

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

ВЕСТНИК
СГГА
(СИБИРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ)

Выпуск 4 (24)

Новосибирск
СГГА
2013

УДК 528:535:681.7
В387

Главный редактор
Доктор технических наук, профессор *А. П. Карник*

Редакционная коллегия:

Кандидат технических наук, профессор *В.Б. Жарников* – заместитель главного редактора;
член-корреспондент РАН, профессор, президент МИИГАиК *В.П. Савиных*;
доктор технических наук, профессор, ректор МИИГАиК *А.А. Майоров*;
доктор технических наук, профессор МИИГАиК *И. Г. Журкин*; доктор технических наук,
профессор, проректор МИИГАиК *А. Г. Чибуничев*; доктор технических наук, профессор
МИИГАиК *Х. К. Ямбаев*; доктор физико-математических наук, профессор *Г. А. Сапожников*;
член-корреспондент РАН, директор Института горного дела СО РАН *В.Н. Опарин*;
доктор биологических наук, директор Института почвоведения и агрохимии СО РАН
К. С. Байков; кандидат экономических наук, зам. руководителя Территориального управления
Росреестра по НСО *Д. А. Ламерт*; доктор физико-математических наук, профессор,
зав. лабораторией Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН *В. Ю. Тимофеев*;
доктор технических наук, профессор *А. И. Каленицкий*; доктор технических наук, профессор
Д. В. Лисицкий; кандидат технических наук, профессор *И. В. Лесных*;
доктор технических наук, профессор *В. Н. Москвин*; кандидат технических наук,
профессор *В. А. Середович*; доктор технических наук, профессор *Л. К. Трубина*;
доктор технических наук, профессор *В. Я. Черепанов*; доктор технических наук,
профессор *В. Б. Шлишевский*; кандидат технических наук, профессор *Т. А. Широкова*

В387 Вестник СГГА (Сибирской государственной геодезической академии) [Текст] :
науч.-технич. журн. / учредитель ФГБОУ ВПО «СГГА». – Вып. 4 (24). – Новоси-
бирск: СГГА, 2013. – 197 с. – ISSN 1818-913X

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

УДК 528:535:681.7

© ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (СГГА), 2013

Тел. (383)343-39-37, факс (383)344-30-60

e-mail: rektorat@ssga.ru

Учредитель – ФГБОУ ВПО «СГГА».

Рег. свид. ПИ № ФС 77-46974 от 14.10.2011 г.

Индекс 43809 в бюллетене «Объединенный каталог. Пресса России. Газеты и журналы»,
Internet-каталог «Российская периодика».

Журнал включен в систему РИНЦ.

УДК 528.71:338.5

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АЭРОФОТОСЪЕМОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Вячеслав Николаевич Никитин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Дмитрий Николаевич Раков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (952)907-21-08, e-mail: dir142@211.ru

В данной статье рассмотрены проблемы экономической эффективности аэрофотосъемки с использованием беспилотных аэрофотосъемочных комплексов (БАФК) малого класса в сравнении с классической аэрофотосъемочной системой на базе самолета АН-30. Показано, что при создании топографических планов масштаба 1 : 500 БАФК экономически эффективен для съемки территории до 5 квадратных километров. Показана структура затрат на проведение работ. Повышение экономической эффективности использования БАФК возможно при условии снижения затрат на создание планово-высотного съемочного обоснования.

Ключевые слова: беспилотный аэрофотосъемочный комплекс, экономическая эффективность, аэрофотосъемочные работы.

UNMANNED AERIAL PHOTOGRAPY COMPLEXES APPLICATION: COST-EFFECTIVENESS ASSESSMENT

Vyacheslav N. Nikitin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Assoc. Prof., Department of Physical Geodesy and Remote Sensing, tel. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Dmitry N. Rakov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., post-graduate student, Department of Physical Geodesy and Remote Sensing, tel. (952)907-21-08, e-mail: dir142@211.ru

The paper deals with cost-effectiveness of aerial photography using unmanned small-class aerial vehicle (UAV) complexes as compared with classical aerial photography system based on AN-30 aircraft. UAV is shown to be cost-effective for making topographic plans, scale 1 : 500, for the territory up to 5 square kilometers. The structure of costs for the works to be conducted is presented. UAV cost-effectiveness may be increased due to lower costs of horizontal and vertical control.

Key words: unmanned aerial vehicle complex, cost-effectiveness, aerial survey works.

В современном мире, наряду с традиционными пилотируемыми носителями, все более широкое применение при аэрофотосъемке находят малые беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [1]. Они компактны, мобильны и просты

в обслуживании [2, 3, 4]. Однако БПЛА имеют ряд недостатков перед традиционными видами носителей. Такими недостатками можно считать чувствительность к ветру и малый объем полезной нагрузки.

Вместе с ранее упомянутыми недостатками, ограничение на выполнение аэрофотосъемочных работ накладывает условия, при которых применение БПЛА экономически эффективно.

В данной статье будет определен пороговый размер съемочного участка, при котором БПЛА теряет свою эффективность перед традиционным аэрофотосъемочным оборудованием, специализированным самолетом-аэрофотосъемщиком АН-30, а также будут рассмотрены причины снижения экономической эффективности.

Для определения экономической эффективности использования БПЛА необходимо рассчитать финансовые затраты, которые определяются как совокупность всех затрат на производимые работы:

- 1) затраты на создание планово-высотного обоснования;
- 2) стоимость аэрофотосъемочных работ;
- 3) затраты на перевозку оборудования;
- 4) оплата труда сотрудников.

Расчет затрат на создание планово-высотного обоснования (ПВО).

Прежде чем считать непосредственно величину затрат, необходимо определить плотность размещения опознаков. Для этого произведем некоторые расчеты:

$$L_x = L_y = R \cdot \sqrt{Mpix} \cdot 1000, \quad (1)$$

где L_x и L_y – размеры области, отображаемой на снимке, при разрешении R снимка;

$Mpix$ – количество мегапикселей в изображении.

Также для определения плотности опознаков необходимо знать базис фотографирования B_x и расстояние между маршрутами B_y [5, 6]. Величина продольного p_x и поперечного перекрытия p_y обычно задается 60 и 30 % соответственно [7]:

$$B_x = \frac{L_x \cdot (100 - p_x)}{100 \%}; \quad (2)$$

$$B_y = \frac{L_y \cdot (100 - p_y)}{100 \%}. \quad (3)$$

Количество базисов $n_{\text{базис}}$ между высотными опознаками зависит от точности построения стереомодели по высоте m_z и заданной высоты сечения рельефа $h_{\text{сеч}}$:

$$n_{\text{базис.}} = \sqrt{\frac{4 \cdot h_{\text{сеч}}^2}{m_Z^2} - 45} - 1, \quad (4)$$

где $m_Z = \frac{L_x \cdot \sqrt{2}}{2 \operatorname{tg} \frac{2\beta}{2}} \cdot \frac{0,5}{1000 \cdot \sqrt{\operatorname{Mpix}}} \cdot 6;$ (5)

2β – угол поля зрения объектива.

Таким образом, с использованием формул (2), (3), (5) плотность размещения опознаков на квадратный километр съемочного участка n считается как

$$n = \frac{10^6}{n_{\text{базис}} \cdot B_x \cdot B_y}. \quad (6)$$

Зная стоимость определения геодезических координат одного опознака $P_{\text{опознак}}$, плотность опознаков и площадь участка $S_{\text{уч}}$, можно произвести расчет затрат на создание планово-высотного обоснования $ТС_{\text{ПВО}}$:

$$ТС_{\text{ПВО}} = n \cdot P_{\text{опознак}} \cdot S_{\text{уч}}. \quad (7)$$

Для расчета затрат на аэрофотосъемочные работы в первую очередь необходимо рассчитать стоимость летного часа беспилотного летательного аппарата. Она находится как сумма стоимости обслуживания и амортизации за использование:

$$P_{\text{Лч}} = \left(\frac{P_{\text{АФК}}}{\operatorname{Рес}_{\text{АФК}}} \right) + \left(\frac{P_{\text{обсл}}}{T_{\text{обсл}}} \right), \quad (8)$$

где $P_{\text{АФК}}$ – стоимость аэрофотосъемочного комплекса (АФК);

$\operatorname{Рес}_{\text{АФК}}$ – ресурс работы АФК;

$P_{\text{обсл}}$ – стоимость обслуживания АФК;

$T_{\text{обсл}}$ – периодичность обслуживания.

Время, необходимое на выполнение аэрофотосъемки, напрямую зависит от площади аэрофотосъемочного участка и производительности БПЛА ($\Pi_{\text{АФК}}$):

$$t_c = \frac{S_{\text{уч}}}{\Pi_{\text{АФК}}}; \quad (9)$$

$$\Pi_{\text{АФК}} = \left(\frac{v \cdot B_y}{1000} \right) \cdot K_{\text{эф}}, \quad (10)$$

где v – скорость БПЛА;

$K_{эф}$ – коэффициент эффективности производительности БПЛА.

Из-за расстояния D_{cy} между съемочным участком и точкой вылета беспилотного аэрофотосъемочного комплекса (БАФК) летательному аппарату требуется время $t_{п}$ для прибытия к съемочному участку и возвращения с него t_{y} :

$$t_{п} = t_{y} = \frac{D_{cy}}{v}, \quad (11)$$

где D_{cy} – расстояние до съемочного участка.

Для определения общего рабочего времени, затраченного на аэрофотосъемку, необходимо знать количество залетов. Количество залетов непосредственно зависит от полезного времени, который БПЛА может потратить на аэрофотосъемку, следовательно, количество залетов Z рассчитывается как

$$Z = \frac{t_c}{t_{max} - t_{п} - t_{y}}. \quad (12)$$

Зная стоимость летного часа $P_{лч}$ и общее рабочее время $t_{раб}$, можно рассчитать стоимость аэрофотосъемочных работ $ТС_{АФС}$:

$$t_{раб} = t_c + Z \cdot (t_{п} + t_{y}). \quad (13)$$

$$ТС_{АФС} = t_{раб} \cdot P_{лч}. \quad (14)$$

Затраты на перевозку оборудования зависят:

- от стоимости автомобиля;
- от стоимости горючего;
- от расстояния.

Тогда затраты на транспортные расходы $ТС_{т/р}$ будут рассчитываться по формуле:

$$ТС_{т/р} = 2s \cdot \left(\frac{P_A - P_{б/у}}{P_{ес}} + P_{топ} \right), \quad (15)$$

где P_A – стоимость нового автомобиля;

$P_{б/у}$ – стоимость подержанного автомобиля;

$P_{ес}$ – экономически выгодный ресурс эксплуатации;

$P_{топ}$ – цена за топливо на 1 километр хода;

s – расстояние от места базирования до точки запуска БПЛА или до аэродрома.

Затраты на оплату труда сотрудников $TC_{зп}$ рассчитываются по формуле:

$$TC_{зп} = (t_{\text{путь}} + t_{\text{раб}}) \cdot \frac{Нв}{171} \cdot Ч, \quad (16)$$

где $t_{\text{путь}}$ – время, затраченное на путь от места базирования до точки взлета;

$t_{\text{раб}}$ – рабочее время;

$Нв$ – норма выработки на человека в месяц.

$Ч$ – количество человек в бригаде.

Общие затраты на аэрофотосъемочные работы TC рассчитываются как сумма затрат на создание ПВО, на производство аэрофотосъемочных работ, на транспортные расходы и оплату труда сотрудников:

$$TC = TC_{т/р} + TC_{\text{ПВО}} + TC_{\text{АФС}} + TC_{зп}. \quad (17)$$

Для расчетов в качестве исходных данных взяты технические характеристики беспилотного летательного аппарата малого класса [8] с цифровой неметрической камерой Sony NEX5 [9] в качестве полезной нагрузки и самолета АН-30 с цифровой аэрофотосъемочной камерой UltraCam. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета стоимости проведения аэрофотосъемки при создании топографических планов масштаба 1 : 500

Технические характеристики	БПЛА	АН-30
Расстояние до аэродрома, км	50	30
Расстояние от точки взлета до АФУ, км	5	50
Разрешение на местности, м	0,05	0,05
ρ_x , %	60	60
ρ_y , %	30	30
Камера	Sony Nex5	UltraCam
Количество пикселей (<i>Mpix</i>)	14,2	196
Угол поля зрения, градусы	83	55
Скорость БПЛА, км/ч	100	450
t_{max} , ч	1	6
Коэффициент производительности	0,5	0,99
Стоимость летного часа, руб.	267,7	50 000
Норма выработки, руб.	100 000	100 000
Количество человек в бригаде	2	2
Стоимость авточаса, руб.	236	236

Как видно из табл. 1, стоимость летного часа на АН-30 гораздо больше, чем на БПЛА. Расчет параметров аэрофотосъемки (АФС) для каждого типа ле-

тательного аппарата приведен в табл. 2.

Таблица 2

Расчет параметров аэрофотосъемки

Параметры аэрофотосъемки	БПЛА	АН-30
Ширина маршрута, м	132	490
Производительность АФР, км ² /ч	6,6	347
Плотность опознаков на 1 км ²	20	3
Высота съемки, м	150	950
Базис фотографирования, м	75	280
Расстояние между маршрутами, м	132	490

Расчет затрат на выполнение АФС работ на участке 1 км² приведен в табл. 3.

Таблица 3

Расчет стоимости аэрофотосъемочных работ на участке площадью один квадратный километр

Статьи затрат	БПЛА	АН-30
Время, затраченное на полет, ч	1	1
Стоимость полетов, руб. (ТС _{АФС})	268	50 000
Транспортные затраты, руб. (ТС _{м/р})	708	425
Затраты на оплату труда, руб. (ТС _{ЗП})	4 678	3 509
Стоимость ПВО, руб. (ТС _{ПВО})	10 000	2 000
Общая стоимость АФР, руб.	15 654	55 934

Проанализировав табл. 3, можно увидеть, что стоимость аэрофотосъемочных работ с применением БПЛА меньше в 3,6 раза, а трудоемкость на 43 % выше, в отличие от съемки с применением АН-30. Абсолютная экономия средств составила 40 279,51 рублей. Экономическая эффективность, рассчитанная для участка площадью один квадратный километр, приведена в табл. 4 [10].

Таблица 4

Экономическая эффективность для АФС участка площадью один квадратный километр

Параметры	Затраты		Абсолютное снижение затрат БПЛА/АН-30	Коэффициент относительного снижения затрат (K*), %	Индекс снижения затрат (Y*)
	БПЛА	АН-30			
Трудоемкость, ч	4	2,8	-1,2	-42,86	0,7
Стоимость, руб.	15 654	55 934	40 279,51	72,01	3,57

Для оценки экономической эффективности целесообразно выполнить расчеты для аэрофотосъемочных участков различных размеров (табл. 5).

Таблица 5

Зависимость затрат на АФС от площади участка съемки

Площадь, км ²	Общие затраты на АФС работы, руб.		Общие затраты на единицу площади, руб.		Индекс изме- нения затрат
	БПЛА	АН-30	БПЛА	АН-30	
0,125	7 654	55 934	61 232	447 469	7,30
0,25	8 154	55 934	32 616	223 734	6,86
0,5	10 654	55 934	21 308	111 867	5,25
1	15 654	55 934	15 654	55 934	3,57
2	25 654	56 934	12 827	28 467	2,22
4	45 154	59 434	11 289	14 858	1,32
8	85 591	64 934	10 553	8 117	0,77
16	165 029	75 434	10 168	4 715	0,46
32	325 341	96 934	9 984	3 029	0,30
64	644 527	139 934	9 888	2 186	0,22
128	1 284 837	225 934	9 846	1 765	0,17
256	2 564 958	448 603	9 823	1 752	0,17
512	5 124 261	843 273	9 812	1 647	0,17
1 024	10 242 868	1 632 612	9 806	1 594	0,16
2 048	20 481 519	3 261 960	9 804	1 593	0,16
4 096	40 956 885	6 520 656	9 802	1 592	0,16
8 192	81 908 115	13 038 048	9 802	1 592	0,16
16 384	163 810 076	25 970 492	9 801	1 585	0,16
32 768	327 615 436	51 938 220	9 801	1 585	0,16
65 536	655 225 217	103 873 176	9 801	1 585	0,16

Как видно из табл. 5, при увеличении площади аэрофотосъемочного участка стоимость аэрофотосъемочных работ на БПЛА стремительно увеличивается, стоимостная эффективность соответственно уменьшается, и уже при размере участка 4 км² абсолютное изменение затрат составляет 14 280 рублей, а индекс изменения затрат составляет всего 1,32.

На рис. 1 и 2 показаны зависимости коэффициента изменения стоимостных затрат и индекса изменения затрат от размера аэрофотосъемочного участка.

Согласно приведенным графикам на рис. 1 и 2, лимит экономической эффективности использования БПЛА при аэрофотосъемке лежит вблизи значения 5 км². Однако следует также учесть большую гибкость использования БПЛА и меньшую совокупную стоимость оборудования, что несколько расширяет этот предел. Структура затрат при выполнении АФС работ с использованием БПЛА и АН-30 приведена на рис. 3.

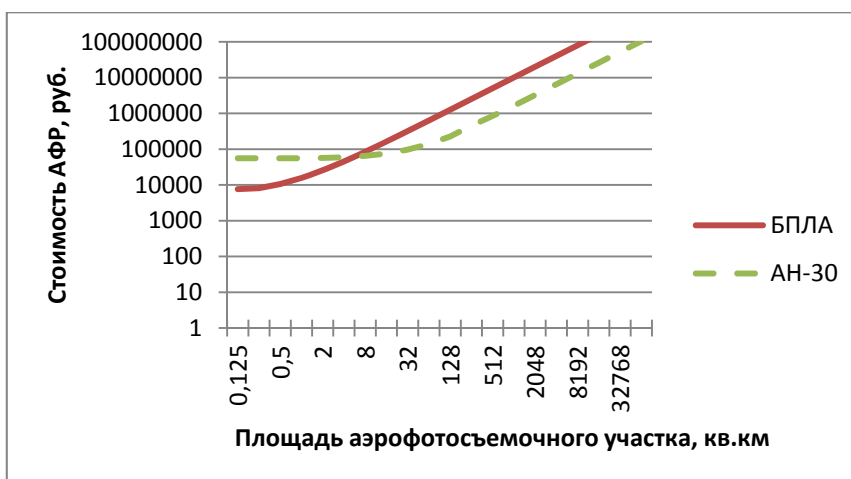


Рис. 1. График зависимости стоимости аэрофотосъемочных работ от площади участка

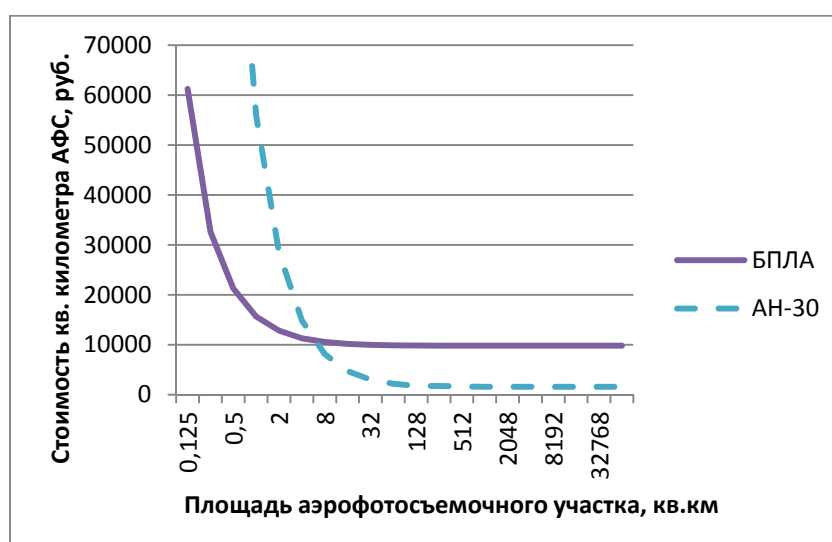


Рис. 2. График затрат на АФР на единицу площади в зависимости от площади участка

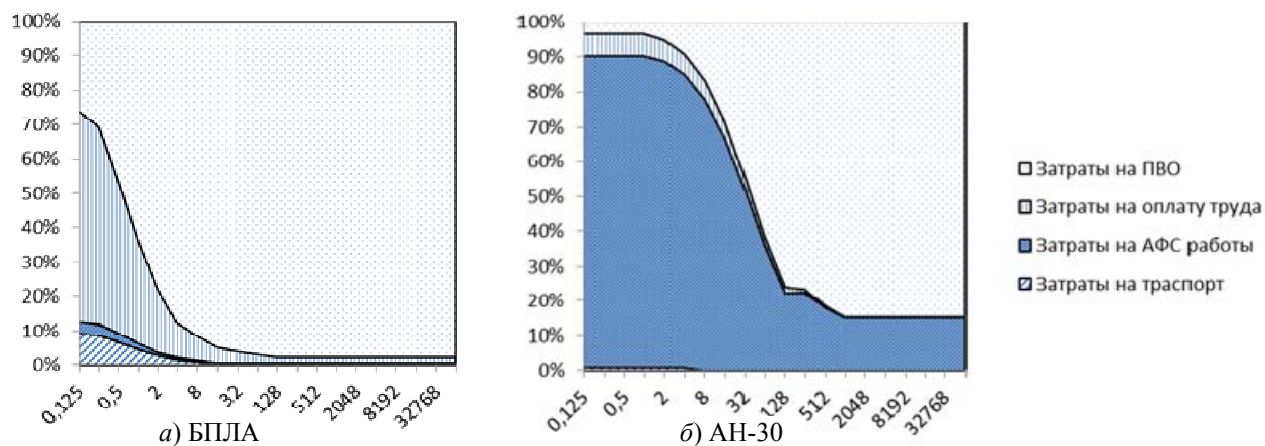


Рис. 3. Структура затрат на выполнение площадной АФС

Как видно из рис. 3, при АФС участков местности значительных размеров наибольший вклад в затраты вносит создание планово-высотного обоснования. Использование глобальных навигационных систем существенно (ГНСС) уменьшает объем полевых работ. Однако точности ГНСС достаточно только для создания карт и планов масштаба 1 : 2 000 и мельче.

Следует отметить, что приведенные расчеты носят оценочный характер и могут значительно отличаться при другом составе аэрофотосъемочного оборудования или требований технического задания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипов И. Т. Развитие фотограмметрии в России // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Пленарное заседание. – С. 102–137.
2. Петров М. В. Практический опыт использования БПЛА Swinglet производства компании Sensefly (Швейцария) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 152–157.
3. Шрайнер К. А., Макаров И. В. Использование возможностей беспилотных летательных аппаратов для дистанционного зондирования на примере открытых горных работ // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 18 (2). – С. 47–50.
4. Применение малых беспилотных летательных аппаратов для съемки местности и подготовки геоинформационного контента в чрезвычайных ситуациях / В. К. Барбасов, П. Ю. Орлов, П. Р. Руднев, А. В. Гречищев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Раннее предупреждение и управление в кризисных и чрезвычайных ситуациях: предпринимаемые шаги и их реализация с помощью картографии, геоинформации, GPS и дистанционного зондирования»: сб. материалов (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 61–66.
5. Применение материалов аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата для картографического обеспечения археологических работ / А. Л. Быков, А. С. Костюк, В. Л. Быков, Л. В. Быков, Л. В. Татаурова, П. В. Орлов, П. М. Погарский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 139–144.
6. Костюк А. С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 83–87
7. Лобанов А. Н. Фотограмметрия. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
8. Никитин В. Н., Раков Д. Н. Разработка концепции автоматической системы управления беспилотным аэрофотосъемочным комплексом // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 8–13.
9. Раков Д. Н., Никитин В. Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъемочного комплекса // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. «Гео-Сибирь 2012»: сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.) – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 27–36.
10. Выбор и обоснование методики расчета экономической эффективности проекта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://academout.ru/diploms/economics2/20.php>.