

УДК 528.7; 528.711.1

КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЯ

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ ДЛЯ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

©2016 В.М. Курков¹, Д.П. Бляхарский², И.В. Флоринский³

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Россия

³Институт математических проблем биологии РАН – филиал ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Пуцино, Россия
vkurkov@inbox.ru, db@geoscan.aero, iflor@mail.ru

Аннотация. Исследуются возможности применения аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) высокого разрешения, предназначенных для геоморфометрического моделирования. Съёмка тестового участка проведена с БПЛА «Геоскан-101». Для фрагмента полученной ЦМР с шагом сетки 20 см выполнена оценка высотной точности по контрольным точкам: средняя ошибка составляет –9 см (0,24% от диапазона высот) и является систематической (влияние травяного покрова). Используя универсальный спектрально-аналитический метод, по фрагменту ЦМР рассчитаны модели ряда морфометрических характеристик. Обсуждаются требования к БПЛА, аэрофотосъёмочному оборудованию и программному обеспечению, которые могут обеспечить необходимую для геоморфометрического моделирования точность создаваемых ЦМР.

Ключевые слова: БПЛА, фотограмметрия, геоморфометрия, цифровое моделирование рельефа, универсальный спектрально-аналитический метод

APPLICATION OF UNMANNED AERIAL SURVEYING FOR GEOMORPHOMETRIC MODELLING

©2016 Kurkov V.¹, Bliakharskii D.², Florinsky I.³

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

²St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Russia

³Institute of Mathematical Problems of Biology, the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia
vkurkov@inbox.ru, db@geoscan.aero, iflor@mail.ru

Abstract. We study possibilities of aerial surveying using unmanned aerial vehicles (UAV) to produce high-resolution digital elevation models (DEMs) for geomorphometric modelling. To carry out aerial survey of a test area, we used a UAV ‘Geoscan-101’. For a portion of the derived DEM with the cell size of 20 cm, we estimated its elevation accuracy using ground control points. The mean elevation error was –9 cm, that is, 0,24% of the elevation range within the DEM portion. It is the systematic error connected with the influence of the grass cover. Using a universal spectral analytical method, we derived models of some morphometric variables from the DEM. Finally, we discuss requirements for UAV, aerial surveying equipment, and software, which can provide accuracy and quality required for DEMs intended for geomorphometric modelling.

Keywords: UAV, photogrammetry, geomorphometry, digital terrain modeling, universal spectral analytical method

Введение. Результаты аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в последние годы все чаще используются для получения цифровых моделей рельефа (ЦМР)

высокого и сверхвысокого разрешения [1]. Для получения адекватных ЦМР при съемке и обработке стереопар требуется учитывать специфику технических характеристик БПЛА и

используемых оптических и навигационных систем. В противном случае пользователь рискует получить ЦМР низкого качества, содержащие артефакты, в частности, из-за систематических ошибок [2].

К ЦМР могут предъявляться дополнительные требования по качеству и точности, если ЦМР является не конечным продуктом, а используется для дальнейшего геоморфометрического моделирования [3, 4]. Это связано с рядом факторов. Во-первых, в основе расчета локальных, солярных и комбинированных морфометрических величин лежит вычисление первых и вторых производных высоты, которые существенно усиливают случайные ошибки — высокочастотный шум в ЦМР, практически незаметный при картографировании высот. Во-вторых, в процессе расчета нелокальных и комбинированных морфометрических величин, выполняемого методами маршрутизации потоков, в моделях накапливаются ошибки вычислений, зависящие от пространственного распределения случайных и систематических ошибок в ЦМР. В-третьих, ошибки морфометрических вычислений (в том числе — из-за ошибок в ЦМР) приводят к ошибкам в почвенных и других прогнозных моделях, создаваемых на основе геоморфометрического моделирования.

В данной статье приводятся первые результаты исследования по выработке рекомендаций по созданию ЦМР высокого разрешения, предназначенных для геоморфометрического моделирования, на основе аэрофотосъемки с БПЛА. Работа ведется на базе специализированного исследовательского полигона МИИГАиК в Заокском районе Тульской области. Для тестирования выбран участок долины реки Скнига, расположенный между Заокским учебным геополлигоном МИИГАиК и деревней Костино, с размерами 1 700×1 870 м; перепад высот — около 86 м.

Характеристика полигона. Специализированный исследовательский полигон МИИГАиК предназначен для разработки и оценки технологий картографирования и мониторинга территорий с использованием аэрофотосъемочных комплексов, установленных на БПЛА [5, 6]. На территории полигона имеются лесные массивы, различные гидрографические объекты, многообразные формы рельефа, сельскохозяй-

ственные угодья и производственные объекты. В пределах полигона расположены населенные пункты (поселок городского типа, деревни и дачные поселки), железные, шоссевые, проселочные и полевые дороги, линии электропередачи различного напряжения и трубопроводы.

Общая площадь территории полигона составляет 200 км². В качестве геодезического обоснования в локальной системе координат определены 23 пункта геодезической сети и 340 опознаков, из которых 47 высотных, остальные 293 планово-высотные, из них замаркированы 72 опознака. Точность определения точек геодезического обоснования 2–3 см в плане, 3–4 см по высоте. Точки геодезического обоснования занесены в базу данных, созданную на платформе MapInfo, и имеют паспорта с указанием координат и места расположения. Различная плотность расположения опознаков на территории полигона позволяет проводить испытательные полеты различных типов аэрофотосъемочных комплексов с надежной оценкой качества полученных документов о местности.

Кроме этого, в качестве контрольных материалов: 1) выполнена наземная тахеометрическая съемка масштаба 1:1000 с сечением рельефа 1 м на площади 19 га; 2) с помощью кинематической ГНСС-съемки в режиме «стою–иду» на площади 6 га получена ЦМР с разрешением 10 м и точностью определения высот 4 см, что позволяет строить горизонтали с сечением 0,5 м; 3) выполнено воздушное лазерное сканирование на площади 10 км² с точностью определения высот 15 см.

Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемка выполнена компанией «Геоскан». Использовалась беспилотная аэрофотосъемочная система (БАС) «Геоскан 101» [7], которая относится к типу «летающее крыло» (рис. 1). Размах крыла 130 см, взлетный вес 2,5 кг. Старт осуществляется с катапульты, посадка выполняется с парашютом. Продолжительность полета до 1 ч с крейсерской скоростью 72 км/ч. Ограничения по скорости ветра при взлете — до 10 м/с, во время полета — до 20 м/с. Модель оснащена электрическим двигателем. На борту имеется модем телеметрической связи с наземной станцией управления (НСУ) на частоте 867,8 МГц; по каналу связи можно управлять полетом.

БАС оснащена фотокамерой Sony DSC-RX1 (объектив Carl Zeiss Vario Sonnar T, фокус-

ное расстояние 35 мм, матрица 35,8×23,9 мм, 6000×4000 пикселей, размер пикселя 6 мкм, центральный затвор). Камера расположена поперек маршрута. Полет выполняется со следующими настройками камеры: приоритет выдержки (для солнечной погоды 1/1000 с, для пасмурной 1/800 с); размер диафрагмы и ISO подбираются автоматически; снимки записываются в формате JPEG. Перед установкой на БАС в камере меняется схема питания, разбирается объектив и фиксируется положение линз для фокусировки на бесконечность.

Для учета геометрических искажений, вызванных дисторсией, выполнены: 1) лабораторная фотограмметрическая калибровка камеры; 2) полевая калибровка камеры на испытательном полигоне. Для лабораторной фотограмметрической калибровки использовался пространственный тест-объект и специализированное программное обеспечение, разработанные на кафедре фотограмметрии МИИГАиК [8]. Для полевой калибровки использовался участок полигона размером 1×1 км с перепадом высот 80 м, где расположен 51 маркированный опознак. Параметры фотограмметрической дисторсии определялись в результате выполнения фототриангуляции с самокалибровкой [8].

Полет «Геоскан-101» проходит в автоматическом режиме с помощью автопилота [7]. В НСУ создается полетное задание путем выбора контура снимаемого участка и заданием параметров полета. Основным параметром съемки является перекрытие между кадрами, выраженное в процентах. При традиционной аэрофотосъемке минимальное необходимое продольное и поперечное перекрытие принимается равным 60 и 30%, соответственно [9]. При использовании БПЛА возрастает вероятность возникновения участков без перекрытия, поэтому устанавливается избыточное перекрытие: продольное — 70% и поперечное — 50%. Затем устанавливается один из трех взаимосвязанных параметров: пространственное разрешение, высота полета и расстояние между маршрутами. После задания перекрытия и одного из указанных параметров, программа рассчитывает маршруты полета и координаты точек, в которых должна срабатывать камера. Для определения высокоточных центров проекции на борту установлен приемник Topcon



Рис. 1. «Геоскан 101»:

a — вид сбоку; *б* — вид снизу

(GPS + ГЛОНАСС, L1 + L2). На базовой станции установлен приемник Javad Prego Lite (GPS + ГЛОНАСС, L1 + L2, антенна MarAnt+).

При проведении исследования полет выполнялся с построением маршрутов «крест на крест» и ориентацией по сторонам горизонта (север–юг, запад–восток). Характеристика проведенной аэрофотосъемки: средняя высота съемки — 310 м; площадь — 1,01 км²; разрешение — 5,13 см. Для съемки тестового участка выполнено 13 маршрутов, 319 снимков (рис. 2).

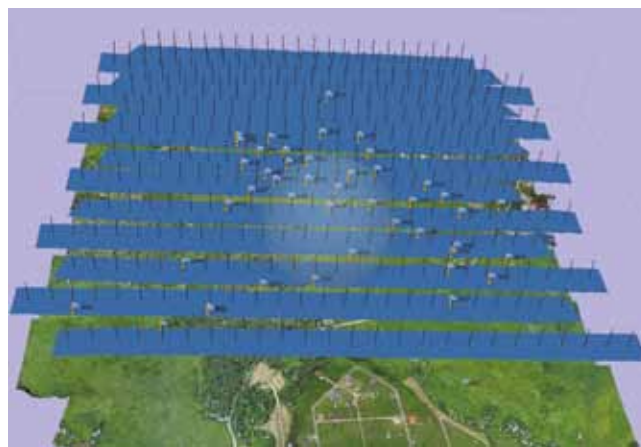


Рис. 2. Схема аэрофотосъемки тестового участка:

синие полосы — перекрывающиеся снимки вдоль маршрутов; вертикальные линии — позиции съемки

Обработка снимков. Процесс обработки снимков состоит из двух этапов: 1) постобработка измерений бортового ГНСС, установленного в БАС, относительно базовой станции; 2) фотограмметрическая обработка материалов съемки.

Для постобработки измерений бортового ГНСС использовалось программное обеспечение Pinnacle. Было проведено совмещение снимков с соответствующими им координата-

ми центров фотографирования. Полученные координаты центров проекции используются в дальнейшей обработке.

Средняя ошибка определения центров проекции (м) по: X — 0,132; Y — 0,040; XU — 0,138; Z — 0,028; общая — 0,140.

Для оценки точности построения фото-триангуляции в качестве контрольных точек использовались 45 наземных маркированных опознаков (рис. 3), распределенных по всему

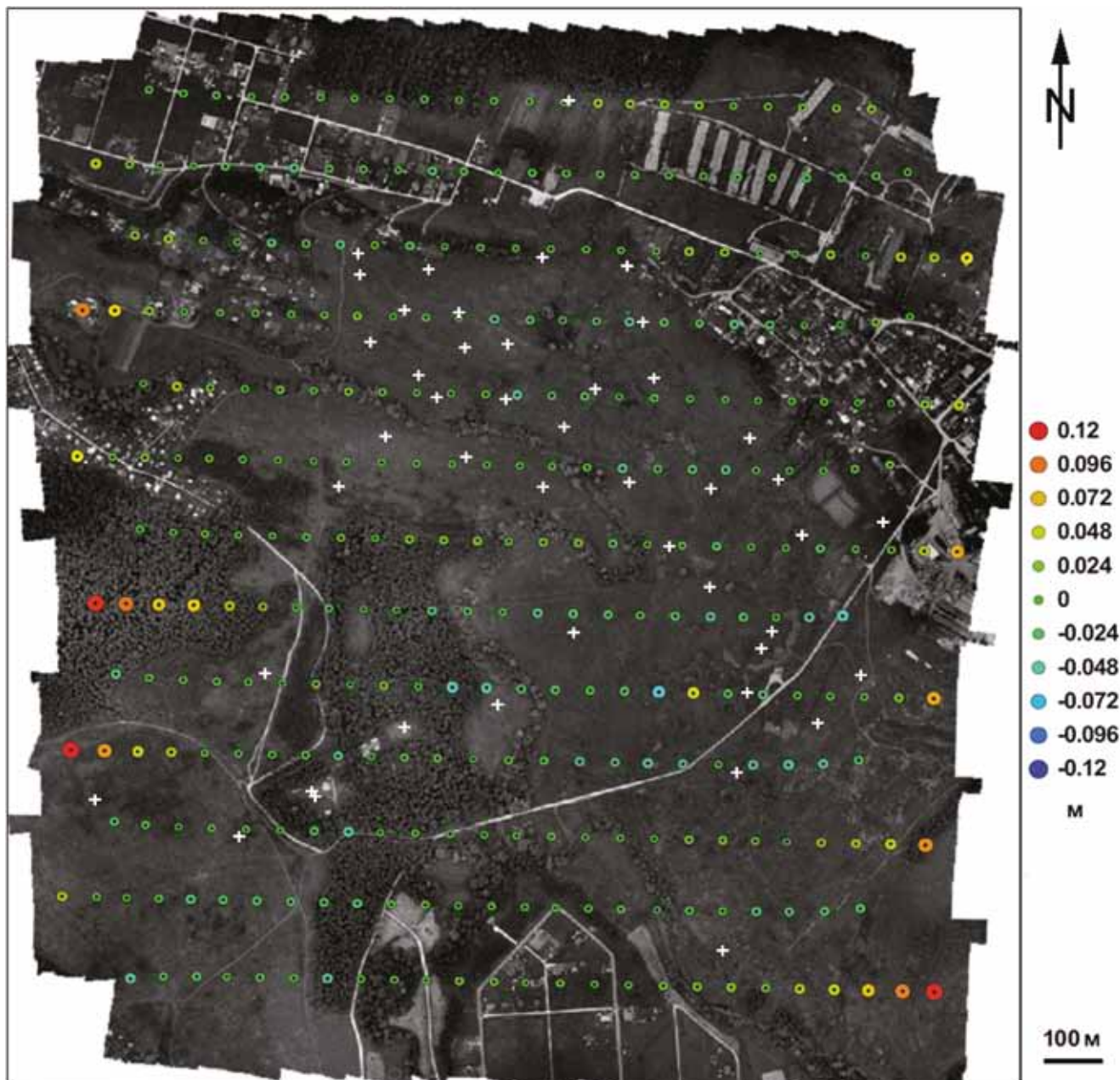


Рис. 3. Ортофотоплан тестового участка, ошибка определения центров проекции: цвет и размер эллипса соответствуют ошибкам по высоте и в плане, соответственно; черные точки — рассчитанные позиции съемки; белые кресты — наземные маркированные опознаки

Т а б л и ц а 1

Точность построения фототриангуляции

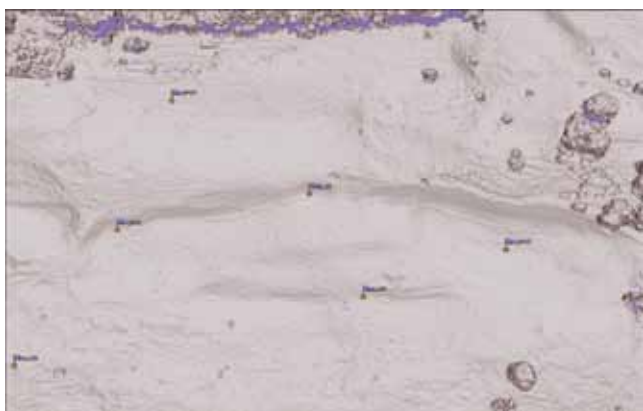
Ошибка XY, м	Ошибка Z, м	Вектор ошибки, м	Ошибка измерения на снимке, пиксел
0,034	0,044	0,056	0,16

блоку. Высокая точность построения фототриангуляции (табл. 1), соизмеримая с размером пикселя на земле — 5 см, обусловлена калибровкой камеры, определением высокоточных центров проекции и строгими оригинальными алгоритмами фотограмметрической обработки. Это дает основание полагать, что последующая фотограмметрическая обработка с целью получения ЦМР по точности должна быть в пределах 1–2 пикселей исходного снимка.

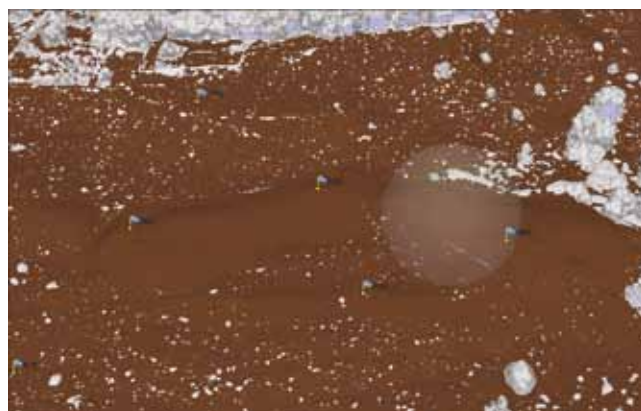
Для фотограмметрической обработки материалов съемки использовался программный комплекс Agisoft PhotoScan Professional 1.2.5 [10], в котором реализована совокупность методов традиционной фотограмметрии [11, 12] и подхода Structure from Motion (SfM) [13–15]. В основе обработки снимков лежит алгоритм, разработанный компанией Agisoft LLC [16]. Анализируются яркостные характеристики снимков, благодаря чему определяется большее количество соответствующих точек на перекрывающихся снимках. По этим точкам возможно определение элементов ориентирования снимков во время съемки и элементов дисторсии объектива. Задав какую-либо привязку в виде наземных опорных точек и/или координат центров фотографирования, вся система снимков становится метрически измеряемой. Сгустив на основании всех полученных

элементов облако соответствующих точек до плотного облака точек, получаем нерегулярную модель поверхности. По имеющемуся плотному облаку точек с помощью линейной интерполяции можно построить регулярную цифровую модель поверхности.

Получив плотное облако точек (рис. 4, а) цифровой модели поверхности, можно построить ЦМР с помощью алгоритма классификации, разработанного компанией Agisoft LLC [16]. Классификация заключается в анализе плотного облака точек. Область съемки разбивается на квадраты заданного размера (обычно от 50 до 100 м) и делается предположение, что самая низкая точка в квадрате — это точка рельефа. Получив некоторое количество точек рельефа, выполняется интерполирование между ними, в качестве результата служит некая поверхность — первое приближение рельефа. Затем выполняется дальнейший анализ всего массива точек относительно рассчитанной поверхности. К каждой точке поверхности «строится виртуальный луч»; задав его длину и угол над поверхностью, выполняется анализ точек. Все точки, попавшие под луч, относятся к классу точек «земля», а все точки выше луча — к классу точек «неназначенные». Тем самым возможно удалить группы точек, относящиеся к растительному покрову и строениям (рис. 4, б). Так как в основе построения плотного облака лежит вероятностный подход, существует группа точек, которая относится к классу «нижнего шума» (точки находятся под поверхностью). Поэтому до классификации



а



б

Рис. 4. Фрагмент тестового участка — плотное облако точек:

а — неклассифицированное облако; б — классифицированное облако; коричневым цветом обозначены точки класса «земля»; белым цветом — «неназначенные» и «нижний шум»; флажки — маркированные опознаки

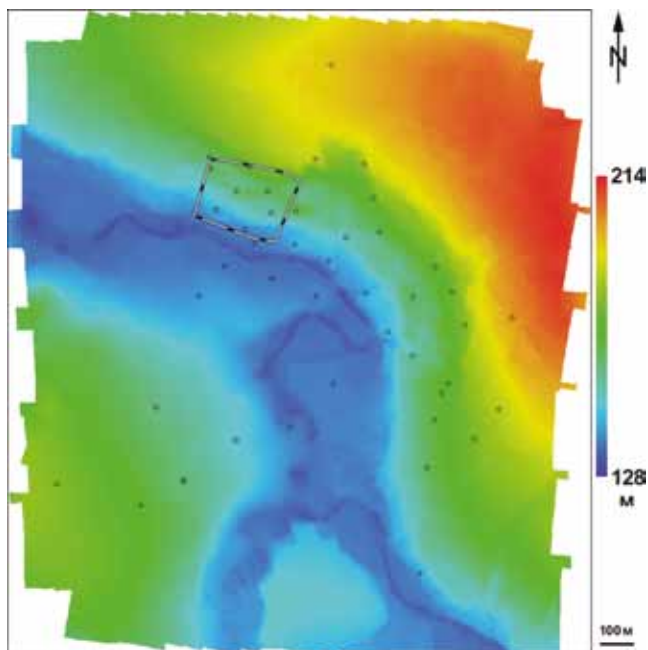


Рис. 5. ЦМР тестового участка:
рамка — границы фрагмента тестового участка, использованного для геоморфометрического моделирования;
пунсоны — наземные маркированные опознаки

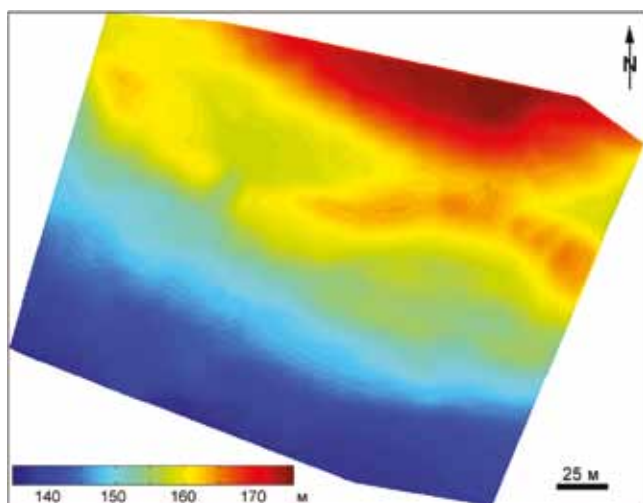


Рис. 6. Фрагмент тестового участка (высота)

обычно проводится фильтрация облака точек фильтром медианного типа. Параметры классификации (размер ячейки, угол и длина луча) подбираются индивидуально для каждого типа рельефа.

В рамках данного исследования для тестового участка строились ЦМР с различным разрешением: 5 см (максимально возможное), 20 см и 1 м. В частности, применялась «средняя» плотность точек, позволившая определить высоты для каждого четвертого пикселя. В этом случае разрешение полученной ЦМР составляет, соответственно, 20 см.

Геоморфометрическое моделирование. Для геоморфометрического моделирования использовался фрагмент ЦМР тестового участка (рис. 5), включающий в себя правобережный оползневый склон долины реки Скнига ($54,837^\circ$ с.ш.; $37,405^\circ$ в.д.) с размерами около 310×240 м и перепадом высот около 41 м. Фрагмент ЦМР (рис. 6) представляет собой матрицу 1510×1172 с разрешением 20 см и включает в себя 1 201 311 точек с измеренными значениями высоты (для 568 409 точек матрицы высоты не определялись).

Выполнена оценка точности фрагмента ЦМР (табл. 2). Для этих целей использовались семь контрольных точек с известными плановыми координатами и высотами; контрольные точки равномерно распределены в пределах фрагмента тестового участка (см. рис. 5). Средняя ошибка $-0,09$ м, что составляет 0,24% диапазона высот данного фрагмента ЦМР. Ошибка носит систематический характер и связана с влиянием травяного покрова: контрольные точки находятся на земле, а низкая трава при классификации не отсекается и приписывается к точкам класса «земля».

Для аппроксимации высоты (см. рис. 6) и расчета серии локальных морфометрических

Таблица 2

Контроль точности фрагмента ЦМР

Контрольная точка	Отметка из каталога, м	Отметка из ЦМР, м	Расхождение, м
OP08	161,58	161,66	-0,08
OP01	159,96	160,00	-0,04
KL05	141,42	141,56	-0,14
KL09	138,07	138,15	-0,08
KL06	153,50	153,63	-0,13
KL10	165,09	165,15	-0,06
OP09	173,32	173,39	-0,07
Средняя ошибка			-0,09

величин (рис. 7) был применен универсальный спектрально-аналитический метод [17]. Метод предназначен для обработки ЦМР в рамках единой схемы, включающей в себя глобальную аппроксимацию ЦМР, генерализацию, подавление шума, а также расчет частных производных высоты и морфометрических характеристик. Метод основан на ортогональных разложениях высокого порядка с использованием полиномов Чебышева и суммирования Фейера.

Расчеты проведены с использованием 500 коэффициентов разложения (по каждой оси координат). Были рассчитаны следующие локальные морфометрические величины [3, 4]: крутизна склона, горизонтальная, вертикальная, минимальная и максимальная кривизны (см. рис. 7). Так как кривизны поверхности обладают широким динамическим диапазоном, для адекватной визуализации их модели были логарифмически преобразованы [3, с. 244]. Обработка данных осуществлена в пакете Matlab R2008b.

Обсуждение и выводы. Анализ полученных морфометрических моделей и карт показывает, что они адекватно отражают особенности микрорельефа участка. В частности, горизонтальная кривизна выявляет микропотоковые структуры (см. рис. 7, б), а вертикальная кривизна – микротеррасы (см. рис. 7, в). Полученные модели могут использоваться в детальных почвенных исследованиях и при изучении склоновых процессов. Отметим, что на морфометрических картах отсутствуют артефакты из-за возможной некорректной фотограмметрической обработки и следы высокочастотного шума. Вместе с тем, заметны краевые эффекты, которые неизбежны при вычислениях такого рода.

Использованные параметры съемки и обработки данных могут быть взяты за основу при разработке рекомендаций по созданию ЦМР высокого разрешения для геоморфометрии. На основании выполненных экспериментов можно сформулировать ряд рекомендаций по выбору съемочной камеры, требования к БАС, организации и выполнению аэрофото съемки, фотограмметрической постобработке аэрофотоснимков с целью получения адекватной ЦМР для дальнейшего ее использования в геоморфометрическом моделировании.

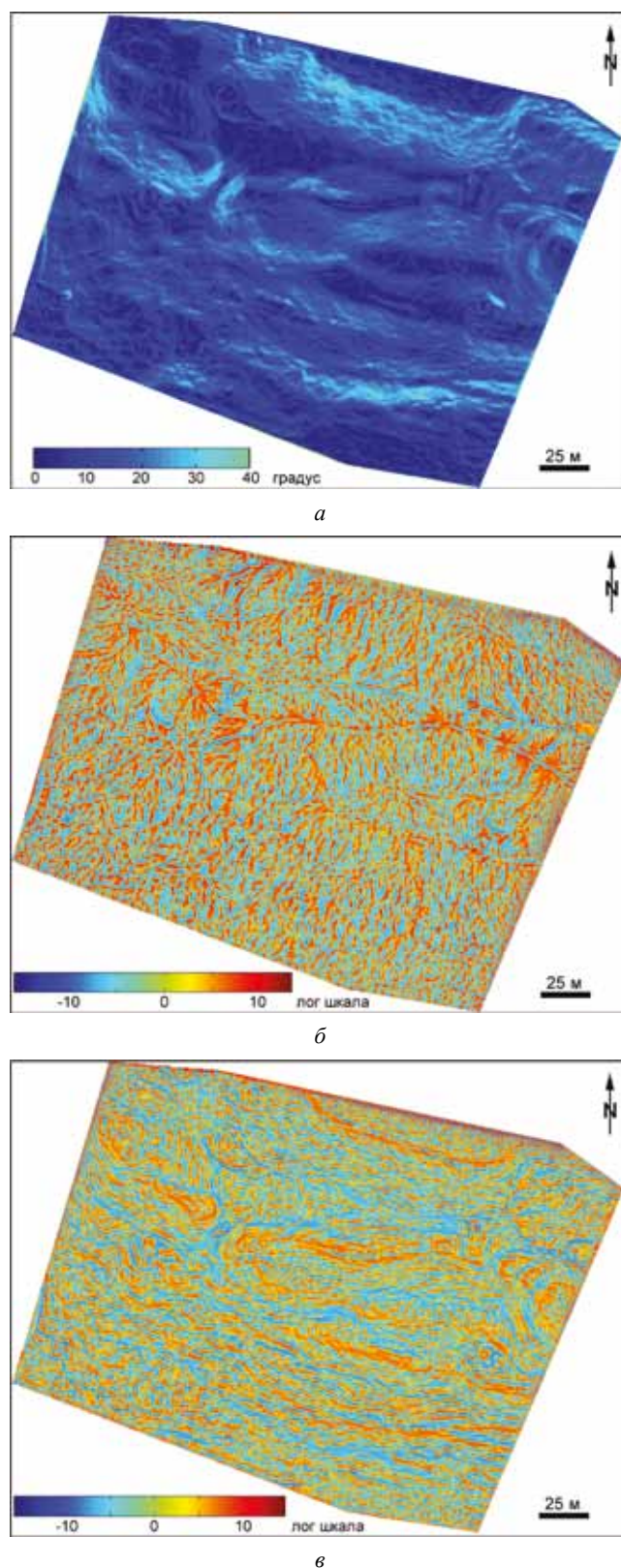


Рис. 7. Фрагмент тестового участка:
 а — крутизна склона; б — горизонтальная кривизна;
 в — вертикальная кривизна

Съемочная камера должна иметь центральный затвор. Использование камер с лемельным затвором, который при выполнении аэрофотосъемки приводит к шторно-щелевому эффекту, не рекомендуется [18], поскольку это ведет к геометрическим искажениям центральной проекции кадрового снимка и потере точности при фотограмметрической обработке. Размер пикселя матрицы съемочной камеры должен быть не меньше 4–5 мкм. В противном случае изобразительное качество полученных снимков существенно снижается, что приводит к ухудшению распознавания объектов на снимках.

Рекомендуется использовать калиброванные съемочные камеры с известными параметрами фотограмметрической дисторсии, полученные в результате лабораторной и/или полевой калибровки. Использование опции самокалибровки в цифровых фотограмметрических системах (ЦФС) без достаточного количества опорных данных (точных центров проекции и наземного обоснования) может привести к искажению построенной фотограмметрической модели в силу корреляционных связей элементов внешнего ориентирования снимков и параметров внутреннего ориентирования, включая параметры фотограмметрической дисторсии.

Требования к БАС, организации и выполнению аэрофотосъемки. Рекомендуется использовать БАС, которые в состоянии обеспечить выполнение площадной аэрофотосъемки с гарантированным продольным и поперечным перекрытием не меньше 60 и 30%, соответственно. При этом важен учет погодных условий (силы и направления ветра). Для получения хорошего фотометрического качества аэрофотоснимков следует соотносить время выдержки со скоростью носителя, чтобы избежать эффекта смаза изображения. При этом не следует увлекаться повышением ISO, поскольку это приводит к появлению шума на изображении и ухудшает изобразительные свойства снимков.

Рекомендуется использовать на борту носителя ГНСС-приемники геодезического класса и наземные базовые станции для определения в дифференциальном режиме высокоточных координат центров проекции. Это сокращает объем дорогостоящих полевых работ и обе-

спечивает опорным обоснованием выполнение самокалибровки с устойчивым и надежным определением параметров съемочной камеры.

Фотограмметрическая обработка снимков. После появления алгоритмов, позволяющих получать плотное облако точек, практически во всех ЦФС появились различные версии таких алгоритмов. Результат их использования — набор нерегулярных пикетов, которые покрывают всю поверхность, видимую на аэрофотоснимках.

Для решения нашей задачи – выделения из этой массы точек только тех, которые находятся на поверхности земли – требуется применять алгоритмы фильтрации «ненужных» объектов или классификации точек; кроме этого необходимо исключить «нижний шум». Эта нетривиальная задача в различных ЦФС решается по-разному и с различной степенью правдоподобия. Многое зависит от «правильного» выбора параметров фильтрации, отвечающих особенностям конкретного типа местности. Полностью автоматизировать этот процесс пока не удалось. После автоматической фильтрации плотного облака остаются артефакты. В ходе наших экспериментов они проявились на некоторых участках (заросшие русла рек и овраги, обширные лесные массивы). Практически незаметные на картах высот, эти артефакты доминируют на морфометрических картах после расчета частных производных высоты. В этой связи, для получения адекватной ЦМР может потребоваться ручное редактирование в стереорежиме. Поэтому рекомендуется использовать ЦФС с возможностью стереоредактирования полученной ЦМР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 92. – P. 79–97.
2. James M.R., Robson S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks // Earth Surface Processes and Landforms. – 2014. – Vol. 39. – No. 10. – P. 1413–1420.
3. Florinsky I.V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. – 2nd ed. – Amsterdam: Academic Press, 2016. – 486 p.
4. Флоринский И.В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию // Альманах пространство и время. – 2016. – Т. 11. – Вып. 1. – 20 с.
5. Курков В.М. Опыт работы по тестированию аэрофотосъемочных комплексов на испытательном полигоне МИИГАиК / Геопространственные технологии и сферы их применения (10-14-15 окт. 2014 г.). – М.: Проспект, 2014. – С. 34–48.