

ОПЫТ СЕРТИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ СОЗДАНИЯ ОРТОФОТОПЛАНОВ И ЦМР С ПОМОЩЬЮ АФК НА ОСНОВЕ БПЛА

Е.А. Бровко (НИИП центр «Природа»)

В 1974 г. окончила картографический факультет МИИГАиК по специальности «картография». После окончания института работает в АО «НИИП центр «Природа» (ранее — Государственный научно-исследовательский и производственный центр «Природа»), в настоящее время — начальник сектора научно-технической информации, ученый секретарь. Кандидат технических наук.

С.А. Ефимов (НИИП центр «Природа»)

В 1983 г. окончил Ленинградское высшее военное топографическое командное училище по специальности «военная картография». После окончания училища проходил службу в кадрах ВС СССР и ВС РФ. С 2005 г. работает в АО «НИИП центр «Природа» (ранее — Государственный научно-исследовательский и производственный центр «Природа»), в настоящее время — директор научно-технического комплекса. Кандидат технических наук.

А.Е. Семенов («Геоскан», Санкт-Петербург)

В 1986 г. окончил физический факультет Ленинградского государственного университета имени А.А. Жданова (в настоящее время — Санкт-Петербургский государственный университет) по специальности «физик». С 2011 г. работает в ООО «Геоскан», в настоящее время — генеральный директор.

В.Я. Масляк (НПФ «ТАЛКА-ГЕО»)

В 1982 г. окончил геологоразведочный факультет Ивано-Франковского института нефти и газа (в настоящее время — Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина) по специальности «прикладная геодезия». С 2010 г. работает в ООО НПФ «ТАЛКА-ГЕО», в настоящее время — главный инженер.

М.Н. Чижов («Сибниуглеобогащение», Красноярск)

В 2001 г. окончил строительный факультет промышленного и гражданского строительства Красноярской государственной архитектурно-строительной академии, в 2007 г. — факультет подземной разработки месторождений полезных ископаемых Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета (Красноярск). В 2013 г. прошел профессиональную переподготовку по направлению «Маркшейдерское дело» в СГУиТ (Новосибирск). С 1992 г. работал в ОАО «Разрез «Березовский-1», с 2015 г. — в ООО НПФ «ТАЛКА-ГЕО». С 2016 г. работает в филиале ООО «Сибниуглеобогащение» (Красноярск), в настоящее время — главный специалист отдела проектирования открытых горных работ.

В соответствии с Федеральным законом о техническом регулировании [1], Концепцией развития отрасли геодезии и картографии до 2020 г. [2], а также с государственной программой РФ об экономическом развитии и инновационной экономике [3], в процессе карто-

графирования территории РФ и ее отдельных регионов становится актуальной сертификация технологий создания различных видов картографической продукции, формируемых с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в том числе, получаемых с

беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

В современных условиях предлагаются технологии получения различных видов цифровой картографической продукции двойного назначения с использованием БПЛА. Задача оценки этих технологий на со-

ответствие требованиям, предъявляемым к создаваемой с их помощью картографической продукции (сертификация), представляется не только актуальной и востребованной, но и обязательной.

В АО «НИИП центр «Природа» в течение последних лет разрабатываются требования к сертификации различных видов картографической продукции, создаваемой с использованием данных ДЗЗ [4], включая сертификацию цифровой продукции для решения задач картографии и маркшейдерии, создаваемой с использованием измерительных комплексов на основе БПЛА.

В данной статье авторы делятся опытом сертификации технологии применения беспилотных летательных аппаратов для создания ортофотопланов, цифровых моделей местности (ЦММ), включающих цифровые модели рельефа (ЦМР) и цифровые модели поверхностей, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов к топографическим планам различных масштабов и подсчету объемов горных выработок при выполнении маркшейдерских работ.

В марте-июле 2015 г. органом по сертификации ООО «Оборонкадастр», входящим в систему добровольной сертификации геодезической и картографической продукции федерального и специального назначения «Тестгеосервис», с привлечением сотрудников испытательной лаборатории НИИП центр «Природа» выполнялись работы по сертификации технологий, разработанных ООО «ПЛАЗ (Санкт-Петербург):

— Технология 1. Применение беспилотных летательных аппаратов серии Геоскан и программного обеспечения Фотоскан для создания ортофотопланов и ЦММ с точностью, соответствующей требованиям Инструкций [5, 6] к топографиче-

ским планам масштабов 1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000 (рис. 1).

— Технология 2. Применение беспилотных летательных аппаратов серии Геоскан и программного обеспечения Фотоскан для создания цифровых моделей поверхностей с целью определения объемов земляных работ и объемов горных выработок при добыче полезных ископаемых открытым способом, в соответствии с требованиями Инструкции [7] по маркшейдерскому учету объемов горных работ.

▼ **Методика проведения сертификационных испытаний**

Сертификации предшествовало создание в НИИП центр «Природа» нормативно-технических документов (НТД): «Требования к Технологии 1», «Требования к Технологии 2» и «Правила проведения сертификации Технологий». Согласно НТД, проверялось соответствие следующим основным показателям:

- назначение;
- состав;
- функциональные требования (в процессе получения и обработки информации);
- виды обеспечения;
- состав и параметры технических средств;
- программное обеспечение;
- информационная и программная совместимость;
- защита данных и программ;
- надежность;
- наличие документации.

Сертификационные испытания по каждой технологии выполнялись в три этапа: полевые работы, камеральная обработка полевых материалов и анализ полученных результатов на соответствие требованиям [5–8].

Полевые работы проводились в условиях испытательного полигона. Для выполнения полевых и камеральных работ привлекались сотрудники ООО

НПФ «ТАЛКА-ГЕО», имеющие большой опыт применения данной технологии для решения картографических и маркшейдерских задач [9].

▼ **Сертификационные испытания Технологии 1**

Полевые работы проходили на полигоне Государственного университета по землеустройству (ГУЗ) (рис. 2). Аэрофотосъемка (АФС) территории полигона выполнялась при помощи аэрофотосъемочного комплекса (АФК), состоящего из БПЛА самолетного типа Геоскан 101 (рис. 3), оснащенного цифровой фотокамерой Sony RX1 с размером результирующего кадра 24 Мпикселя, в двух режимах — при средней высоте съемки 150 м с размером пикселя на местности 3,5 см и при средней высоте съемки 300 м с размером пикселя на местности 7 см.

Основные технические характеристики БПЛА самолетного типа Геоскан 101:

- продолжительность полета — 1 час;

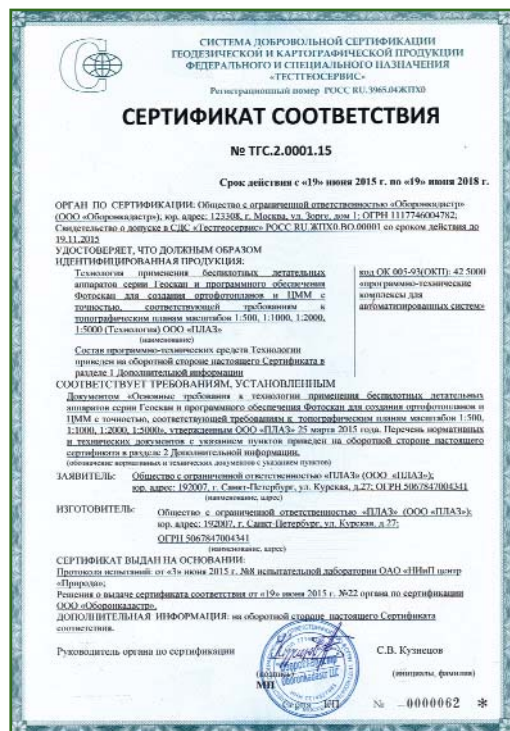


Рис. 1
Сертификат соответствия Технологии 1



Рис. 2
Общий вид полигона ГУЗ с пунктами плано-высотного обоснования

- радиус действия — 25 км;
- минимальная/максимальная скорость — 54/108 км/ч;
- рабочая (крейсерская) скорость — 60 км/ч;
- высота полета — от 100 до 3000 м;
- рабочая высота полета — 120–300 м;
- площадь участка съемки за 1 полет при средней высоте полета 150 м — 3–4 км².

При средней высоте съемки 150 м было получено 847 снимков, а при средней высоте съемки 300 м — 551 снимок. Кроме того, были получены файлы данных с датчиков автопилота в моменты фотографирования, включающие идентификатор снимка, навигационные координаты, барометрическую высоту, крен, тангаж и курс.

Координаты центров фотографирования (ЦФ) снимков определялись с помощью бортового двухчастотного приемника GPS/ГЛОНАСС в режиме кинематики. Средняя ошибка определения координат центров фотографирования в плане составила 0,019 м, по высоте — 0,016 м. Оценка точности проводилась средствами программного обеспечения (ПО) Topcon Tools.

Для оценки точности ортопланов и ЦМР использовались контрольные точки: четкие контуры местности и опознаки, закрепленные на местности до выполнения АФС (рис. 4). Общее количество контрольных точек составило 22 (10 контуров местности и 12 опознаков). Координаты контрольных точек определялись геодезическим приемником GPS/ГЛОНАСС в режиме быстрой статики. Базовые станции ГНСС располагались на пунктах плано-высотного обоснования, заложенных на полигоне (рис. 2), взаимное

местоположение которых по результатам оценки точности составило 0,002 м. Постобработка и уравнивание спутниковых измерений выполнялись в ПО Topcon Tools 8.2.3. Средняя ошибка определения координат контрольных точек в плане составила 0,005 м, а по высоте — 0,007 м.

Во время выполнения полевых работ проводилась проверка соответствия всех процессов основным требованиям, указанным в НТД.

Создание трехмерной модели местности, ее масштабирование и ориентирование осуществлялись по пространственным координатам ЦФ снимков в ПО Фотоскан (Agisoft PhotoScan) [10]. Его особенностью является полностью автоматизированный процесс фотограмметрической обработки материалов АФС. Исходными данными при обработке служат аэрофотоснимки в одном из принимаемых системой форматов, пространственные координаты опорных точек, закрепленных на местности, и параметры съемочной камеры. При испытаниях в качестве опорных точек были приняты пространственные координаты ЦФ снимков. Поиск связующих точек на снимках в программе реализуется современными методами машинного зрения. Параметры ка-



Рис. 3
Подготовка к полету АФК на основе БПЛА Геоскан 101

либровки камеры (в том числе коэффициенты радиальной и тангенциальной дисторсии) определяются при обработке снимков [11]. Расчет дисторсий происходит в процессе нелинейной оптимизации. При построении модели главной задачей является минимизация невязки по связующим точкам, а также по координатам ЦФ снимков и опорных точек. При этом неизвестными параметрами модели выступают как параметры внешнего ориентирования фотокамеры (координаты центра фотографирования и углы поворота камеры), так и параметры внутреннего ориентирования (фокусное расстояние, координаты главной точки, коэффициенты дисторсий). Для оптимизации модели используется метод Гаусса-Ньютона с контролем шага на каждой итерации [12].

В результате фотограмметрической обработки было создано плотное облако точек, которое экспортировалось в виде полигональной модели поверхности (DEM — в формате GeoTIFF и TIN — в формате DXF) и ортофотоплана в формате JPEG. Кроме того, была создана структурированная цифровая модель местности. Такую модель удобно использовать в процессе камерального дешифрирования контуров и высотных объектов, например, определять типы строений и их этажность, структурные линии естественного и искусственного рельефа и т. д.

ПО Фотоскан также позволяет классифицировать плотное облако точек по типу (растительность, искусственные сооружения и др.), отфильтровать точки рельефа земной поверхности и получить цифровую модель рельефа [10]. Именно такая модель использовалась для оценки точности.

Оценка точности ортофотопланов и ЦМР выполнялась путем сравнения пространственных координат (X, Y, Z) конт-



Рис. 4

Контрольные точки: контуры местности (вверху) и опознаки (внизу)

рольных точек модели (32с, 58с, 67с, рис. 5) с пространственными координатами этих же точек, определенных инструментально по спутниковым измерениям (32, 58, 67, рис. 5). Для получе-

ния плановых координат X и Y точек модели использовалась программа Global Mapper. Пример определения плановых координат контрольных точек модели показан на рис. 3.

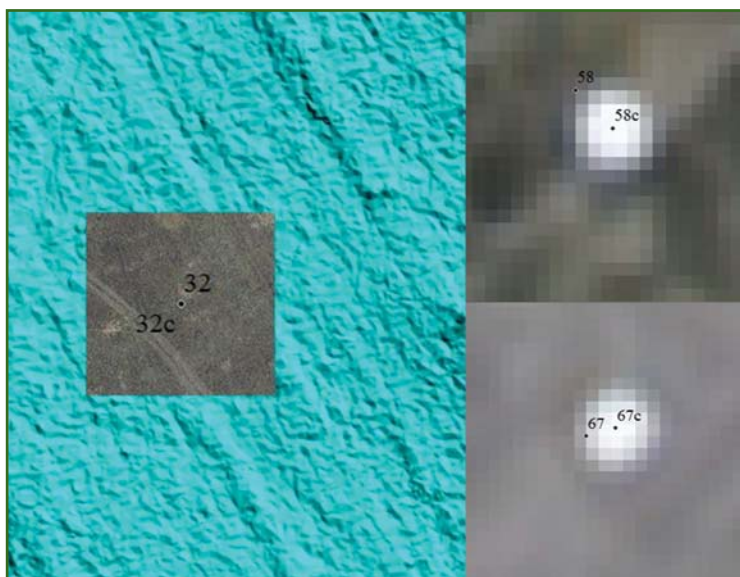


Рис. 5

Отображение положения контрольных точек на снимке (слева) и в программе Global Mapper (справа)

Результаты оценки точности ортофотопланов и ЦМР

Таблица 1

	Ошибки контрольных точек		
	Минимальная	Максимальная	Средняя
<i>Средняя высота съемки 150 м</i>			
В плане, м	0,017	0,100	0,041
По высоте, м	0,001	0,110	0,058
<i>Средняя высота съемки 300 м</i>			
В плане, м	-0,017	0,120	0,058
По высоте, м	0,002	0,103	0,042

Центры контрольных точек в плане указывались оператором визуально. Координата Z присваивалась им по ЦМР.

Результаты оценки точности ортофотопланов и ЦМР, полученных по материалам АФС с разных высот съемки по 22 контрольным точкам, приведены в табл. 1.

▼ Сертификационные испытания Технологии 2

При сертификации Технологии 2 методика и состав работ по плано-высотной геодезической подготовке, аэрофотосъемке и фотограмметрической обработке материалов АФС были аналогичны сертификации Технологии 1.

Полевые работы проводились на территории угольного разреза предприятия АО «Разрез Березовский» в Шарыповском районе Красноярского края.

Аэрофотосъемка выполнялась при помощи АФК, состоящего из квадрокоптера Геоскан 401 (рис. 6), оснащенного цифровой фотокамерой Sony RX1 с размером результирующего кадра 24 Мпикселя и бортовым двухчастотным приемником GPS/ГЛОНАСС для точного определения координат ЦФ снимка.

Основные технические характеристики квадрокоптера Геоскан 401:

- продолжительность полета — 1 час;
- радиус действия — 15 км;

- вертикальная/горизонтальная скорость — 5/60 км/ч;
- рабочая (крейсерская) скорость — 30 км/ч;
- высота полета — 500 м;
- рабочая высота полета — 30–200 м;

— площадь участка съемки за 1 полет при средней высоте полета 75 м — 0,5 км².

В качестве эталона был принят участок устоявшегося отвала пустой породы площадью 0,04 км² (рис. 7). На участке была выполнена детальная тахеометрическая съемка в масштаба 1:200 с сечением рельефа горизонталями через каждые 0,25 м. Плотность пикетов составила 280 точек на 0,01 км² (1120 точек на участок). В процессе камеральных работ по данным тахеометрической съемки с учетом структурных линий рельефа в ПО AutoCAD Civil 3D была построена трехмерная модель поверхности в виде TIN-поверх-



Рис. 6

АФК на основе квадрокоптера Геоскан 401 перед полетом



Рис. 7

Полигон на территории АО «Разрез Березовский»

Характеристики различных вариантов трехмерных моделей

Таблица 2

Характеристики модели	Модель по данным тахеометрической съемки (эталон)	Модели по данным АФС		
		Плотная	Средняя	Редкая
<i>Общие</i>				
Количество точек	1120	31 542	15 618	3069
Средняя отметка, м	280,52	280,52	280,52	280,53
Отклонение средней отметки от эталона, м		0	0	-0,01
<i>Расширенные</i>				
Площадь двумерной поверхности, м ²	39 703,18	39 703,18	39 703,18	39 703,18
Площадь трехмерной поверхности, м ²	41 374,87	41 779,52	41 701,64	41 378,83
<i>TIN-поверхность</i>				
Количество треугольников	2144	61 505	30 134	5615
Максимальная площадь треугольника, м ²	107,59	5,98	7,94	31,66

ности на основе триангуляции Делоне.

Для анализа точности построения ЦМР по сертифицируемой технологии плотное облако точек, созданное по материалам обработки АФС в ПО Фотоскан, было экспортировано в ПО AutoCAD Civil 3D в формате DXF в виде ЦМР с различной детальностью отображения рельефа. С помощью этого ПО были построены трехмерные модели поверхности в виде TIN-поверхности — плотная, средняя и редкая. Это было сделано, поскольку размер файла DXF, содержащий трехмерную модель поверхности, зависит от количества треугольников TIN-поверхности и в значительной степени влияет на производительность обработки в ПО AutoCAD Civil 3D. Минимизация избыточных геопространственных данных является важным условием построения трехмерных моделей поверхностей. Было необходимо выяснить, как степень детализации отображения рельефа влияет на точность определения объемов по ЦМР. Характеристики этих моделей, а также модели, построенной по данным тахеометрической съемки, представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, трехмерные модели поверхностей, построенные по данным тахе-

метрической съемки и полученные по материалам АФС, близки, а средняя отметка их поверхностей практически совпадает. На рис. 8 представлена совмещенная трехмерная модель поверхностей, построенных по данным тахеометрической съемки и по плотной модели, полученной по материалам АФС.

Оценка точности построения ЦМР проводилась путем сравнения высотных отметок одноименных точек, полученных при тахеометрической съемке (Z_{it}), и по цифровой модели рельефа, построенной по материалам АФС (Z_i). При оценке точности ЦМР высотные отметки Z_{it} принимались за истинные (безошибочные).

В результате обработки средние абсолютные значения разностей $\Delta Z = Z_i - Z_{it}$ для моделей, полученных по данным АФС с различной детальностью отображения рельефа, составили:

- плотная — 0,0395 м;
- средняя — 0,0632 м;
- редкая — 0,1080 м.

По моделям разной детальности в ПО AutoCAD Civil 3D были рассчитаны объемы тела отвала относительно исходной поверхности. За исходную была принята поверхность, построенная по данным тахеометрической съемки до отсыпки отвала. Отклонения между объемами отвала, рассчитанными по цифровым моделям рельефа, построенным по данным АФС и по



Рис. 8
Совмещенная трехмерная модель поверхностей в ПО AutoCAD Civil 3D

Анализ расчета объемов отвала по различным вариантам моделей

Таблица 3

Способ получения модели и ее детальность	Выемка, м ³	Насыпь, м ³	Разность, м ³	Отклонение от эталона, м ³	Отклонение от эталона, %
Тахеометрическая съемка	2395,13	235 095,42	232 700,29		
АФС (плотная)	2431,61	235 308,6	232 876,99	176,7	0,08
АФС (средняя)	2430,1	235 291,98	232 861,88	161,59	0,07
АФС (редкая)	2359,07	235 349,44	232 990,37	290,08	0,12

данным тахеометрической съемки, приведены в табл. 3.

Для сравнения результатов определения объема вынутых горных пород вскрышного уступа, разрабатываемого на разрезе АО «Разрез Березовский», маркшейдерской службой предприятия параллельно были выполнены измерения поверхности вскрышного уступа 22.06.2015 г. и 29.06.2015 г. методом тахеометрической съемки и методом аэрофотосъемки с применением АФК на основе квадрокоптера Геоскан 401. На рис. 9 представлены ортофотопланы вскрышного уступа разреза на разные даты, на рис. 10 показан совмещенный план состояния вскрышного уступа разреза до и после выемки горной породы в горизонталях, а на рис. 11 — совмещенные ЦМР до и после выемки горной породы.

Объемы вынутых горных пород, рассчитанные в ПО AutoCAD Civil 3D, составили: по данным тахеометрической съемки — 58 000,00 м³, а по материалам АФС — 58 970,41 м³.

Расхождение между вычисленным объемом вынутых горных пород по материалам аэрофотосъемки с применением беспилотного АФК на основе квадрокоптера Геоскан 401 и по данным тахеометрической съемки составило 970,41 м³ или 1,65% от общего объема. Эта погрешность не превышает допустимую погрешность определения объема вынутых горных пород при маркшейдерской



Рис. 9
Ортофотопланы вскрышного уступа разреза на разные даты (22.06.2015 г. — сверху и 29.06.2015 г. — внизу)

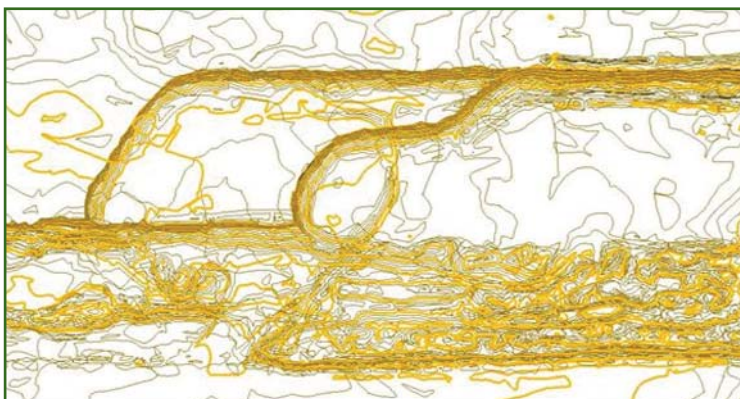


Рис. 10
Совмещенный план состояния вскрышного уступа разреза до и после выемки горной породы в горизонталях

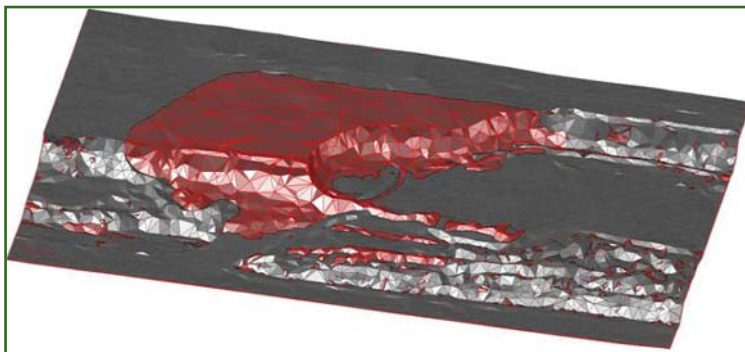


Рис. 11
Созмещенные ЦМР вскрышного уступа разреза до и после выемки горной породы

съемке вскрышного уступа, которая составляет 6,18%, согласно инструкции [7].

Результаты проведенных сертификационных испытаний Технологии 1 и Технологии 2 на основе БПЛА серии Геоскан показали их полное соответствие требованиям действующих нормативных документов [5–8], предъявляемым к ортофотопланам, цифровым моделям местности и цифровым моделям поверхностей.

По результатам испытаний ООО «Оборонкадастр» выданы Сертификаты соответствия и Свидетельства на право применения знака соответствия технологиям ООО «ПЛАЗ» в области картографии и маркшейдерии.

В заключение следует отметить, что сертификация технологии создания цифровой картографической продукции с использованием данных БПЛА предусматривает участие представителей разработчика и испытательной лаборатории во всех этапах, касающихся:

- разработки порядка проведения испытаний;
- испытаний на полигоне;
- камеральной обработки данных;
- сопоставления полученных результатов требованиям нормативной базы.

Для сокращения сроков работ по сертификации и затрат на их проведение авторами

предлагается видеоизменить описанную выше схему.

Порядок проведения испытаний разрабатывают сотрудники испытательной лаборатории.

Испытания на полигоне и камеральную обработку данных осуществляют специалисты разработчика с гарантированным предоставлением всех параметров, характеристик и материалов, согласно утвержденному порядку их проведения.

Далее для сопоставления полученных результатов с требованиями нормативной базы в испытательной лаборатории, на специальном аппаратно-программном комплексе (стенде), с установленными на нем необходимыми программами и системой требований к каждому из этапов Технологии, осуществляется аудит присланной для сертификации продукции. При положительных результатах испытаний выдается сертификат.

В связи с вышеизложенным, целесообразна отработка и стандартизация системы требований к испытанию на стенде технологий создания и обновления цифровой картографической продукции по данным ДЗЗ различных уровней и видов.

▼ Список литературы

1. Федеральный Закон «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 г.
2. Концепция развития отрасли геодезии и картографии до 2020 г.

Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17 декабря 2010 г. № 2378-р.

3. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. N 316 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Экономическое развитие и инновационная экономика» (с изменениями и дополнениями).

4. Ефимов С.А., Бровко Е.А., Алтынов А.Е. Совершенствование системы сертификации технологий создания и обновления цифровой картографической продукции по данным ДЗЗ, в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов // Тезисы докладов IV Международной конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка на рубеже веков». — М., 2015.

5. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. ГКИНП (ГНТА) — 02-36-02.

6. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. ГКИНП — 02-033-82.

7. Инструкция по маркшейдерскому учету объемов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом. РД 07-604-03.

8. Основные положения для аэрофотосъемки, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов. ГКИНП-09-32-80.

9. Лаптева М.И., Масляно В.Я., Финажин Д.Н., Чижов М.Н. Использование данных ДЗЗ с применением аэрофотосъемочного комплекса GeoScan-101 в САПР AutoCAD Civil 3D (опыт работы на угольных разрезах СУЭК) // Автоматизация в промышленности. — 2014. — № 9.

10. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan. — www.agisoft.com.

11. 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.

12. Bill Triggs, Philip Mclauchlan, Richard Hartley, Andrew Fitzgibbon. Bundle Adjustment — A Modern Synthesis. Bill Triggs and Andrew Zisserman and Richard Szeliski. International Workshop on Vision Algorithms, Sep 2000, Corfu, Greece.