

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРАКТИКИ СТУДЕНТОВ НА «ЗАОКСКОМ ГЕОПОЛИГОНЕ» МИИГАИК

В.М. Курков (МИИГАИК)

В 1978 г. окончил аэрофотогеодезический факультет МИИГАИК по специальности «аэрофотогеодезия». После окончания института поступил в аспирантуру. Затем работал на кафедре геодезии МИИГАИК. В настоящее время — доцент кафедры фотограмметрии МИИГАИК. Кандидат технических наук.

А.В. Смирнов («Ракурс»)

В 2010 г. окончил факультет прикладной космонавтики и фотограмметрии МИИГАИК по специальности «аэрофотогеодезия». С 2008 г. работал в ООО «Северная географическая компания», с 2010 г. — в ООО «Геострой» и ЗАО «Центр перспективных технологий». С 2012 г. работает в компании «Ракурс», в настоящее время — менеджер отдела технической поддержки. Аспирант кафедры фотограмметрии МИИГАИК.

Д.П. Иноземцев («Геоскан», Санкт-Петербург)

В 1982 г. окончил аэрофотогеодезический факультет МИИГАИК по специальности «инженер-аэрофотогеодезист». После окончания института работал на предприятиях ГУГК при СМ СССР и Роскартографии. С 2013 г. работает в ООО «Геоскан», в настоящее время — инженер-геодезист.

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) находят все большее применение для выполнения аэрофотосъемки, материалы которой используются для решения многих задач в различных областях жизнедеятельности человека, в частности, для создания карт и цифровых моделей местности, мониторинга природных явлений и результатов жизнедеятельности человека.

Многообразие БЛА и устанавливаемой на них съемочной и навигационной аппаратуры вызывает необходимость разработки теоретически обоснованных рекомендаций по выбору параметров аэрофотосъемки в зависимости от масштаба создаваемых карт и точности создания цифровых моделей местности. Разнообразие задач мониторинга природных явлений и результатов жизнедеятельности чело-

века при проведении проектно-изыскательских работ и ведении кадастра требует разработки рекомендаций по технологии использования различных БЛА для решения этих задач. Очевидно, что достоверность разработанных рекомендаций должна быть подтверждена опытно-производственными работами.

Наиболее полно и объективно проверить и оценить технологии картографирования и мониторинга местности с использованием аэрофотосъемочной аппаратуры, установленной на БЛА, можно по материалам аэрофотосъемки тестового полигона, обеспечивающего возможность оценки качества создаваемой продукции по опорным и контрольным геодезическим опознакам и другой контрольной информации.

С этой целью в Московском государственном университете

геодезии и картографии (МИИГАИК) в 2011 г. начались работы по созданию специализированного исследовательского полигона на базе «Заокского геополигона» МИИГАИК (Тульская обл.) для разработки и оценки технологий картографирования и мониторинга местности с использованием аэрофотосъемочных комплексов, установленных на БЛА [1].

Для создания необходимой инфраструктуры испытательного полигона привлекаются студенты III курса МИИГАИК специальности «аэрофотогеодезия», проходящие комплексную практику по созданию цифровых карт, планов и моделей местности. Программа практики включает выполнение следующих видов работ: создание и развитие локальных геодезических сетей, аэрофотосъемка с использованием БЛА, планово-

высотная подготовка аэрофотоснимков, полевое дешифрирование, фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки, полевое обследование и досъемка создаваемых топографических карт и планов.

Летно-съёмочные работы и результаты комплексной практики студентов в 2011–2012 гг.

В 2011 г. компания «АФМ-Серверс» выполнила первые залеты на полигоне с использованием аэрофотосъемочного комплекса «ПТЕРО-Е4». Было получено два блока аэрофотоснимков: один (блок 1), с высоты 1100 м, состоял из 9 маршрутов, включающих 653 снимка (рис. 1), а второй (блок 2), с высоты 400 м, — из 9 маршрутов, включающих 372 снимка (рис. 2). Аэрофотосъемка выполнялась зеркальной цифровой фотокамерой CANON EOS 5D Mark II с форматом матрицы 5616x3714 пикселей и размером пикселя 6,5 мкм. Фокусное расстояние объектива — 50 мм. Затвор — ламельный, позволяющий работать при низких температурах. Пространственное разрешение на местности в первом случае составило 14 см/пиксель, во втором — 5 см/пиксель. Перед полетами

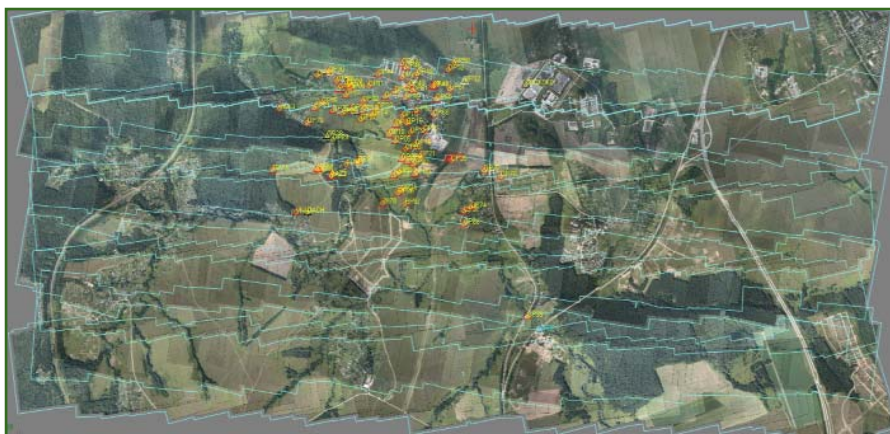


Рис. 1
Схема аэрофотосъемки БЛА «ПТЕРО-Е4» с высоты фотографирования 1100 м

Оценка точности уравнивания сети фототриангуляции Таблица 1

Наименование показателей	Значения показателей	
	Блок 1	Блок 2
Разрешение на местности, см	14	5
СКП на опорных точках в плане (по высоте), см	18 (5)	15 (15)
Число опорных точек	75	32
СКП на опорных центрах фотографирования в плане (по высоте), см	15 (17)	32 (74)
Число опорных центров фотографирования	653	372

в МИИГАиК, на кафедре фотограмметрии, в лабораторных условиях, была выполнена калибровка камеры: определены элементы внутреннего ориентирования и параметры дисторсии объектива. На борту был установлен двухчастотный прием-

ник ГНСС Topcon Euro-160T, который позволил определять координаты центров фотографирования во время полета. На базовой станции работал многоканальный мультиспотовый приемник ГНСС Trimble R7 с интервалом записи данных 1 с.

Координаты центров фотографирования были вычислены в программе GrafNav сотрудниками компании «ГНСС плюс». В качестве точек планово-высотной подготовки аэроснимков использовались закрепленные на местности опознаки (в виде пластиковых кругов диаметром 32 см) и естественные контурные точки. Координаты и высоты опознаков независимо определялись дважды с использованием приемников ГНСС. Максимальные расхождения плановых координат не превысили 2 см, а высот — 4 см.

Построение и уравнивание сети фототриангуляции выпол-

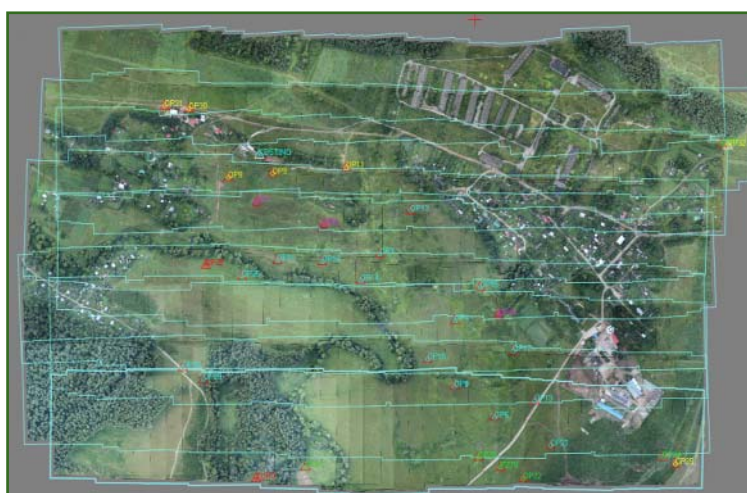


Рис. 2
Схема аэрофотосъемки БЛА «ПТЕРО-Е4» с высоты фотографирования 400 м

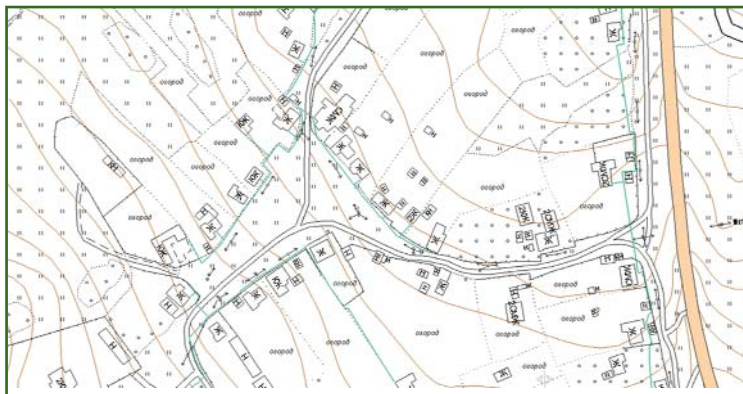


Рис. 3
Топографический план деревни Верхнее Романово в масштабе 1:2000 с сечением рельефа 1 м

нялось в цифровой фотограмметрической системе (ЦФС) PHOTOMOD. Результаты уравнивания блоков по способу связей приведены в табл. 1.

Точность уравнивания блока 1 обеспечивает создание топографического плана масштаба 1:2000 с сечением рельефа 1 м, а блока 2 — топографического плана масштаба 1:500 с сечением рельефа 1 м, в соответствии с требованиями инструкции [2].

В пределах деревни Верхнее Романово в ходе учебной практики было выполнено сплошное полевое дешифрирование. Камеральные работы включали: фототриангуляцию, построение модели рельефа в виде триангуляции Делоне и матрицы высот, создание ортофотоплана, создание оригинала рельефа в режиме стереоредактирования горизонталей. Векторизация контурной части плана осуществлялась комбинированно: здания и сооружения — в стереорежиме, остальные объекты — по ортофотоплану. Окончательное оформление топографического плана было выполнено в ГИС «Карта 2011» рис. 3.

Следует отметить, что интегрированная в ЦФС PHOTOMOD ГИС «Карта 2011 mini» позволяет достаточно эффективно создавать цифровые карты и планы, сохраняя целостность топологических связей и семантической информации.

Для создания топографического плана масштаба 1:500 с сечением рельефа 1 м были выбраны аэрофотоснимки блока 2 (рис. 4), покрывающие деревню Костино.

Обработка в ЦФС PHOTOMOD включала:

— уравнивание сети фототриангуляции с использованием в качестве обоснования 15 наземных опорных точек и 21 опорного центра фотографирования;

— построение цифровой модели рельефа (ЦМР) в виде матрицы высот и горизонталей с редактированием последних в стереорежиме (рис. 5);

— создание ортофотоплана с последующим составлением топографического плана масштаба 1:500 с сечением рельефа 1 м (рис. 6).

Оценка точности уравнивания сети фототриангуляции на деревню Костино показала, что средние квадратические погрешности (СКП) на опорных точках составили 8 см в плане и 4 см по высоте, а на опорных центрах фотографирования, соответственно, 22 см и 12 см.



Рис. 4
Деревня Костино на аэрофотоснимках блока 2

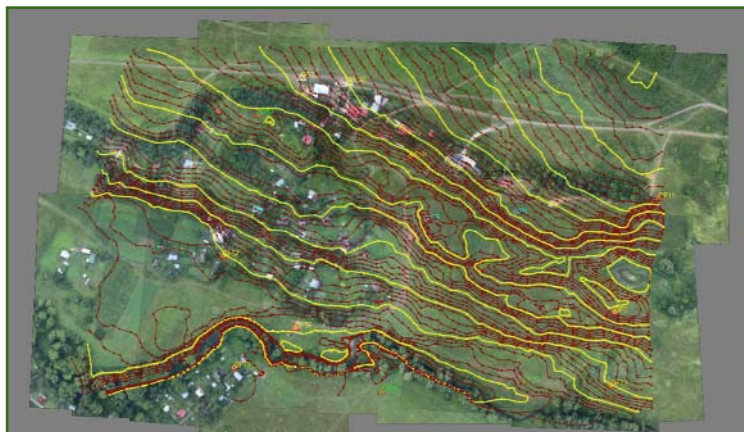


Рис. 5
Построение горизонталей в интерактивном режиме



Рис. 6

Топографический план деревни Костино в масштабе 1:500 с сечением рельефа 1 м

На время проведения летней практики студентов МИИГАиК в 2012 г. компания НАВГЕОКОМ предоставила электронный тахеометр и приемник ГНСС [3]. С помощью этого оборудования автономно, в режиме реального времени, был выполнен полевой контроль ортофотоплана на деревню Костино, созданного в 2011 г. С автономной переходной точки были определены координаты 15 твердых контуров, хорошо опознаваемых на ортофотоплане. Расхождения между плановыми координатами контрольных точек, полученных электронным тахеометром и измеренных на ортофотоплане, находились в пределах 5–17 см, что удовлетворяет точности топографического плана масштаба 1:500 [2].

▼ Летно-съёмочные работы и результаты комплексной практики студентов в 2013 г.

Летно-съёмочный этап практики студентов МИИГАиК в 2013 г. выполнялся с привлечением компаний, занимающихся разработкой и распространением беспилотных аэрофотосъёмочных комплексов: «АФМ-Серверс» (БЛА «Птеро-Е5»), «Геоскан» (БЛА GeoScan 101) и «Нованэт» (БЛА GateWing X100). В течение двух дней специалисты каждой из перечисленных организаций ознакомили студентов с конструкцией БЛА, обучили проектированию, подготовке и

выполнению полетов. Это позволило студентам самостоятельно осуществить 8 запусков различных типов БЛА. Основные технические характеристики БЛА и параметры аэрофотосъемки приведены в табл. 2.

После аэрофотосъемки каждым типом БЛА и предварительной обработки полученной информации, студенты проводили фотограмметрическую обработку данных в ЦФС PHOTOMOD (совместно с представителем компании «Ракурс») и в фотограмметрической системе PhotoScan (совместно с представителем компании «Геоскан») [4]. Камеральные работы включали построение сети фототриангуляции, цифровой модели местности, цифрового ортофотоплана и трехмерной модели местности.

Схемы расположения опорных (точки черного цвета) и контрольных (точки желтого цвета) точек для каждого типа БЛА приведены на рис. 7–9.

Результаты построения и уравнивания фототриангуляции в системе PhotoScan приведены в табл. 3, а в ЦФС PHOTOMOD — в табл. 4.

В табл. 3 и 4 величины ожидаемых СКП в плане и по высоте для различных уравненных блоков вычислены по известным формулам: $m_{x,y} = z/f m$ и $m_z = z/b m_p$. Причем, точность измерения координат (m) и параллаксов (m_p) на снимках была принята равной 0,5 пикселя.

Сравнивая полученные значения с остаточными средними погрешностями на контрольных точках после уравнивания в плане, видно, что они, как правило, в 2–4 раза больше рассчитанных по формулам. Это свидетельствует о том, что реальная измерительная точность изображений составляет 2–3 пикселя, и это следует учитывать при проектировании аэрофотосъемки. Основными источниками погрешностей в изображениях, полученных с БЛА, на наш взгляд, являются «смазы», геометрические искажения, вызванные эффектом шторно-щелевого затвора [5].

Согласно инструкции [2], остаточные средние погрешности высот на опорных точках не должны превышать $0,15h_{сеч}$ ($h_{сеч}$ — высота сечения рельефа), а в плане — 0,2 мм в масштабе плана. Для контрольных точек, соответственно, по высоте — 0,2 $h_{сеч}$ (при съемках с высотой сечения рельефа 1 м)

Основные технические характеристики БЛА и параметры аэрофотосъемки

Таблица 2

Наименование параметров	Тип БЛА		
	«Птеро-Е5»	GeoScan 101	GateWing X100
Съёмочная камера	Nikon D800	Sony NEX 5R	Ricoh GR Digital 4
Фокусное расстояние (f), мм	50	16	6
Общее число снимков	1450	1235	541
Высота фотографирования (z), м	240	190	170
Общая площадь съемки, км ²	3,06	5,06	1,09
Разрешение на местности, см/пиксель	2,2	5,1	5,2



Рис. 7

Схема расположения опорных и контрольных точек для блока АФС БЛА «Птеро-Е5»

и в плане — 0,3 мм в масштабе плана. Например, при создании плана масштаба 1:500 с сечением рельефа 1 м величина средних расхождений для опорных точек не должна превышать: в плане 10 см, а по высоте 15 см, а для контрольных точек, соответственно, 15 см и 20 см. С этой точки зрения все обработанные материалы пригодны для создания планов масштаба 1:500 с сечением рельефа 1 м.

Контроль планового положения опорных и контрольных то-

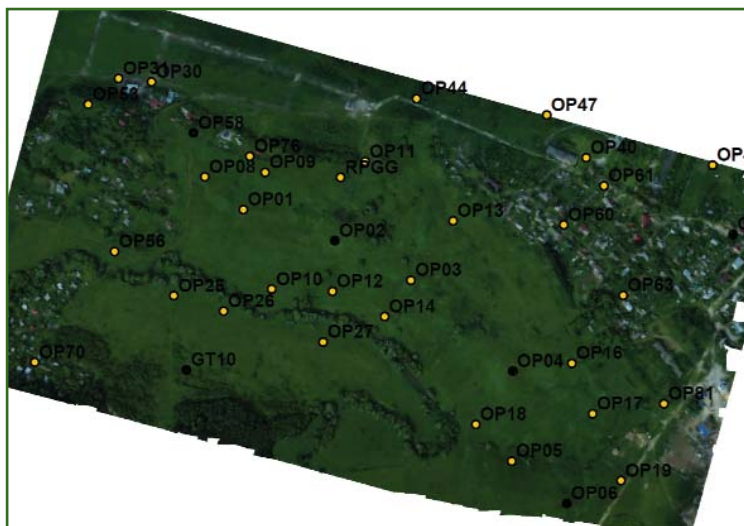


Рис. 8

Схема расположения опорных и контрольных точек для блока АФС БЛА GateWing X100

чек на ортофотоплане был выполнен по разности плановых координат этих точек и их значений, выбранных из соответствующих каталогов. Результаты оценки точности в каждой фотограмметрической системе представлены в табл. 5.

Полученные результаты обработки данных аэрофотосъемки, выполненной с помощью БЛА, позволяют сделать вывод, что материалы пригодны для создания ортофотопланов, удовлетворяющих требованиям инструкции по созданию планов масштаба 1:500 [2], поскольку средние величины погрешностей планового положе-

ния опорных и контрольных точек не превышают 25 см.

При создании цифровых топографических карт и планов с использованием ортофотопланов как растровой основы необходимо учитывать два фактора: геометрический (разрешающая способность цифрового ортофотоплана и точность его построения) и радиометрический (фотографическое качество, определяющее возможность распознавания (дешифрирования) топографических объектов).

Пространственное разрешение цифрового ортофотоплана на местности не должно быть более 0,1 мм в масштабе созда-

Результаты уравнивания фототриангуляции в фотограмметрической системе PhotoScan

Таблица 3

Наименование параметров	Тип БЛА		
	«Птеро-Е5»	GeoScan 101	GateWing X100
Число снимков в блоке	1450	1235	541
Площадь съемки, км ²	3,06	5,06	1,09
Число опорных (контрольных) точек в блоке	7 (27)	9 (56)	6 (32)
Количество опорных (контрольных) точек в блоке на 1 км ²	2,2 (8,8)	1,8 (11,1)	5,5 (29,4)
Остаточные средние погрешности на опорных (контрольных) точках после уравнивания в плане, см	1,2 (3)	4,2 (11,7)	1,8 (6,2)
Ожидаемые СКП в плане при уравнивании блока, см	1,7	2,9	2,3
Остаточные средние погрешности на опорных (контрольных) точках после уравнивания по высоте, см	0,9 (5,9)	0,8 (14,1)	7,1 (11,5)
Ожидаемые СКП по высоте при уравнивании блока, см	10,5	9,3	13,0

Результаты уравнивания фототриангуляции в ЦФС PHOTOMOD

Таблица 4

Наименование параметров	Тип БЛА		
	«Птеро-Е5»	GeoScan 101	GateWing X100
Число снимков в блоке	260	65	260
Площадь съемки, км ²	0,64	1,14	0,56
Число опорных (контрольных) точек в блоке	7 (7)	10 (5)	8 (7)
Количество опорных (контрольных) точек в блоке на 1 км ²	1,5 (7,3)	10,8 (6,3)	1,8 (18,5)
Остаточные средние погрешности на опорных (контрольных) точках после уравнивания в плане, см	11 (11)	10 (5)	14 (12)
Ожидаемые СКП в плане при уравнивании блока, см	1,7	2,9	2,2
Остаточные средние погрешности на опорных (контрольных) точках после уравнивания по высоте, см	1,3 (17,3)	10,8 (6,3)	19,9 (18,5)
Ожидаемые СКП по высоте при уравнивании блока, см	10,5	9,3	13,0

ваемого плана (карты), поэтому с учетом потери качества, вызванной преобразованием исходных изображений в ортофотоплан, следует проектировать аэрофотосъемку с «запасом» пространственного разрешения на местности не менее чем в два раза [6]. Например, для создания планов масштаба 1:500 не 5 см, а 2,5 см. На рис. 10 приведены изображения в масштабе 1:1, полученные различными БЛА, которые показывают, что с учетом вышесказанного, БЛА GeoScan 101 и GateWing X100 целесообразно рекомендовать для создания топографических планов масштаба 1:1000.

Фотографическое качество определяется выбором съемочной камеры и оптимальной экспозиции во время аэрофотосъемки [7]. На БЛА используются, как правило, любительские или профессиональные фотокамеры, изначально не предназначенные для аэрофотосъемки,

поэтому качество изображений, полученных с подвижных носителей, кроме исходных функциональных возможностей камеры, объектива, размера и типа матрицы, зависит от правильно выбранной выдержки, диафрагмы и светочувствительности. «Смаз» изображения, вызванный движением носителя, приводит к потере качества изображения и, как следствие, ухудшению дешифровочных свойств. Для минимизации этого эффекта необходимо стремиться к коротким выдержкам.

Опыт, полученный студентами при проведении учебной практики с использованием БЛА для выполнения аэрофотосъемки, и результаты последующей обработки материалов в различных фотограмметрических системах позволяют сделать некоторые выводы.

Первый из них — это польза для будущих специалистов, поскольку они не только осваивают



Рис. 9
Схема расположения опорных и контрольных точек для блока АФС БЛА GeoScan 101

новые технологии, но и сами участвуют в исследовательской работе.

Второй — тесное сотрудничество преподавателей университета с разработчиками БЛА и программных средств, предназначенных для обработки аэрофотосъемки, способствует совершенствованию данной тех-

Оценка точности полученных ортофотопланов

Таблица 5

Наименование параметров	Фотограмметрическая система	Тип БЛА		
		«Птеро-Е5»	GeoScan 101	GateWing X100
Разрешение ортофотоплана на местности, см	PhotoScan	3	5	5
	PHOTOMOD	3	5	5
Средние погрешности на опорных и контрольных точках, см	PhotoScan	11	12,2	11,3
	PHOTOMOD	6,5	8,3	18,4
Число опорных и контрольных точек	PhotoScan	38	46	34
	PHOTOMOD	17	15	18



Рис. 10

Изображения в масштабе 1:1, полученные различными БЛА:

а) GateWing X100 (разрешение на местности 5,2 см);

б) GeoScan 101 (разрешение на местности 5,1 см);

в) «Птеро-Е5» (разрешение на местности 2,3 см)

нологии и, как следствие, более широкому их внедрению в производство топографо-геодезических, кадастровых и проектно-изыскательских работ.

▼ Список литературы

1. Михайлов А.П., Курков В.М., Чибунчев А.Г. Испытательный полигон для тестирования беспилотных летательных аппаратов, ис-

пользуемых для картографирования и мониторинга территорий // Тезисы 11-й Международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии», Барселона, Испания, 2011 г.

2. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. — М.: ЦНИИГАиК, 2002.

3. Курков В.М., Капустина А.В. Комплексная учебная практика по созданию крупномасштабных карт и других документов о местности // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. — 2013. — № 3(50). — С. 62–64.

4. Иноземцев Д.П. Беспилотные летательные аппараты: Теория и практика // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. — 2013. — № 2(49), 3(50).

5. Михайлов А.П., Эдгар Рубен Монтель Андраде, Перес Вальдез Мануэль де Хесус. О применении цифровых фотокамер со шторно-щелевым затвором для выполнения аэрофотосъемки с легкомоторных и беспилотных летательных аппаратов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2013. — № 4.

6. Смирнов А.В. Научно-учебная практика с использованием БЛА в целях картографирования // Тезисы 13-й Международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии», Фонтенбло, Франция, 2013 г.

7. Михайлов А.П. Еще раз о выборе цифровых фотокамер для выполнения аэрофотосъемки с беспилотных аппаратов // Тезисы 12-й Международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии», Альгарве, Португалия, 2012 г.

RESUME

The use of UAVs for mapping of, and monitoring, areas is considered. It is noted that infrastructure development for the MIIGAik «Zaoksky Geopolygon» made possible to enhance the quality of education through the involvement of students in testing both UAVs and topographic aerial systems installed on manned vehicles.