

УДК 551.4.012

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЧВЕННОЙ И ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ

*А.М. Гафуров*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

### Аннотация

В статье представлены результаты, позволяющие утверждать о возможности использования беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в форм-факторе квадрокоптера (на примере DJI Phantom 4) для оценки эрозионных потерь почвы. Проведен сравнительный анализ результатов съемки с помощью БПЛА до и после использования наземных опорных точек для геоориентирования полученной трехмерной цифровой модели рельефа. При использовании четырех опорных точек точность привязки возросла на два порядка при снижении ошибок по высоте до 2–2.2 см. Кроме того, проведено сравнение получаемой с помощью БПЛА модели рельефа с эталонной, полученной с помощью наземного лазерного сканирования. Полученные результаты свидетельствуют о применимости метода оценки объемов эрозии и аккумуляции в звене овражной эрозии при соблюдении методики обеспечения геодезического обоснования.

**Ключевые слова:** эрозия, овраг, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), фотограмметрия, наземное лазерное сканирование, цифровая модель рельефа, GNSS, тахеометрия

### Введение

Почвенная эрозия является одним из основных факторов деградации сельскохозяйственных земель [1]. Традиционные методы оценки темпов смыва и аккумуляции достаточно трудоёмки и в целом недостаточно точны для оценки пространственных изменений рельефа при формировании ручейковой сети и аккумулятивных образований на обрабатываемых, пастбищных или других склонах с нарушенным растительным покровом [2, 3]. Развитие технологий, в особенности геоинформационных, позволило получать данные с недоступной для традиционных методов скоростью и точностью. В частности, высокие точность и детальность изменений поверхности рельефа достигаются при использовании роботизированных тахеометров [4], глобальных навигационных спутниковых систем (Global Navigation Satellite System) (GNSS) [5] и наземных лазерных 3D-сканеров (НЛС) [6]. Однако каждый из них имеет один существенный недостаток – проведение измерений возможно только локально, и особенно в условиях равнинного рельефа достаточно сложно охватить измерениями обширные пространства, какими являются, например, обрабатываемые поля. Кроме того, съёмка с применением этих методов занимает достаточно

продолжительное время. Решением этой проблемы могло бы стать использование воздушного лазерного сканирования (ВЛС), но стоимость соответствующего оборудования сводит на нет целесообразность его применения [7].

Следует отметить, что построение трехмерной модели рельефа возможно не только на основе непосредственного измерения координат точек, как в случае с лазерным сканированием. Точность, соизмеримую с достигаемой при лазерном сканировании, можно получить, используя технологию фотограмметрии [8]. Несомненным преимуществом фотограмметрии перед лазерным сканированием также является скорость получения данных в поле и плотность точек, достигаемая при конечной обработке [9].

В последние несколько лет разработка и доступность беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и возросшее качество цифровых камер, используемых для проведения съёмки с их бортов, активизировало научные исследования с использованием такого рода оборудования [10–12]. Конечным продуктом использования БПЛА является трехмерное облако точек, производными которого являются цифровые модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) в мировой системе координат. Однако в сравнении с трехмерным лазерным сканированием себестоимость БПЛА в комплекте с программным обеспечением для обработки измерений на порядок ниже [13]. Лидерами по производству беспилотных аппаратов являются ГК Геоскан (Россия) и DJI Technology (Китай). Последние сосредоточились на производстве летательных аппаратов в форм-факторе коптера.

Квадрокоптеры бюджетного типа использовались для изучения карстовых процессов в Германии [14], для изучения почвенной эрозии в Марокко [15] и Бельгии [16]. Кроме того, беспилотные аппараты такого типа используются для мониторинга опасных оползневых процессов [17]. В России работы по оценке трансформации рельефа экзогенными процессами с привлечением подобного рода техники до настоящего времени не проводились.

Основой для проведения такого рода работ является позиционирование и регистрация точек съёмки. Точное позиционирование результатов фотограмметрии позволяет выполнять работы по мониторингу объемных и пространственных изменений любого изучаемого объекта [17], включая рельеф местности. Геореференцирование результатов фотограмметрии с помощью БПЛА возможно несколькими способами. Первым и наименее трудозатратным является использование встроенных в БПЛА модулей GPS. Однако погрешность позиционирования в данном случае может достигать нескольких метров. Вторым способом является позиционирование с помощью специальных марок, координаты которых получены с помощью RTK-DGPS приемников. При этом достигается дециметровая точность позиционирования по высоте [14]. Третий способ представляет собой модификацию второго, здесь в качестве источника получения координат марок берется тахеометрия. В таком случае достигается миллиметровая точность позиционирования. Несмотря на эталонную точность, третий способ предполагает проведение дополнительных работ по геодезическому обоснованию, что является слишком трудозатратным, особенно на больших территориях.

В настоящей работе приводятся результаты применения БПЛА для отработки методики позиционирования и задания опорных координат съёмки для

условий центра Восточно-Европейской равнины, а также оценивается возможность использования технологии при поведении мониторинга линейного и объемного приростов оврагов.

### Материалы и методы

В качестве тестового полигона для отработки методики позиционирования и съемки был выбран участок танкодрома Казанского высшего военного командного училища (КВВКУ) площадью 2500 м<sup>2</sup>. Экспериментальный участок расположен в Приволжском районе г. Казань (рис. 1) и представляет собой сложенный делювиальными суглинками холм высотой 30 м.



Рис. 1. Участок Танкодрома КВВКУ (красный прямоугольник), выбранный для отработки методики позиционирования данных

Апробация методики в полевых условиях была произведена 18 октября 2016 г. на правом склоне бассейна р. Темев Ручей Высокогорского района Республики Татарстан (рис. 2). Склон сложен тяжелыми делювиальными суглинками и имеет средний уклон 5°.

Методика использования БПЛА для оценки эрозионных потерь почвы включает семь этапов [18]:

- 1) расстановка опорных точек;
- 2) загрузка полетного задания в контроллер БПЛА;
- 3) съемки с БПЛА;
- 4) редактирование полученных снимков, выравнивание;
- 5) создание плотного облака точек, его классификация;
- 6) создание цифровой модели рельефа (ЦМР);
- 7) расчет эрозионных потерь и аккумуляции почвы.



Рис. 2. Участок бассейна р. Темев Ручей Высокогорского района РТ (красный прямоугольник), выбранный для облета с помощью БПЛА

Для проведения фотограмметрических работ был использован БПЛА Phantom 4 производства фирмы DJI Technology. Данный квадрокоптер позволяет производить работы на высоте до 100 м, при этом скорость полета коптера достигает 72 км/ч. Дрон оснащен системой трехосевой активной стабилизации камеры и встроенными модулями GPS и ГЛОНАСС. Съемка осуществлялась встроенной камерой с фокальным расстоянием 20 мм в 35 мм эквиваленте, при этом калибровка камеры проводилась программно с помощью шахматного паттерна в ПО Agisoft Lens, в которой вычислялись калибровочные коэффициенты. Данные коэффициенты использовались для корректировки дисторсий, вызванных широкоугольным объективом, встроенным в БПЛА, что могло привести к возникновению геометрических искажений при генерации облаков точек с помощью алгоритма Structure-from-Motion (SfM) [19].

Управление квадрокоптером производилось в автономном режиме путем загрузки полетного задания в контроллер дрона. Полетное задание задавалось с помощью ПО Pix4DCapture швейцарской фирмы Pix4D (рис. 3). Преимущества данного ПО состоят в том, что оно работает на всех современных мобильных платформах, при этом создание полетного задания не вызывает проблем даже при первом запуске [17].

Отработка методики производилась на танковом полигоне КВВКУ. Всего было выполнено два полета, при этом настройки полета были одинаковыми: полет на высоте 30 м, продольное и поперечное перекрытие снимков составило 80%, угол наклона камеры 90°, скорость полета 5 м/с, а площадь облета составила 2500 м<sup>2</sup>. Первый полет проводился без размещения наземных опорных точек, следующий полет осуществлялся уже с расставленными на поверхности Земли марками. Опорные точки представляют собой шахматный паттерн 2×2

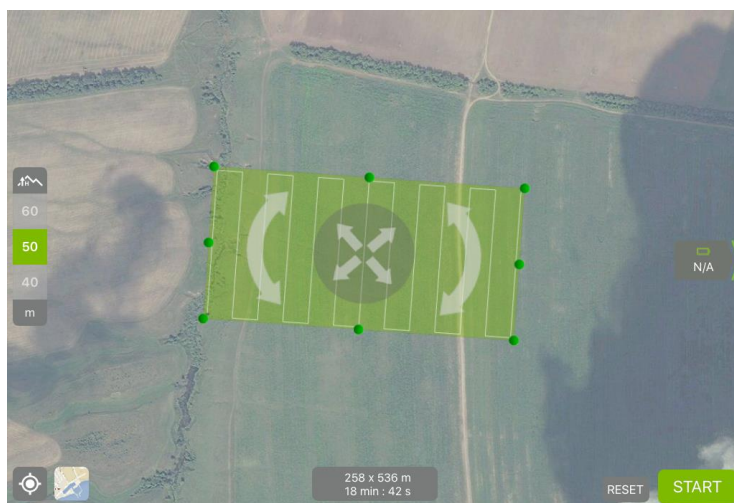


Рис. 3. Интерфейс программы Pix4DCapture

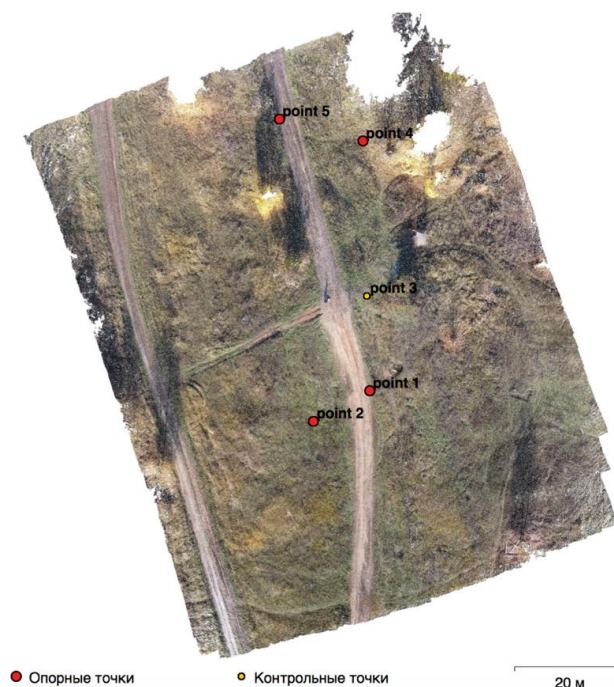


Рис. 4. Положения опорных точек

со стороной 20 м. Такой тип марки отчетливо виден с высоты до 50 м. Опорные точки использовались для уточнения координат SfM-облака точек. Для вычисления координат опорных точек был использован GNSS-приемник Trimble Geoexplorer 6000, работающий в RTK-режиме. В качестве базовой станции использовался приемник Trimble NetR9 Geospatial и антенна Trimble GNSS Choke w/SCIS Dome на станции сети IGS KZN2, расположенной в Астрономической обсерватории Казанского федерального университета. Всего было использовано пять марок, при этом в качестве опорных были использованы четыре, одна – в качестве контрольной (рис. 4).

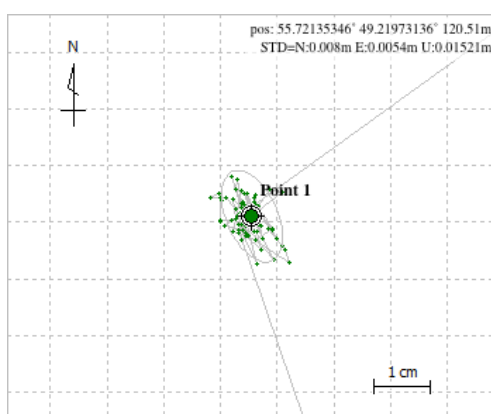


Рис. 5. Уравнивание в ПО RTKLib на примере точки 1

Табл. 1

Координаты опорных и контрольных точек после постобработки в RTKLib

#	x, м	y, м	z, м	ns	SDN, м	SDE, м	SDU, м
1	388177.57	6176503.38	120.51	9	0.008	0.0054	0.01521
2	388167.55	6176497.98	116.88	9	0.008	0.0053	0.0151
K	388177.04	6176520.13	123.92	9	0.008	0.0053	0.0151
4	388176.34	6176547.55	120.75	9	0.008	0.0054	0.0152
5	388161.54	6176551.41	120.32	6	0.0201	0.0176	0.0171

# – номер точки; x, y, z – координаты точки в СК UTM39N; ns – количество валидных спутников; SDN, SDE, SDE – стандартное отклонение по x, y, z соответственно.

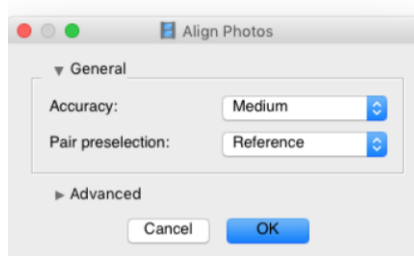


Рис. 6. Выравнивание снимков в ПО Agisoft Photoscan

Для получения максимально возможной точности было проведена постобработка GNSS-измерений в ПО RTKLib [20]. Данное программное обеспечение позволяет производить обработку базовых линий и уравнивание сети триангуляции (рис. 5). Результаты уравнивания представлены в табл. 1.

Собранный материал выгружался в ПО Agisoft Photoscan для проведения фотограмметрических работ.

На начальном этапе обработки проводится выравнивание фотографий друг относительно друга (рис. 6). Для этого применяется SfM-метод [3]. Выравнивание проводилось с использованием Exif-данных фотографий, в которых содержалась информация о координатах центра снимка в системе координат UTM39N.

Далее необходимо выделить на снимках опорные точки (в случае их наличия) с указанием координат их центров. После этого рассчитывается классифицированное плотное облако точек, которое содержит в себе данные о точках, принадлежащих к классу «поверхность», «средняя растительность», «низкая растительность», «шум». Так как для построения ЦМР необходим только набор точек класса «поверхность», прочие точки исключались из выборки. Оставшиеся точки использовались для построения ЦМР с шагом сетки 0.05 м.

Было проведено сравнение ЦМР, построенной на основе результатов съёмки с помощью БПЛА, с взятой в качестве эталонной ЦМР, полученной по результатам применения роботизированного тахеометра с функциями наземного лазерного сканера (НЛС) Trimble VX Spatial Station. Для этого одновременно со съёмкой с БПЛА были проведены работы по сканированию оврага, а также был проложен тахеометрический ход по бровке оврага. Для обеспечения геодезического обоснования положения тахеометра ранее была заложена сеть грунтовых реперов. Стандартное отклонение ( $\sigma$ ) ошибки привязки всех сканов составило  $< 1$  мм [14].

Для обеспечения увязки данных с БПЛА и данных, полученных с помощью тахеометра, была проведена работа по съёмке координат грунтовых реперов с помощью GNSS-приемника Trimble Geoexplorer 6000. Полученные координаты были использованы для пересчета координат облака точек при сшивке и регистрации проекта в среде ПО Trimble Realworks [21].

Построенные на основе двух независимых методов ЦМР сравнивались в ПО Golden Software Surfer с помощью растрового калькулятора [22]. Величина погрешности оценивалась по таким показателям, как среднеквадратическая ошибка  $RMSE$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta H_i|^2},$$

минимальное и максимальное значения разности двух ЦМР, систематическая ошибка  $\bar{\Delta}_H$

$$\bar{\Delta}_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i,$$

и стандартная ошибка  $\sigma_{\Delta h}$

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2},$$

для исключения систематической ошибки из результатов измерений [23]. Здесь  $\Delta H_i$  – погрешность ЦМР по данным БПЛА относительно ЦМР по данным НЛС в ячейке сетки,  $n$  – число ячеек,  $\Delta h_i = \Delta H_i - \bar{\Delta}_H$  – погрешность ЦМР по данным БПЛА относительно ЦМР по данным НЛС в ячейке сетки без систематической ошибки.

Для оценки плановых смещений по полученной с помощью БПЛА ЦМР была отрисована бровка оврага, которая сравнивалась с бровкой, построенной по результатам тахеометрической съёмки. В качестве критерия оценки использовалась средняя величина разницы двух полилиний.

Табл. 2

Сравнение средних ошибок координатной привязки при проведении съёмки без и с использованием опорных точек

Ошибка X, м	Ошибка Y, м	Ошибка Z, м	Ошибка XY, м	Общая ошибка, м
Съёмка без использования опорных точек				
1.13671	0.676305	0.184098	1.32268	1.33543
Съёмка с использованием опорных точек				
0.00577323	0.00456741	0.0213849	0.00736148	0.0226165

При использовании четырех опорных точек точность привязки возросла на два порядка при снижении ошибок до 2–2.2 см.

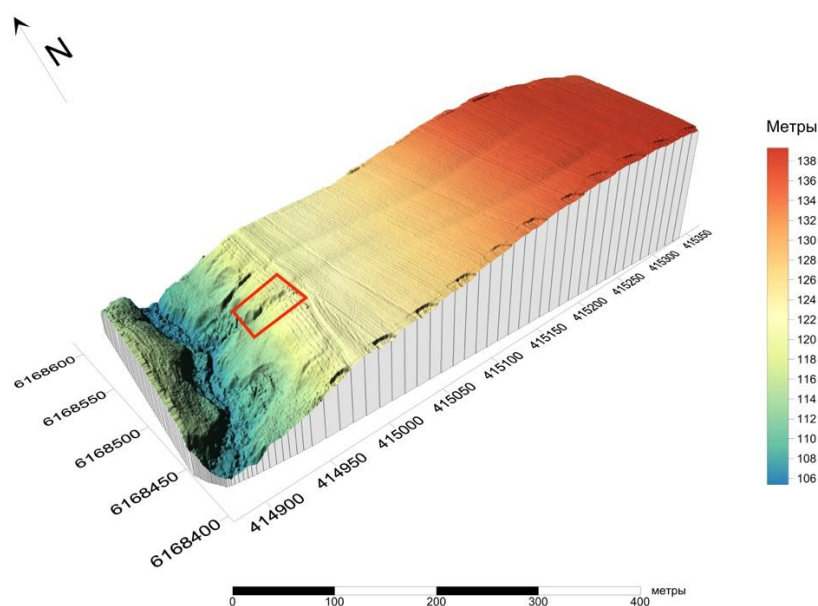


Рис. 7. ЦМР участка в бассейне р. Темев Ручей с выбранным оврагом (красный прямоугольник), полученная по данным БПЛА

### Результаты

Использованию методики съёмки с помощью БПЛА на пахотных угодьях предшествовала работа по разработке методики организации сети опорных точек. За каждый из двух полетов было выполнено 107 снимков на площадь 2500 м<sup>2</sup>. В результате каждой съёмки были получены облака точек с суммарным объемом 4 млн точек. Результаты оценки точности привязки с использованием опорных точек и без них приведены в табл. 2.

Для участка в бассейне р. Темев Ручей съёмка с помощью БПЛА проводилась с высоты 40 м, при этом скорость полета составила 4 м/с, продольное и поперечное перекрытие снимков при съёмке составило 80%. Суммарно было получено 422 снимка, которые послужили основой для генерации облака точек плотностью 1690 точек/м<sup>2</sup> и объемом 169 млн точек (рис. 7). Одновременно с этим была проведена съёмка оврага, покрываемого снимками с БПЛА, с помощью НЛС. Всего с помощью 3D-сканера было получено 17000 точек, которые в дальнейшем были использованы для построения ЦМР. ЦМР по данным



Табл. 3

Показатели точности высот модели, полученной с помощью БПЛА, по всей совокупности данных

Число точек	577528
Систематическая ошибка, м	-0.18
Средняя квадратическая ошибка (RMSE), м	0.3
Минимальное значение разности, м	-1.10
Максимальное значение разности, м	0.76
Стандартная средняя ошибка, м	0.0007

НЛС и БПЛА были построены с применением метода триангуляции с линейной интерполяцией, шаг сетки в обоих случаях задавался равным 1 см. Экстент обеих ЦМР задавался, исходя из границ съёмки с помощью НЛС. Таким образом, число точек ЦМР составило 577528.

В качестве основных показателей точности модели, полученной с помощью БПЛА относительно модели, полученной с помощью НЛС, были использованы показатели, приведенные в табл. 3.

Результаты выполненных исследований точности модели, полученной с помощью БПЛА, позволяют сделать вывод о возможности использования этой модели для оценки объемного прироста оврагов. Данный вывод основывается на соотношении систематической ошибки и допустимой согласно инструкции [24] ошибки, которая не должна превышать 0.5 мм в масштабе карты или 5 см для масштаба 1:100. При этом, приняв модуль величины систематической ошибки и скорректировав его относительно надирного отклонения, не превышающего 5°, получаем среднюю величину смещения, равную 3 см, что меньше допустимой ошибки.

Для анализа точности оценки плановых изменений была отрисована бровка оврага, которая сравнивалась с положением бровки, полученным с помощью тахеометрической съёмки (рис. 8). Для этого из точек тахеометрического хода была создана аппроксимирующая полилиния. Контур, образуемый между двумя полилиниями, очерчивал границы полигона, для которого были рассчитаны величины периметра и площади. Зная эти параметры, можно оценить среднюю ширину полигона, что в нашем случае равно среднему плановому смещению. Периметр полигона составил 48.19 м, площадь полигона равна 1.66 м<sup>2</sup>. Таким образом, среднее плановое смещение линии бровки оврага, полученной с помощью БПЛА относительно линии, полученной с помощью тахеометра, равно 0.07 м.

Полученное различие связано с растительностью, произрастающей на бровке оврага. Отрисовка границ оврага по ЦМР или ортофотопланам, полученным по результатам съёмки БПЛА, проводится по видимым границам, когда как реальные границы скрыты за дерновым слоем. В случае с тахеометрической съёмкой бровка оврага отрисовывалась по ее фактическому положению.

### Заключение

Несмотря на бурное развитие новых технологий, применение последних для решения вопросов экологической геоморфологии в России идёт не столь активно. Использование БПЛА в форм-факторе квадрокоптеров позволит не только

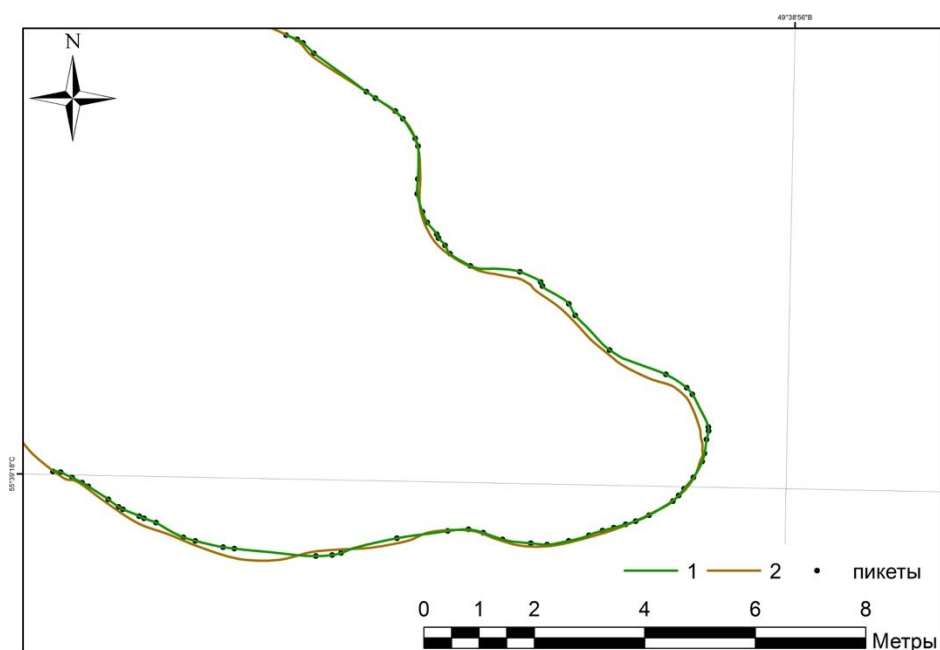


Рис. 8. Бровка оврага, отрисованная по результатам съемок с помощью тахеометра (1) и БПЛА (2)

производить рекогносцировочные работы, но и обеспечит построение высокоточных моделей рельефа миллиметрового разрешения при использовании опорных наземных точек с фиксированными координатами. Использование данного метода даёт возможность проведения количественной оценки почвенной эрозии после стокообразующих событий на сельскохозяйственных землях, в первую очередь на пашне, что имеет большое значение для понимания механизма склоновой эрозии на используемых в сельском хозяйстве территориях. Предлагаемую технологию можно также успешно применять для оценки темпов планового и объёмного приростов оврагов, формирующихся вне залесённой местности. В случае применения этого метода для оценки объёмов перемещённого материала при смыве и аккумуляции непосредственно на пахотных угодьях и изучения структуры временной речушечной сети необходимо проводить дополнительные работы по геодезическому обоснованию сети опорных точек. Кроме того, существуют ограничения, связанные с погодными условиями. Так, полеты невозможно производить при скорости ветра более 8 м/с, во время выпадения осадков, а также при температуре окружающей среды ниже 0 °С.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-17-20006).

#### Литература

1. *Заславский М.Н.* Эрозиоведение. – М.: Высш. шк., 1983. – 320 с.
2. *Егоров И.Е.* Полевые методы изучения почвенной эрозии // Вестн. Удм. ун-та. Сер. «Биология. Науки о Земле». – 2009. – Вып. 1. – С. 157–170.

3. *Lucieer A., de Jong S.M., Turner D.* Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography // *Progress Phys. Geograph.* – 2014. – V. 38, No 1. – P. 97–116. – doi: 10.1177/0309133313515293.
4. *Gafurov A.M., Yermolaev O.P., Usmanov B.M.* Assessment of the intensity of slope erosion using terrestrial laser // *Int. J. Pharm. Technol.* – 2016. – V. 8, No 3. – P. 14822–14832.
5. *Rishikeshan C.A., Katiyar S.K., Mahesh V.N.V.* Detailed Evaluation of DEM Interpolation Methods in GIS Using DGPS Data // *Proc. Sixth Int. Conf. on Computational Intelligence and Communication Networks.* – IEEE, 2014. – P. 666–671. – doi: 10.1109/CICN.2014.148.
6. *Веденева Е.А., Гафуров А.М., Ермолаев О.П., Усманов Б.М.* Оценка интенсивности современных экзогенных процессов методом наземного лазерного сканирования // *Теория и методы современной геоморфологии: Материалы XXXV Пленума Геоморфологической комиссии РАН.* – Симферополь, 2016. – Т. 1. – С. 401–405.
7. *Teo T.-A., Huang S.-H.* Surface-Based Registration of Airborne and Terrestrial Mobile LiDAR Point Clouds // *Remote Sens.* – 2014. – V.6, No 2. – P. 12686–12707. – doi: 10.3390/rs61212686.
8. *Prokop A., Schön P., Singer F., Pulfer G., Naaim M., Thibert E., Soruco A.* Merging terrestrial laser scanning technology with photogrammetric and total station data for the determination of avalanche modeling parameters // *Cold Regions Sci. Technol.* – 2015. – V. 110. – P. 223–230. – doi: 10.1016/j.coldregions.2014.11.009.
9. *Al-Manasir K., Fraser C.S.* Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanner Data via Imagery // *ISPRS Commission V Symposium “Image Engineering and Vision Metrology”.* – 2006. – V. 36, pt. 5. – P. 26–31.
10. *Colomina I., Molina P.* Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing.* – 2014. – V. 92. – P. 79–97. – doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
11. *Clapuyt F., Vanacker V., Van Oost K.* Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms // *Geomorphology.* – 2016. V. 260. – P. 4–15. – doi: 10.1016/j.geomorph.2015.05.011.
12. *Turner I.L., Harley M.D., Drummond C.D.* UAVs for coastal surveying // *Coastal Engin.* – 2016. – V. 114. – P. 19–24. – doi: 10.1016/j.coastaleng.2016.03.011.
13. *Cook K.L.* An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection // *Geomorphology.* – 2016. – V. 278. – P. 195–208. – doi: 10.1016/j.geomorph.2016.11.009.
14. *Tilly N., Kelterbaum D., Zeese R.* Geomorphological mapping with terrestrial laser scanning and UAV-based imaging // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* – 2016. – V. XLI-B5. – P. 591–597. – doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-591-2016.
15. *d’Oleire-Oltmanns S., Marzolff I., Peter K., Ries J.* Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco // *Remote Sens.* – 2012. – V. 4, No 12. – P. 3390–3416. – doi: 10.3390/rs4113390.
16. *Pineux N., Lisein J., Swerts G., Bielders C.L., Lejeune P., Colinet G., Degré A.* Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? // *Geomorphology.* – 2016. – V. 280. – P. 122–136. – doi: 10.1016/j.geomorph.2016.12.003.
17. *Car M., Kačunić D.J., Kovačević M.-S.* Application of unmanned aerial vehicle for landslide mapping // *Proc. Int. Symposium on Engineering Geodesy.* – Zagreb: Croatian Geodetic Soc., 2016. – P. 549–559.
18. *Boon M.A., Greenfield R., Tesfamichael S.* Unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry produces accurate high-resolution orthophotos, point clouds and surface models for mapping wetlands // *S. Afr. J. Geomatics.* – 2016. – V. 5, No 2. – P. 186–200.

19. Zhang W., Jiang T., Han M. Digital camera calibration method based on PhotoModeler // 3rd Int. Congress on Image and Signal Processing. – IEEE, 2010. – P. 1235–1238. – doi: 10.1109/CISP.2010.5647253.
20. Takasu T., Yasuda A. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB // Int. Symp. on GPS/GNSS. – Jeju, Korea: Int. Conv. Cent. 2009. – URL: [http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/isgps\\_2009\\_rtklib\\_revA.pdf](http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/isgps_2009_rtklib_revA.pdf).
21. Usmanov B., Yermolaev O., Gafurov A. Estimates of slope erosion intensity utilizing terrestrial laser scanning // Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci. – 2015. – V. 367. – P. 59–65. – doi: 10.5194/piahs-367-59-2015.
22. Мальцев К.А., Мухарамова С.С. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer). – Казань: Казан. ун-т, 2014. – 103 с.
23. Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. – 2011. – № 3. – С. 40–46.
24. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 48 с.

Поступила в редакцию  
16.01.17

---

**Гафуров Артур Маратович**, старший лаборант кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [gafurov.kfu@gmail.com](mailto:gafurov.kfu@gmail.com)

---

ISSN 2542-064X (Print)  
ISSN 2500-218X (Online)

**UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI**  
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

**2017, vol. 159, no. 4, pp. 654–667**

---

### **Possible Use of Unmanned Aerial Vehicle for Soil Erosion Assessment**

*A.M. Gafurov*

*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: [gafurov.kfu@gmail.com](mailto:gafurov.kfu@gmail.com)

Received January 16, 2017

#### **Abstract**

The paper presents the results that show possible use of unmanned aerial vehicle in the quadcopter form factor (DJI Phantom 4 as an example) to evaluate soil erosion rates. Comparative analysis of the drone survey before and after using of the ground control points for three-dimensional digital elevation model (DEM) georeferencing has been performed. The use of four ground control points increased the accuracy of referencing to 100 times with decreasing of the height errors to 2–2.2 cm. In addition, comparison of the UAV-based model with the reference model has been carried out based on terrestrial laser scanning (TLS). The results prove the applicability of the method of evaluating gully erosion and accumulation rates by using UAV if the requirements for geodetic control are observed.

**Keywords:** erosion, gully, unmanned aerial vehicle (UAV), photogrammetry, terrestrial laser scanning, digital elevation model (DEM), GNSS, tacheometry

**Acknowledgments.** This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 15-17-20006).

### Figure Captions

- Fig. 1. An area of the tank-training ground of the Kazan Higher Military Command School (red rectangle) selected for testing the method of data positioning.
- Fig. 2. An area of the Temev River basin, a stream of Vysokogorskii district, Republic of Tatarstan (red rectangle) selected for UAV-based survey.
- Fig. 3. Pix4DCapture program interface.
- Fig. 4. Ground control points locations.
- Fig. 5. Adjustment using RTKLib for ground control point 1.
- Fig. 6. Adjustment of images using Agisoft Photoscan.
- Fig. 7. DEM of an area in the basin of the Temev River, a stream with the selected gully (red rectangle) obtained using the UAV-based survey.
- Fig. 8. Gully rim contoured based on the results of the surveys with tacheometer (1) and UAV (2).

### References

1. Zaslavskii M.N. Erosion Study. Moscow, Vyssh. Shk., 1983. 320 p. (In Russian)
2. Yegorov I.Ye. Field methods of studying soil erosion. *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biol. Nauki Zemle*, 2009, no. 1 pp. 157–170. (In Russian)
3. Lucieer A., Jong S.M. de, Turner D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Prog. Phys. Geogr.*, 2014, vol. 38, no. 1, pp. 97–116. doi: 10.1177/0309133313515293.
4. Gafurov A.M., Yermolaev O.P., Usmanov B.M. Assessment of the intensity of slope erosion using terrestrial laser. *Int. J. Pharm. Technol.*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 14822–14832.
5. Rishikeshan C.A., Katiyar S.K., Mahesh V.N.V. Detailed Evaluation of DEM Interpolation Methods in GIS Using DGPS Data. *Proc. 6th Int. Conf. on Computational Intelligence and Communication Networks*. IEEE, 2014, pp. 666–671.
6. Vedeneyeva E.A., Gafurov A.M., Yermolaev O.P., Usmanov B.M. Assessment of the intensity of modern exogenous processes using terrestrial laser scanning. *Teoriya i metody sovremennoi geomorfologii: Materialy XXXV Plenuma Geomorfologicheskoi komissii RAN* [Theory and Methods of Modern Geomorphology: Proc. XXXV Plenary Sess. of the Geomorphological Committee of the Russian Academy of Sciences]. Simferopol, 2016, vol. 1, pp. 401–405. (In Russian)
7. Teo T.-A., Huang S.-H. Surface-based registration of airborne and terrestrial mobile LiDAR point clouds. *Remote Sens.*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 12686–12707. doi: 10.3390/rs61212686.
8. Prokop A., Schön P., Singer F., Pulfer G., Naaim M., Thibert E., Soruco A. Merging terrestrial laser scanning technology with photogrammetric and total station data for the determination of avalanche modeling parameters. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2015, vol. 110, pp. 223–230. doi: 10.1016/j.coldregions.2014.11.009.
9. Al-Manasir K., Fraser C.S. Automatic registration of terrestrial laser scanner data via imagery. *ISPRS Commission V Symp. "Image Engineering and Vision Metrology"*, 2006, vol. 36, pt. 5, pp. 26–31.
10. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2014, vol. 92, pp. 79–97. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
11. Clapuyt F., Vanacker V., Van Oost K. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology*, 2016, vol. 260, pp. 4–15. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.05.011.
12. Turner I.L., Harley M.D., Drummond C.D. UAVs for coastal surveying. *Coastal Eng.*, 2016, vol. 114, pp. 19–24. doi: 10.1016/j.coastaleng.2016.03.011.
13. Cook K.L. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*, 2016, vol. 278, pp. 195–208. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.11.009.
14. Tilly N., Kelterbaum D., Zeese R. Geomorphological mapping with terrestrial laser scanning and UAV-based imaging. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2016, vol. XLI-B5, pp. 591–597. doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-591-2016.

15. d'Oleire-Oltmanns S., Marzloff I., Peter K., Ries J. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sens.*, 2012, vol. 4, no. 12, pp. 3390–3416. doi: 10.3390/rs4113390.
16. Pineux N., Lisein J., Swerts G., Bielders C.L., Lejeune P., Colinet G., Degré A. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? *Geomorphology*, 2016, vol. 280, pp. 122–136. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.12.003.
17. Car M., Kaćunić D.J., Kovačević M.-S. Application of unmanned aerial vehicle for landslide mapping. *Proc. Int. Symp. on Engineering Geodesy*. Zagreb, Croatian Geodetic Soc., 2016, pp. 549–560.
18. Boon M.A., Greenfield R., Tesfamichael S. Unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry produces accurate high-resolution orthophotos, point clouds and surface models for mapping wetlands. *S. Afr. J. Geomatics*, 2016, vol. 5, no. 2, pp. 186–200.
19. Zhang W., Jiang T., Han M. Digital camera calibration method based on PhotoModeler. *Proc. 3rd Int. Congr. on Image and Signal Processing*. IEEE, 2010. pp. 1235–1238. doi: 10.1109/CISP.2010.5647253.
20. Takasu T., Yasuda A. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. *Int. Symp. on GPS/GNSS*. Jeju, Int. Conv. Cent., 2009, pp. 4–6.
21. Usmanov B., Yermolaev O., Gafurov A. Estimates of slope erosion intensity utilizing terrestrial laser scanning. *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.*, 2015, vol. 367, pp. 59–65. doi: 10.5194/piahs-367-59-2015.
22. Maltsev K.A., Mukharamova S.S. Building Models of Spatial Variables (Using the Surfer Package). Kazan, Kazan. Univ., 2014. 103 p. (In Russian)
23. On'kov I.V. Evaluating the accuracy of SRTM elevation for the purposes of orthotransformation of high-resolution satellite images. *Geomatika*, 2011, no. 3, pp. 40–46. (In Russian)
24. Instruction on Photogrammetric Works for Creating Digital Topographic Maps and Plans. Moscow, TsNIIGAiK, 2002. 48 p. (In Russian)

Для цитирования: Гафуров А.М. Возможности использования беспилотного летательного аппарата для оценки почвенной и овражной эрозии // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2017. – Т. 159, кн. 4. – С. 654–667.

For citation: Gafurov A.M. Possible use of unmanned aerial vehicle for soil erosion assessment. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2017, vol. 159, no. 4, pp. 654–667. (In Russian)