

**АЛЕКСЕЕНКО Н. А., КУЗНЕЧЕНКО П. А.,
КУРАМАГОМЕДОВ Б. М., МЕДВЕДЕВ А. А.**

**ОПЫТ СОСТАВЛЕНИЯ РЕЛЬЕФА НА ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ПЛАНАХ
ПО ДАННЫМ АЭРОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА¹**

Аннотация. В данной работе излагаются возможности и ограничения использования аэросъемок при составлении топографического плана. Приводится методика прорисовки достоверных горизонталей различного типа рельефа.

Ключевые слова: топографический план, горизонталы, цифровая модель рельефа, аэрофотосъемка, беспилотные летательные аппараты.

**ALEKSEYENKO N. A., KUZNECHENKO P. A.,
KURAMAGOMEDOV B. M., MEDVEDEV A. A.**

**EXPERIENCE OF RELIEF MAPPING ON TOPOGRAPHIC PLANS
USING DATA FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Abstract. This paper outlines the possibilities and limitations of using aerial surveys for drawing up a topographic plan. The methods of drawing reliable contours of various types of relief are presented.

Keywords: topographic plan, contours, digital elevation model, aerial photography, unmanned aerial vehicles.

Топографические карты и планы выступают универсальным источником пространственной информации, которые находят свое применение как при выполнении разнонаправленных научных исследований, так и при решении практических задач, например, промышленного и гражданского строительства. Данные материалы рассматриваются в качестве базового компонента инфраструктуры пространственных данных федерального фонда пространственных данных.

Создание топографических карт и планов в Российской Федерации является прерогативой государства. Предполагается реализация государственного топографического мониторинга, направленного на поддержание актуальной цифровой дежурной топографической карты [1]. Топографические планы и карты пользуются высоким спросом в различных отраслях хозяйства страны. Согласно сведениям из Единой информационной системы в сфере закупок, в период с 2013 по 2020 г. заключено порядка 350 государственных контрактов на создание топографических карт. Масштабный ряд этих материалов 1:500 до

¹ Работа выполнена в рамках ГЗ ИГ РАН № АААА-А19-119022190168-8.

1:25000. Основными сферами их использования выступают нефте- и газодобыча, территориальное управление, землеустройства и кадастры.

При этом понимание содержания топографических карт согласно техническим требованиям государственных контрактов различается. Во многих случаях в составе слоев цифровых топографических карт и планов отсутствует рельеф в виде горизонталей, его заменяют цифровые модели местности [5]. Характерной особенностью последних нескольких лет является использование для этих целей данных, полученных с помощью различных технологических решений: лазерные сканеры, лидары, роботизированные тахеометры, аэрофотосъемка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Алгоритмы компьютерного зрения трансформируют их в цифровые модели местности, из которых в последствии извлекаются значения высот. Однако, нормативно-правовыми актами РФ регламентированы требования к созданию топографических материалов, в т.ч. рельефа в горизонталях и специальных условных знаках.

В нашей стране действуют нормативные документы «Условные знаки» и «Наставления по составлению топографических карт и планов», где прописаны параметры точности, возможности сдвигов, характер прорисовки горизонталей, условия перехода от горизонталей к специальным условным знакам и пр. При автоматизированном «поднятии горизонталей» по цифровой модели местности прорисовка горизонталей не соответствует требованиям нормативных документов. Правка рисовки рельефа была неизменным этапом после автоматического составления горизонталей и в 60-80-е годы прошлого столетия на стереокомпараторе.

Цель работы – изложение опыта составления рельефа на топографических планах, отвечающего требованиям нормативных документов, по данным с беспилотных летательных аппаратов.

Задачи: 1) изучение требований к изображению рельефа на топографических планах в нормативных документах; 2) анализ мирового опыта автоматизированного составления рельефа по цифровым моделям; 3) выбор тестовых полигонов (обоснование); 4) проведение работ по получению полевых данных; 5) обработка данных (ЦММ); 6) показ возможностей составления рельефа в горизонталях и специальных условных знаках.

На топографических планах для изображения рельефа используются как горизонтали, так и специальные условные знаки различной локализации. Например, линейные (уступы задернованные (бровки), не выражающиеся горизонталями, борозды эрозионные, овраги узкие), площадные (оползни, осыпи, скопления камней), точечные (камни-ориентиры, скалы-останцы). Всего в стандартных условных знаках для рельефа предназначено 37 пунктов (329-365), но некоторые из них содержат от 2 до 7 подпунктов (329) [6]. При автоматизированном

построении горизонталей по данным ЦММ именно те формы рельефа, которые выражаются специальными условными знаками, совершенно не прорисовываются. Однако и формы рельефа, которые передаются автоматизированно построенными горизонталями, не всегда имеют географическую прорисовку. Например, нет характерной «затяжки» по тальвегу, передающей форму долины (U-, V- или корытообразной) и выражающейся в плановых масштабах, не прорисовывается характер бровок (четкий или нечеткий). Создавая рельеф с помощью автоматизированных методов по цифровым моделям, мы получаем топографические планы: а) не соответствующие требованиям государственного стандарта, б) не соответствующие географической действительности.

Поиск и анализ работ-аналогов по ключевым словам в реферативной базе <https://scholar.google.ru/> показал слабую проработанность данной проблемы как в отечественной, так и зарубежной литературе. Главным образом, работы посвящены разработке методов повышения точности цифровых моделей рельефа [7; 12], технологии выполнения специализированных аэросъемочных работ [7], интеграции разнородных облаков точек для улучшения цифровых моделей рельефа [10; 11], методике извлечения пикетов с моделей для построения горизонталей [2]. Таким образом, проблема автоматизации элементов топографического плана/карты с требуемой геометрической точностью и географической достоверностью типологического рисунка, несмотря на достижения современной геоинформатики остается нерешенной [3; 8].

Большинство указанных работ проводилось для небольших территорий с относительно ровной поверхностью, однако, в более сложных условиях, приведенные в работах методики, плохо реализуются. В данной работе в качестве модельных территорий выбраны два значительно отличающиеся по характеру рельефа участка. Первый участок — плакорная Ямская степь (участок заповедника Белогорье, Белгородская область) с эрозионным рельефом, второй — ледниковый цирк Хибинского горного массива Мурманской области. Ледниковый цирк — чашеобразное углубление, с крутыми, местами отвесными задними и боковыми стенками, с полого — вогнутым дном. В данном случае — боковой цирк троговой долины (ширина до 1 км, высота задней стенки около 300 м), с сезонным накоплением снега.

На полевом этапе сбора данных была выполнена аэрофотосъемка исследуемых полигонов при помощи квадрокоптеров модели DJI Phantom 4 Pro и Mavic Air 2. Они оснащены съемочными камерами с разрешением 20 и 48 Мп соответственно, с эквивалентным фокусным расстоянием 24 мм. Запись файлов снимков произведена в формате JPEG.

Для горной территории аэрофотосъемка была сопряжена с двумя важными техническими сложностями, связанными с особенностями рельефа: 1) наличие отвесных склонов неразличимых при съемке в надир; 2) разница в пространственном разрешении при выполнении полёта с одной высоты. Для решения этих проблем была разработана методика выполнения аэрофотосъемки, которая заключалась в проведении залётов БПЛА на разных высотных эшелонах для «ступенчатой» съемки склона цирка (см. рис. 1), а также в дополнении съемки в надир перспективными кадрами крутых склонов.

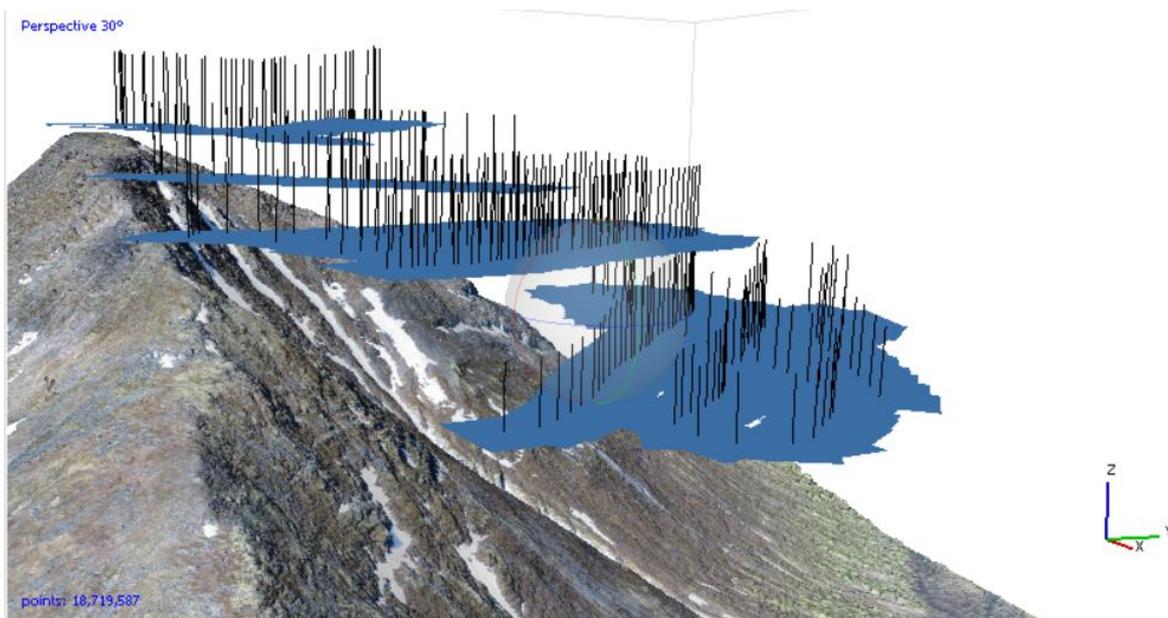


Рис. 1. «Ступенчатый» метод аэрофотосъемки.

Полученные массивы аэрофотоснимков для двух полигонов были обработаны по идентичной технологии с использованием программного обеспечения Agisoft Photoscan. Выбор программного обеспечения связан с простой работы алгоритма Structure from Motion, хотя эксперименты показывают, что это приводит к снижению точности моделей [9].

Первый этап работ сводился к взаимному выравниванию полученных снимков и последовательному построению плотного облака точек среднего качества в универсальной проекции Меркатора (UTM). Из-за наличия точек с неверно определенными параметрами координат, выполнена геометрическая коррекция облака точек путем их фильтрации (удаления). После получения удовлетворительного результата произведено построение цифровой модели местности и ортофотоплана. Основным продуктом, по которому производится автоматизированное построение горизонталей — цифровая модель рельефа, указанным способом получают для участков с отсутствием древесно-кустарниковой растительности. Для участков, где произрастает древесно-кустарниковая растительность, точки плотного облака подвергаются разделению на три класса: поверхность, растительность и прочее. По

точкам, включенным в класс «поверхность», создана ЦМР. Полученные ЦМР и ортофотопланы послужили основой для составления рельефа топографических планов.

Несмотря на применение специальной технологии аэрофотосъемки и выполненную фильтрацию плотного облака точек, на выходных материалах остались дефекты — «дыры» или «смазанные» фрагменты. Подобные ошибки построения характерны для краев изображений, а также для затененных отрицательных форм рельефа — они возникают из-за недостатка связующих точек на исходных снимках.

Следующий этап работ — создание горизонталей с помощью функциональных возможностей ГИС-пакета ArcGIS 10.6. В первую очередь проведена подготовка данных для картографирования: все недостоверные фрагменты были «обрезаны» при помощи маски.

Далее проведена фильтрация растров цифровых моделей рельефа методом скользящего окна, заключающаяся в огрублении значений пиксела. Исходные геоизображения обладали пространственным разрешением 8 см/пикс (ледниковый цирк) и 5 см/пикс (Ямская степь). Изображения тестовых полигонов создавались в масштабе 1:5 000 и 1:10 000 соответственно. Фильтрация растра позволила избежать излишнего «дрожания» изолиний при автоматическом построении контуров. Размер пикселей результирующих растров после фильтрации стал составлять 24x24 см.

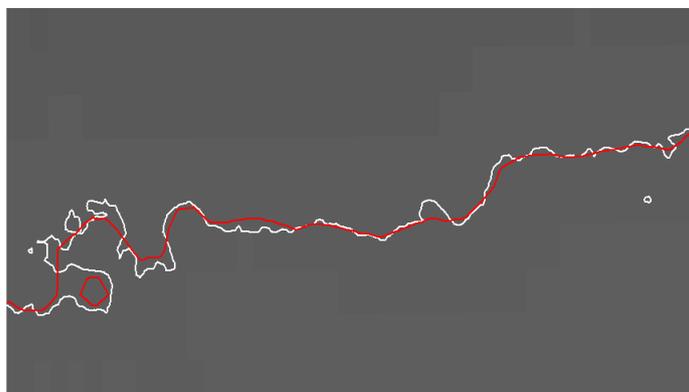


Рис. 2. Сравнение горизонталей, построенных по исходному растру (белый цвет) и построенных после фильтрации (красный цвет).

На следующем этапе по данным цифровой модели местности автоматически (инструментом *Contour* в ArcGIS) были проведены горизонталы с фиксированным шагом по высоте 10 м. Далее проведен визуальный анализ полученных горизонталей и выявлены недочеты в рисовке рельефа (см. рис. 3).



Рис. 3. Ошибки автоматизированной прорисовки горизонталей.

Для ледникового цирка выявлены следующие сложности: отсутствие прорисовки долин малых водотоков, несогласование рисунка горизонталей по днищу большого водотока (см. рис. 3а); прорисовка горизонталей на месте водных объектов площадной локализации горных озер и скал-останцев (см. рис. 3б); отсутствие разрывных форм рельефа; крутые склоны, которые должны наноситься специальными условными знаками прорисовывались системой горизонталей с явным растяжением отстояния их друг от друга.

Получение горизонталей, отражающих типологический рисунок ледникового цирка, потребовало существенных корректировок их геометрии. Для этого построена гипсографическая кривая, и создана карта крутизны склонов. Гипсографическая кривая показала уровни значимых перегибов рельефа, а на карте крутизны склонов были отражены участки, которые по требованиям нормативных документов надо изображать специальными условными знаками. Также высчитанные крутизны давали понимание величины затяжек горизонталей русел по разным частям водотоков. Далее было проведено гидрологическое моделирование средствами ESRI ArcGIS (инструменты Fill, Flow Direction, Flow Accumulation из набора Hydrology), и построена сеть потенциальных водотоков.

На основе построенных и отредактированных горизонталей, а также полученной сети водотоков смоделирована новая цифровая модель рельефа, на основе которой были автоматически проведены новые горизонтали с шагом 10 метров. Для новых горизонталей также были проведены ручное точечное исправление и сглаживание и по новой модели рельефа долины ручьёв выделились в рисунке рельефа географичнее (см. рис. 4).

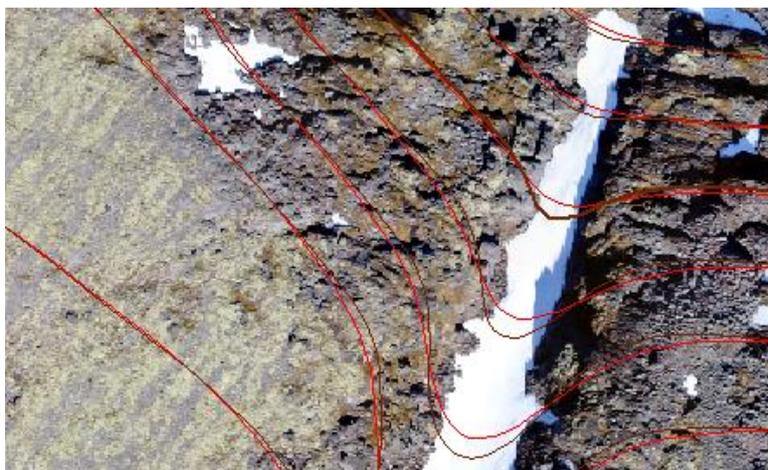


Рис. 4. Красным цветом показаны первые построенные горизонталы (исходная фильтрованная ЦММ), коричневым — новые построенные горизонталы (построенная по горизонталям ЦММ и сети водотоков ЦМР).

Для рельефа Ямской степи возникли сложности, обусловленные заросшими древесно-кустарниковой растительностью балками. С помощью материалов аэро съемок такие участки трудно восстанавливаются и требуют наземных измерений (положение нивелирных профилей). В случае с ЦМР создавались профили рельефа, и по ним производилась ручная корректировка формы горизонталей с сохранением географической достоверности.

Выводы:

- анализ мирового опыта автоматизированного построения горизонталей по цифровым моделям показывает, что его результат не удовлетворяет требованиям нормативных документов РФ по созданию государственных топографических планов и карт,
- для различных типов рельефа требуются различные подходы как на этапе получения данных, так и на последующих этапах составления и редактирования планов,
- частично автоматизировать придание географической верности прорисовке горизонталей возможно,
- однако, даже в пределах одного типа рельефа многообразие его форм не позволяет пока полностью автоматизировать процесс, особенно это касается специальных условных знаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровка Е. А., Верещака Т. В. Государственный топографический мониторинг: геопространственно-информационный потенциал и пути реализации // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – №. 3. – С. 21–31.
2. Варфоломеев А. Ф., Коваленко А. К., Манухов В. Ф., Калашникова Л. Г. Особенности технологии аэрофотосъёмки с применением беспилотных воздушных судов // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 8. – С. 58–64. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-962-8-58-64.
3. К 100-летию со дня рождения Ирины Павловны Заруцкой [Электронный ресурс] // Вестник Московского университета. – Серия 5. География. – 2009. – №1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-100-letiyu-so-dnya-rozhdeniya-iriny-pavlovny-zarutskoy> (дата обращения: 30.10.2020).
4. Кошель С. М., Энтин А. Л., Самсонов Т. Е. Устранение локальных понижений на цифровых моделях рельефа с сохранением особенностей исходного поля высот // Геоинформатика. – 2019. – № 2. – С. 43–56.
5. Тесленок С. А., Манухов В. Ф., Тесленок К. С. Цифровое моделирование рельефа Республики Мордовия // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 7. – С. 30–38. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-949-7-30-38.
6. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electromontaj-proekt.ru/data/documents/uslovnyye-znaki-dlya-topograficheskikh-planov.pdf> (дата обращения: 21.12.2020).
7. Dragos A. G., Anghel S. The digital elevation model of Sărata Monteoru and other photogrammetric products obtained through processing data acquired by UAV systems // Geo-Eco-Marina. – 2019. – No. 25. – pp. 265–272.
8. Häberling, C., Hurni, L. Mountain cartography: revival of a classic domain // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2002. – No. 57(1-2). – pp. 134–158. doi:10.1016/s0924-2716(02)00113-2.
9. Lumban-Gaol Y. A., Murtiyoso A., Nugroho B. H. Investigations on the bundle adjustment results from SFM-based software for mapping purposes // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. – 2018. – Vol. 42. – No. 2. – P. 254.
10. Medvedev A., Telnova N., Alekseenko N. et al. UAV-derived data application for environmental monitoring of the coastal area of lake Sevan, Armenia with a changing water level // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, No. 22. – P. 3821.

11. Mora O. E. et al. Comparing UAS Photogrammetrically-Derived Point Clouds with GNSS Measurements and Terrestrial Laser Scanning for Topographic Mapping // Drones. – 2019. – Vol. 3. – No. 3. – P. 64.
12. Rock G., Ries J. B., Udelhoven T. Sensitivity analysis of UAV-photogrammetry for creating digital elevation models (DEM) // Proceedings of the Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics. – Zurich, 2011. – Vol. 1416. – P. 146.