необходимых при подсчёте объёмов техногенных объектов с нетривиальной топографией.

Таблица 1. Ошибки по опорным точкам после уравнивания

Название точки	Ошибка, см			
	X	Y	Z	Общая
03	1,42623	0,0190399	-0,629046	1,55891
02	-1,05392	1,79315	2,1179	2,96844
05	-2,19141	7,21445	-1,85466	7,76469
07	-7,40204	-3,55447	-0,388473	8,22055
08	-0,256165	0,873776	-2,55333	2,71083
09	-1,69852	-7,32364	-0,581117	7,54045
04	-6,31944	5,04837	3,02228	8,63456
06	5,36666	0,387021	-0,220922	5,38513
10	3,87104	-5,01862	0,855148	6,39553
11	0,148656	-4,05701	-2,21976	4,62696
4810	4,0133	1,82096	2,67144	5,15355
5294	3,88597	2,28367	1,58826	4,77896
7752	0,49976	0,776777	0,629407	1,11772
Суммарная	3,73021	3,90971	1,75906	5,68284

Таблица 2. Результат вычисленных данных оценки и прогнозирования

Параметр	Значение
Площадь	16698 м <sup>2</sup>
Минимальная высота	-19 м
Максимальная высота	0,443 м
Объём	172 343,329 м <sup>3</sup>

### Беспилотные летательные аппараты с элементами нейрокомпьютинга

Для проведения аэросъёмочных работ были использованы два типа БПЛА (гексакоптер и планер) с элементами искусственного интеллекта.

Перед запуском БПЛА в интерфейсе наземной станции управления задаются: область съёмки, требуемые значения продольного и поперечного перекрытия и высота полёта, т.е. пространственное разрешение снимков. По указанным параметрам наземная станция управления автоматически создаёт маршрут, следуя которому БПЛА совершает аэрофотосъёмку с фиксацией координат каждой точки фотографирования (табл. 3, 4).

Таблица 3. Технические характеристики БПЛА гексакоптер

Параметр	Значение
Высота подъёма	до 500 м
Продолжительность беспосадочного полёта	до 30 мин
Полезная нагрузка	до 3 кг
Скорость полёта	до 10 м/с
Габариты д/ш/в	1050/1050/700 мм
Тип двигателя	электрический
Запуск	интеллектуальный запуск
Посадка	интеллектуальная посадка

Одной из проблем фотограмметрической обработки фотоснимков, полученных с БПЛА, считается топографическое покрытие местности. Измерение пространственных данных

( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) для значительного количества точек в системе координат территории, создание по ним цифровых нерегулярных (TIN, Triangulated Irregular Network) и регулярных (DEM, Digital Elevation Model) моделей поверхности даёт возможность извлечения на их основании текстурированных моделей местности и ортофотопланов.

Таблица 4. Технические характеристики планера БПЛА Геоскан 101 (<https://www.geoscan.aero/>)

Параметр	Значение
Максимальная высота полёта	до 3500 м
Продолжительность беспосадочного полёта	до 2 ч
Полезная нагрузка	до 3 кг
Крейсерская скорость	72 км/ч
Размах крыльев	1300 мм
Тип двигателя	электрический
Запуск	с катапульты
Посадка	на парашюте

Путём сравнения двух цифровых моделей местности (ЦММ), которые были получены по материалам аэрофотосъёмок и наземных тахеометрических съёмок, было обнаружено, что расхождение координат в зонах перекрытий в процессе уравнивания составляет от 0,04 до 0,08 м при высоте съёмки 50–150 м. Тогда размер отклонения составляет примерно 0,5–1,5 пикселей на метр, если при построении моделей использованы аэрофотосъёмки с разных участков. Значительная разность высоты залёта обусловлена большим перепадом высот в разрезе (до 100 м). Путём сравнения  $Z$ -координат точек, определённых по ЦММ и полученных в результате полевых измерений, выполнена оценка точности определения координат точек построения модели. Для этого выбирались по возможности плоские участки рельефа без больших уклонов, чтобы уменьшить влияние ошибок на определение планового положения точек ЦММ и координаты  $Z$ .

Оценка точности выполнена на четырёх участках площадью примерно по 1 га каждый, в среднем по 110 точек выборки на участке. Среднеквадратическое отклонение разностей координат  $Z$  (отметок) точек ЦММ вычислялось по формуле:

$$m_z = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_1^n (\Delta Z_i + \Delta \bar{Z})^2}, \quad \Delta Z_i = Z_i - Z_{it}, \quad \Delta \bar{Z} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i^2},$$

где  $Z_i$  — отметка точки по ЦММ;  $Z_{it}$  — отметка этой же точки тахеометрической съёмки;  $n$  — объём выборки;  $\Delta Z_{it}$  — разность отметок;  $\Delta \bar{Z}$  — среднее арифметическое отклонение разности отметок. Результаты вычислений приведены в табл. 5.

Таблица 5. Вычисление среднеквадратического отклонения высот по ЦММ

№ участка	Количество точек выборки	Составляющая $\Delta \bar{Z}$ , м	Среднеквадратическое отклонение $m_z$ , м
Поле 1	110	0,0193	0,0036
Поле 2	122	0,0506	0,0223
Поле 3	90	0,275	0,0451
Поле 4	107	0,067	0,0477

Из полученных результатов видно, что составляющие ошибок определения разности высот  $\Delta Z_{it}$  на разных участках значительно отличаются, в то время как составляющие среднеквадратических отклонений  $m_z$  достаточно близкие. Это обстоятельство не позволяет сделать

однозначный вывод о точности ЦММ, так как нет уверенности в том, что определение высот точек тахеометрической съёмки выполнены без систематических погрешностей либо что они не претерпели изменений в период между съёмками. Полученная по материалам аэрофотосъёмки цифровая модель поверхности разреза намного подробнее модели, построенной по точкам наземной съёмки. Она создана в виде регулярной сверки высот со сторонами, параллельными координатным осям  $X$  и  $Y$  системы местности с высокой плотностью (0,2 м). Модель более точно отображает детали рельефа, включая элементы искусственного и естественного микрорельефа (Масляноко, 2014).

Получение качественных результатов фотосъёмки обеспечивается обработкой цифровых снимков в специализированных пакетах, таких как Pix4Dmapper, Photoscan (Иноземцев, 2013), PHOTOMOD, позволяющих существенно упростить и автоматизировать процесс обработки исходных материалов: определение связующих точек на соседних снимках и уравнивание по указанным опорным точкам.

Наш опыт показал, что автоматизированный подсчёт перемещённой горной массы занимает не более 10 мин для одного месторождения. Время полного технологического процесса составляет порядка шести часов для крупного месторождения. Для сравнения, традиционная методика работ, включающая наземную инструментальную съёмку, в этой ситуации потребует не менее трёх дней.

Заметим, что при создании 3D-модели небольших отвалов наиболее эффективным является использование технологии лазерного сканирования. При съёмке значительных по размерам (более 1 км<sup>2</sup>) карьерных объектов трудозатраты на сканирование и обработку наземных данных вырастают в геометрической прогрессии (Ковров, 2007), поэтому для создания 3D-модели отвалов значительных размеров наиболее эффективным является использование технологий авиационной стереосъёмки с последующим применением методов цифровой фотограмметрии. При этом точность 3D-модели зависит от высоты съёмки и разрешающей способности аэросъёмочной аппаратуры (Минаев, 2013).

При использовании традиционных аэросъёмочных комплексов на основе пилотируемых авианосителей разрешающая способность аэросъёмочных кадров при высоте аэросъёмки 1 км составляет 10 см в плане и до 30 см по высоте.

Более высокой эффективностью обладают аэросъёмочные комплексы с элементами искусственного интеллекта на основе БПЛА. Они позволяют проводить аэросъёмку с высоты от 50 м. Так, разрешающая способность аэросъёмочных кадров при высоте полёта БПЛА 100 м будет достигать 3 см в плане и до 10 см по высоте.

Кроме того, применение БПЛА позволяет выполнять съёмку труднодоступных мест.

Фактором, замедляющим развитие и внедрение технологии дистанционного мониторинга горных работ, являются предубеждения специалистов предприятий, связанные с отсутствием нормативной и методической баз БПЛА. Расширение нормативных баз требует тесного сотрудничества горнодобывающих предприятий, контролирующих органов и производителей БПЛА (Шрайнер, 2017).

Резюмируя изложенное выше, можно отметить, что БПЛА позволяют оперативно и с высокой точностью производить картирование и мониторинг объектов горного предприятия, а также решать широкий спектр горно-технологических и экологических задач, таких как подсчёт объёмов горных выработок, отвалов, хвостохранилищ, построение разрезов, поиск зон трещиноватости, привязку скважин и т. д.

Авторы выражают признательность коллективу лаборатории геоинформатики, геомоделирования и ГИС-технологий АО «НЦКИТ» за оказанную помощь при проведении данного исследования, в написании настоящей статьи и в обработке аэрофотоснимков, полученных с БПЛА. Особую благодарность авторы выражают Мухамедгалиеву Арстану Фазуловичу за ценные идеи, нестандартные научные подходы и эффективное содействие, а также благодарят всех соратников и единомышленников за остроту мысли, конструктивную критику и предоставленные актуальные материалы.

## Литература

1. *Иноземцев Д. П.* Беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Часть 2. Модель обработки аэрофотоснимков в среде Agisoft PhotoScan // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2013. № 3(50). С. 48–51.
2. *Ковров А. А.* Использование наземного лазерного сканирования при расследовании несчастных случаев, преступлений и ДТП // Геопрофи. 2007. № 4. С. 59–62.
3. *Макаров В. А., Бондаренко Д. А., Макаров И. В., Шрайнер К. А., Перунов А. А., Труханов Е. В.* Беспилотные летательные аппараты для решения задач маркшейдерии и мониторинга открытых горных работ / ООО НПП «АВАКС-ГеоСервис». 2017. URL: <http://uav-siberia.com/news/bespilotnye-letatelnye-apparaty-dlya-resheniya-zadach-marksheyderii-i-monitoringa-otkrytykh-gornykh-/> (Дата обращения 20.04.2018).
4. *Масляк В. Я.* Применение 3D-технологий при оперативном планировании открытых горных работ // 12-е Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014), Москва, 16–19 июня 2014 г. С. 4337–4347.
5. *Минаев Е. В.* Использование систем наземного лазерного сканирования при инвентаризации и объемах инженерных сооружений // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 32–35.
6. *Фрейдин А. Я.* Трехмерный лазерный сканер: принцип работы и область применения // Мир измерений. 2007. № 10. URL: <http://gia-stk.ru/mi/adetail.php?ID=8303> (Дата обращения 20.04.2018)
7. *Шрайнер К. А.* Применение БПЛА для решения горнотехнических задач / Российские беспилотники. URL: <https://russiandrone.ru/publications/primenenie-bpla-dlya-resheniya-gornotekhnicheskikh-zadach/> (Дата обращения 20.04.2018).

## Experience of modeling mining landscapes by using methods of intelligent monitoring

Zh. Zh. Ainakulov<sup>1</sup>, N. G. Makarenko<sup>2</sup>, T. T. Paltashev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan  
E-mail: jaras1987@mail.ru*

<sup>2</sup> *Institute of Information and Computational Technologies, Almaty 050010, Kazakhstan  
E-mail: ng-makar@mail.ru*

<sup>3</sup> *University of Information Technologies, Mechanics and Optics  
St. Petersburg 199034, Russia  
E-mail: timpal@mail.npu.edu*

The paper is methodical in nature and describes experience in the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring mining facilities — dumps and foundation pits. The technique of constructing a 3D-model of objects is considered, which is realized by methods of neurocomputing based on ground-based survey of landscapes from the UAVs. Ground-based survey using a laser scanner is described. The range of the laser scanner reaches 1.5 km. The result is a 3D-model of the terrain area with an accuracy of 10 mm, at scanning distance of 100 m. A step-by-step technology for constructing a 3D-model of a technological dump is presented. The difference between traditional aerial systems based on manned aerial carriers and aerial imagery complexes with artificial intelligence based on UAV is demonstrated. Particular focus is on the specialized program “Volume estimator” developed to estimate and forecast the volumes of technogenic structures based on cartographic aerial photographs taken by UAVs. The results of the study obtained by processing digital models are presented. 3D-models of small dumps have been created. The characteristics of operating UAVs with artificial intelligence are presented and their effectiveness is substantiated.

**Keywords:** technogenic objects, estimation, forecasting, neurocomputing, remote sensing, 3D-model, aerial survey, GIS, UAV

Accepted: 04.09.2018  
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-43-50

## References

1. Inozemtsev D. P., *Bespilotnye letatel'nye apparaty: teoriya i praktika. Chast' 2. Model' obrabotki aerofotosnimkov v srede AGISOFT PHOTOSCAN (Unmanned aerial vehicles: theory and practice. Part 2. Model of processing aerial photographs in Agisoft PhotoScan)*, *Avtomatizirovannye tekhnologii izyskanii i proektirovaniya*, 2013, No. 3, Vol. 50, pp. 48–51.
2. Kovrov A. A., *Ispol'zovanie nazemnogo lazernogo skanirovaniya pri rassledovanii neschastnykh sluchaev, prestuplenii i DTP (The use of ground-based laser scanning in the investigation of accidents, crimes and road accidents)*, *Geoprofi*, 2007, No. 4, pp. 59–62.
3. Makarov V. A., Bondarenko D. A., Makarov I. V., Shrainer K. A., Perunov A. A., Trukhanov E. V., *Bespilotnye letatel'nye apparaty dlya resheniya zadach marksheiderii i monitoringa otkrytykh gornykh rabot (Unmanned aerial vehicles for surveying and monitoring of open pit mining)*, available at: <http://uav-siberia.com/en/news/bespilotnye-letatelnye-apparaty-dlya-resheniya-zadach-marksheyderii-i-monitoringa-otkrytykh-gornykh-rabot/> (April 20, 2018).
4. Maslyanko V. Ya., *Primenenie 3D tekhnologii pri operativnom planirovanii otkrytykh gornykh rabot (Application of 3D technologies in operational planning of open mining operations)*, *XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya (VSPU-2014) (XII All-Russia Conf. Problems of Governance (GSPU-2014))*, Moscow, 16–19 June 2014, pp. 4337–4347.
5. Minaev E. V., *Ispol'zovanie sistem nazemnogo lazernogo skanirovaniya pri inventarizatsii i obmerakh inzhenernykh sooruzhenii (Use of terrestrial laser scanning systems for inventory and measurement of engineering structures)*, *Inzhenernye izyskaniya*, 2013, No. 9, pp. 32–35.
6. Freidin A. Ya., *Trekhmernyi lazernyi skaner: printsip raboty i oblast' primeneniya (Three-dimensional laser scanner: the principle of operation and scope)*, *Mir izmerenii*, 2007, No. 10, available at: <http://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=8303> (April 20, 2018).
7. Shrainer K. A., *Primenenie BPLA dlya resheniya gornotekhnicheskikh zadach (Application of UAV for solving mining tasks)*, *Rossiiskie bespilotniki*, available at: <https://russiandrone.ru/publications/primenenie-bpla-dlya-resheniya-gornotekhnicheskikh-zadach/> (April 20, 2018).