



УДК 528.02

DOI 10.18413/2075-4671-2019-43-2-182-190

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЧВЕННОЙ ЭРОЗИИ

### USING UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR EVALUATION OF SOIL EROSION

**А.М. Гафуров****A.M. Gafurov**

Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

Kazan Federal University,  
18 Kremlevskaya St, Kazan, 420008, Russia

E-mail: gafurov.kfu@gmail.com

#### Аннотация

Оценка почвенной эрозии на обширных территориях пахотных угодий является принципиально важной задачей современной геоморфологии. В работе представлены результаты использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для расчета объемов эрозии и аккумуляции на малых водосборах двух ключевых участков, расположенных в Республике Татарстан и Ставропольском крае по данным ежегодного мониторинга. Кроме того, дается характеристика изменения плановой структуры рисунка сети размывов – прирост количества величин составил 10 %, на 30 % увеличилась их густота. Годовой слой смыва с участка в Республике Татарстан составил 1.94 мм, с участка в Ставропольском крае – 1.04 мм.

#### Abstract

Classical field methods for assessing soil erosion provide generalized information about the washout layer or, as in the case of the method of dating deposits in the bottoms of dry valley using  $^{137}\text{Cs}$  as chronomarker, indirectly estimate the intensity of erosion by the accumulation layer. Using an approach that calculates the changes of the entire surface relative to the original, allows us to estimate the volume of material transferred within the study area, as well as estimate the amount of material transferred. The paper presents the results of the development and testing of a methodology for assessing soil erosion using unmanned aerial vehicles. The quadcopter DJI Phantom 4 was used as a UAV. The work was carried out in two key sites located in the agrarian sector of the European part of Russia - in the Republic of Tatarstan and in the Stavropol Krai. Each site was studied twice with an interval of 1 year, for each survey were obtained super-detailed digital elevation models. Subtraction of multi-temporal models allowed us to estimate the soil erosion at both key sites. The annual flush layer from the site in the Republic of Tatarstan was 1.94 mm, from the site in Stavropol Krai 1.04 mm. The use of UAVs allows not only to estimate the volume changes on arable land, but also to automatically map horizontal changes of rill erosion. For example, the increase in the number of rillheads in the Republic of Tatarstan over the year was 10 %, their density increased by 30 %. Thus, the use of unmanned aerial vehicles allows for a comprehensive assessment of erosion processes in agricultural areas.

**Ключевые слова:** эрозия, беспилотные летательные аппараты, малые водосборы, аккумуляция наносов, полевые работы.

**Keywords:** erosion, unmanned aerial vehicles, small catchments, accumulation, field work.

---

#### Введение

Процессы почвенной эрозии, проходя, как правило, на интенсивно распаханых склонах до сих пор остаются слабоконтролируемыми. При этом эрозия почв является

основным механизмом физической деградации и снижения плодородия сельскохозяйственных земель. Точная оценка темпов смываемого почвенного материала с аграрно освоенных земель является необходимым условием для проведения всего комплекса агромероприятий, в том числе противоэрозионных, а также прогнозирования темпов восстановления почв в агроландшафтах. К сожалению, существующие методы оценки почвенной эрозии имеют целый ряд ограничений и недостатков [Walling et al., 2003], таких как трудоемкость, низкая производительность или точность, слабая воспроизводимость, в том числе из-за дороговизны. Кроме того, существующие методы не способны оценить эрозионно-аккумулятивные процессы на больших территориях, например, малых водосборах [Егоров, 2009]. Все это, а также развитие и удешевление робототехники, а также увеличение вычислительных мощностей ЭВМ [Спесивый, Лисецкий, 2014; Булыгин и др., 2014] обуславливают возможность использования новейших инструментальных методов и, как следствие, необходимость разработки соответствующих методик оценки почвенной эрозии с их применением.

В последние годы в зарубежной литературе наблюдается некоторый всплеск внимания к применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для создания цифровых моделей рельефа сверхвысокого разрешения. Существующий опыт оценки почвенной эрозии с помощью сканирующих систем и разновременных цифровых моделей рельефа [Ермолаев и др., 2018] позволяет оценить перспективность использования беспилотных летательных аппаратов для оценки почвенной эрозии, как более дешевой и производительной альтернативы наземному лазерному сканированию.

### Объекты исследования

Разработка, апробация и дальнейшая реализация методики оценки почвенной эрозии проводилась на малом водосборе, расположенном в бассейне р. Темев Ручей (Республика Татарстан) (рис. 1) на юге лесной зоны с широко развитыми здесь светло-серыми лесными почвами, на мощных чехлах делювиально-солифлюкционных суглинков, залегающих на склонах водосбора.

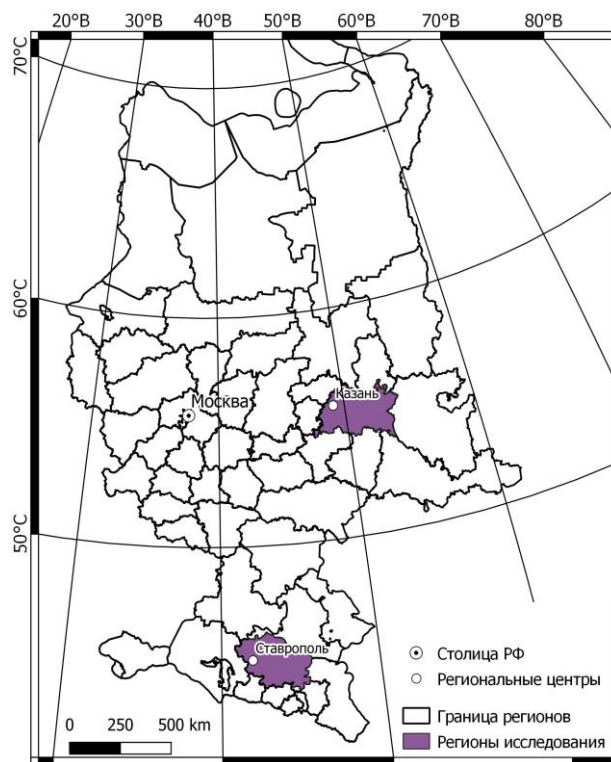


Рис. 1. Расположение ключевых участков (выделено цветом)  
 Fig. 1. The location of key sites (highlighted)



Второй ключевой участок, на котором проводилась оценка почвенной эрозии, расположен в бассейне р. Калаус (Ставропольский край). Малый водосбор площадью 37 га и средним уклоном 3.11 %, сложен солонцами, а также черноземами южными и глубокими карбонатными.

### Материалы и методы

Разработка методики оценки почвенной эрозии началась весной 2017 г. после периода талого стока до проведения работ по вспашке склонов водосбора. Время и условия были выбраны, исходя из существующего многолетнего опыта проведения мониторинговых наблюдений за почвенной эрозией с помощью наземного лазерного сканера [Ермолаев и др., 2018; Neugirg et al., 2016]: отсутствие дернового покрова, наличие сформировавшейся сети ручейковых размывов после периода снеготаяния. В качестве оборудования для съемки использовался малый беспилотный летательный аппарат DJI Phantom 4 [Gafurov, 2018]. Управление и съемка с прибора производились в автоматическом режиме путем загрузки полетного задания в контроллер прибора [Голосов, Ермолаев, 2019]. В полетное задание были включены такие параметры, как высота полета прибора от точки взлета, процент продольного и поперечного перекрытия снимков [Arfaoui, 2017]. Для проведения работ по оценке почвенной эрозии с БПЛА по данным ежегодного мониторинга высота полета должна составлять 100–150 м для аппарата с установленной камерой с разрешением 12 мегапикселей, процент продольного и поперечного перекрытия должен составлять 65–75 % [Гафуров, 2017].

Для обеспечения повторности наблюдения и точности привязки на исследуемой территории устанавливаются временные контрольные точки [Agüera-Vega et al., 2017], представляющие черно-белые полотна размером 70×70 см с четко выраженным центром, координаты которого определяются по данным съемки приемником глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС), работающим в режиме кинематики реального времени [Takasu, Yasuda, 2009]. Для ключевого участка в Республике Татарстан в качестве базовой станции использовалась станция Международной Геодезической Сети, расположенной в астрономической обсерватории Казанского федерального университета. Для участка, расположенного в Ставропольском крае, использовалась базовая станция сети NIVE (<https://tinex.io>) STAV (Ставрополь Пржевальского). При проведении повторных наблюдений процедура повторялась. Точность привязки разновременной съемки составила 2 мм для ключевого участка в Республике Татарстан и 1 мм для ключевого участка в Ставропольском крае.

Обработка результатов съемки включала в себя уравнивание снимков, создание плотного облака точек, его фильтрацию и сегментацию от артефактов и точек, не относящихся к рельефу, а также создание цифровой модели рельефа с шагом сети, равной 5 см. Весь цикл камеральных работ проводился в программном обеспечении (ПО) Agisoft Photoscan [James et al., 2017].

Вычитание разновременных моделей проводилось в модуле Volume ПО Golden Software Surfer [Ермолаев и др., 2018], где одновременно с объемом областей превышения и понижения относительно отсчетной поверхности, определялась площадь проекции модели на плоскость, что позволяет рассчитать удельные показатели слоя смыва и аккумуляции почвы.

### Результаты и их обсуждение

Цифровые модели рельефа, безусловно, являются базовой основой проведения высокоточных работ по оценке экзогенных процессов [Pineux et al., 2017], при этом, чем детальнее цифровые модели, тем точнее конечная оценка [Мальцев и др., 2018]. Беспилотные летательные аппараты позволили создать высокоточные разновременные

цифровые модели рельефа на ключевых малых водосборах Республики Татарстан (рис. 2) и Ставропольского края (рис. 3).

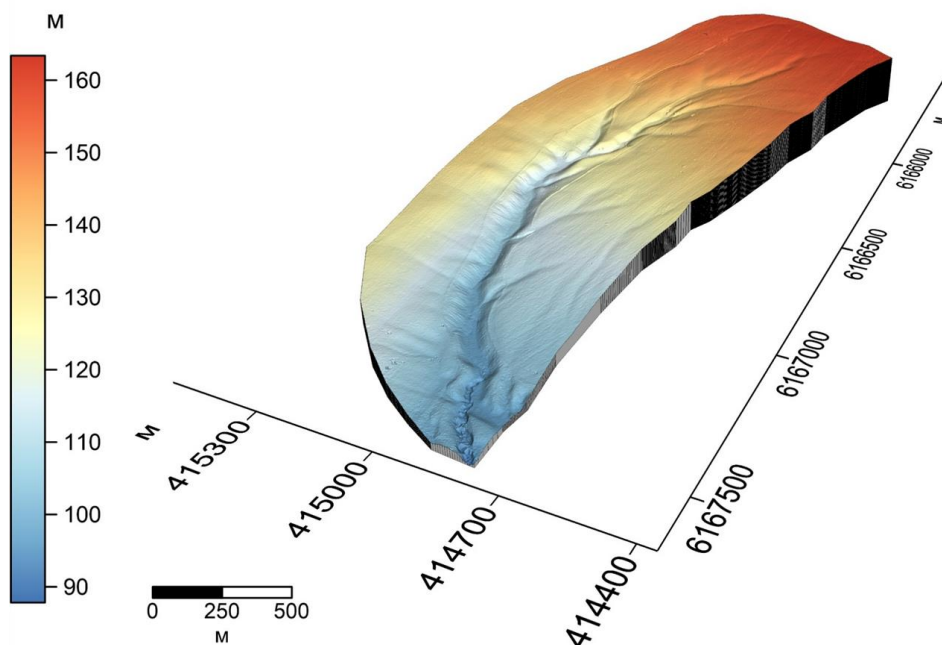


Рис. 2. Цифровая модель рельефа водосбора балки участка в Республике Татарстан, полученная по результатам съемки с БПЛА (система координат UTM39N)  
 Fig. 2. A digital elevation model of the catchment of the site in the Republic of Tatarstan, obtained from the results of the survey with the UAV (UTM39N coordinate system)

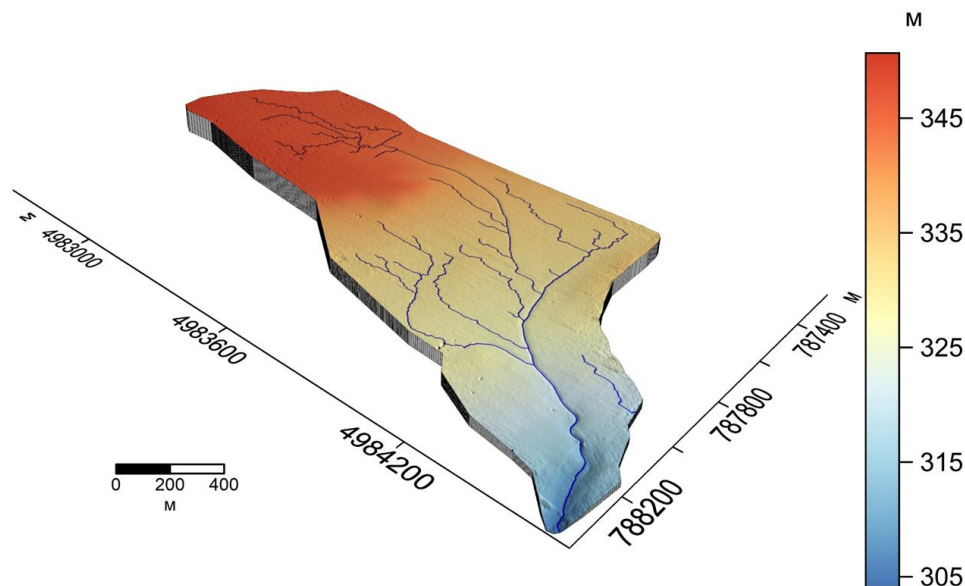


Рис. 3. Цифровая модель рельефа водосбора балки участка в Ставропольском крае, полученная по результатам съемки с БПЛА (система координат UTM37N)  
 Fig. 3. A digital elevation model of the catchment of the site in the Stavropol Krai, obtained from the results of the survey with the UAV (coordinate system UTM37N)

Использование ЦМР с БПЛА позволяет в автоматическом режиме проводить трассировку струйчатых размывов различной глубины. При этом, глубина картированных размывов напрямую зависит от разрешения ЦМР: для картирования промоин глубиной 1 м необходима ЦМР разрешения не менее 5 м, для борозд глубиной 50 см необходима ЦМР разрешения не менее 2.5 м, для размывов глубиной 5 см необходима ЦМР

разрешения не менее 0.25 м, а для микроручейковой сети глубиной 1 см необходима ЦМР разрешения не менее 0.05 м (рис. 4). Достоверность картирования проверяется с использованием ортофотопланов, получаемых, как результат съемки с БПЛА, а также в полевых условиях на характерных участках.

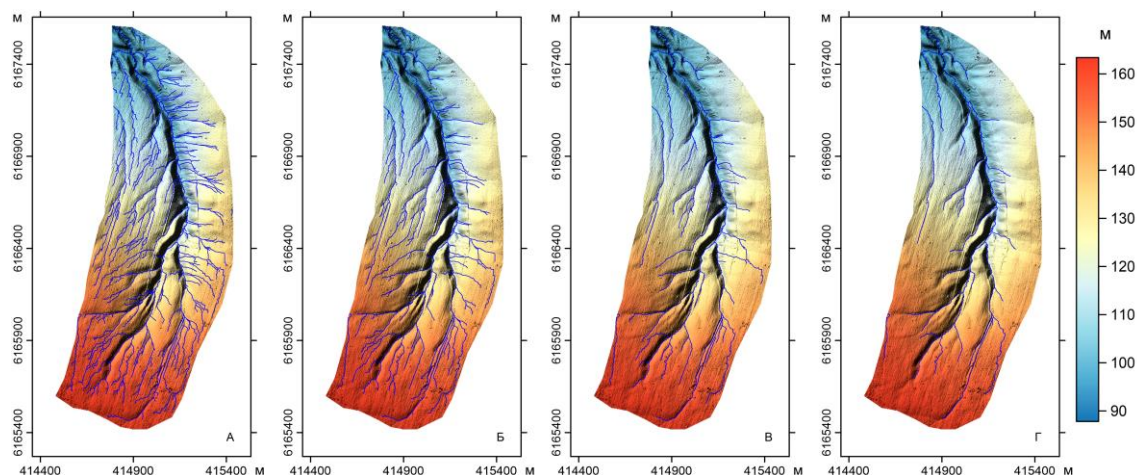


Рис. 4. Автоматическое картирование размывов различной глубины, полученных с ЦМР с БПЛА для Участка 1. А – более 0.05 м, Б – более 0.1 м, В – более 0.25 м, Г – более 0.5 м

Fig. 4. Automatic mapping of rill erosion of various depths obtained from the UAV DEM for Key Site 1. А – more than 0.05 m, Б – more than 0.1 m, В – more than 0.25 m, Г – more than 0.5 m

Проведенные работы на Участке 1 позволили оценить изменения ручейковой сети на всем водосборе. Так, суммарная длина размывов в 2017 г. составляла 51611.6 м при средней длине 82.8 м, тогда как в 2018 г. показатели уже составили 67359.6 м и 98.2 м, соответственно. Таким образом, прирост суммарной длины составил 30 %, прирост средней длины – 18.5 %. При этом, общее число размывов увеличилось на 10 %; на 30 % увеличилась их средняя плотность – с 0.03 м/м<sup>2</sup> до 0.04 м/м<sup>2</sup>. Анализ рисунка размывов показывает, что расположение русел временной гидрографической сети в мельчайших формах в целом постоянно и обуславливается самим рельефом, а также интенсивностью осадков. При этом суммарный слой осадков влияет на разветвленность сети и общую длину временной гидросети. Это свидетельствует о развитии микроручейковой и промоинной сети, несмотря на активное использование склонов малого водосбора в сельскохозяйственной деятельности (рис. 5А). Это подтверждается данными исследований, проведенных другими исследователями: аналогичная ситуация наблюдается на пашнях Оренбургской области (бассейн р. Самары), где плановый анализ космических снимков Landsat разных годов показал 32 % прирост суммарной длины пояса струйчатой эрозии и 32 % прирост плотности размывов [Ермолаев и др., 2017].

Беспилотные летательные аппараты позволяют максимально полно оценить все эрозионно-аккумулятивные процессы, протекающие на склонах изучаемых водосборов [Mancini et al., 2013; Eltner, Schneider, 2015]. Годовой смыв на выбранном водосборе участка в Республике Татарстан составил 6.3 мм, слой аккумуляции за год составил 4.4 мм (табл. 1), что согласуется с полученными другими учеными ранее на этом же водосборе полевыми данными [Шарифуллин и др., 2018], а также в целом согласуется с модельными значениями, полученными по уравнению USLE, дополненному НИЛ Эрозии почвы и русловых процессов МГУ на эту территорию [Golosov et al., 2018]. Однако, в отличие от модельных расчетов эрозии, результаты, полученные с БПЛА позволяют оценить фактическое значение эрозии почвы на обширных территориях, а также картировать произошедшие изменения (рис. 5Б).

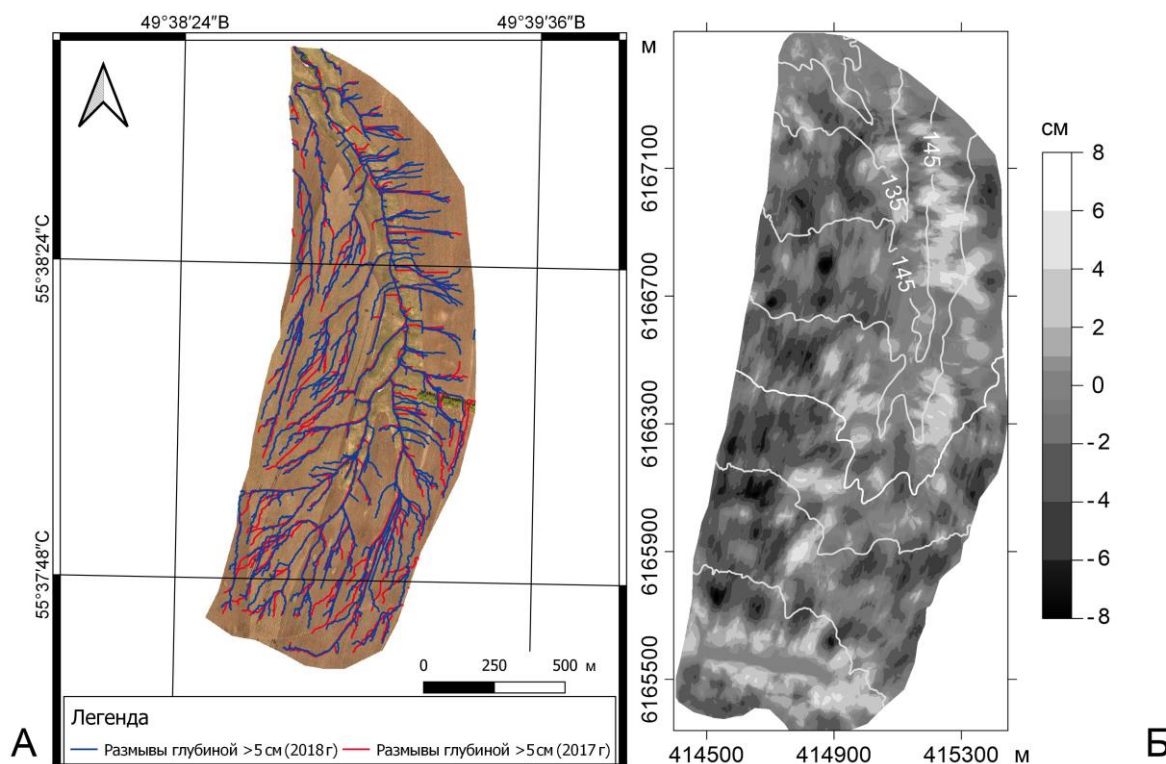


Рис. 5. Изменение плановой структуры речевой сети (А) и карта почвенной эрозии (Б) на примере малого водосбора участка в Республике Татарстан, полученные по результатам разновременной съемки с БПЛА  
 Fig. 5. Changes in the planned structure of the streamline network (A) and soil erosion map (B) on the example of a small catchment in the Republic of Tatarstan, obtained from the results of different-time surveys with UAVs

В целом, анализ карты разности позволяет оценить области преобладающей эрозии и аккумуляции: отложение смытого материала преимущественно происходит в ложбинах, а также на напаханных участках склона возле бровки балки.

Таблица 1  
Table 1

Результаты оценки почвенной эрозии на малом водосборе в Республике Татарстан за 2017–2018 гг.  
 The results of the assessment of soil erosion on a small catchment in the Republic of Tatarstan for 2017–2018.

S, м <sup>2</sup>	V <sub>+</sub>	V <sub>-</sub>	V <sub>+</sub> -V <sub>-</sub>	E, м <sup>3</sup> /га	i <sub>+</sub>	i <sub>-</sub>	Δi
	м <sup>3</sup>				мм		
1592115.16	7039.31	10132.06	-3092.75	-19.43	4.42	6.36	-1.94

Примечание. Здесь и далее: S – измеренная площадь участка; V<sub>+</sub> – объем аккумуляции; V<sub>-</sub> – объем смыва; i<sub>+</sub> – слой аккумуляции; i<sub>-</sub> – слой эрозии; Δi – преобладающий процесс (эрозия – аккумуляция); E – объем смыва – аккумуляции. Знак “+” – аккумуляция; “-” эрозия.

Для участка, расположенного в Ставропольском крае, слой смыва составил 7.82 мм, слой аккумуляции – 6.78 мм (табл. 2). Здесь, в целом, эрозии протекает по левому склону малого водосбора, имеющего большие (более 5 %) уклоны, а области аккумуляции на более пологом правом склоне. Так же наблюдается переотложение материала в имеющейся на правом склоне ложбине (рис. 6).

Таблица 2  
Table 2

Результаты оценки почвенной эрозии на малом водосборе в Ставропольском крае за 2017–2018 гг.

The results of the assessment of soil erosion on a small catchment area  
in the Stavropol Krai for 2017–2018

$S, \text{ м}^2$	$V_+$	$V_-$	$V_+ - V_-$	$E, \text{ м}^3/\text{га}$	$i_+$	$i_-$	$\Delta i$
	$\text{м}^3$				$\text{мм}$		
243000.85	1648.61	1900.83	-252.22	-10.38	6.78	7.82	-1.04

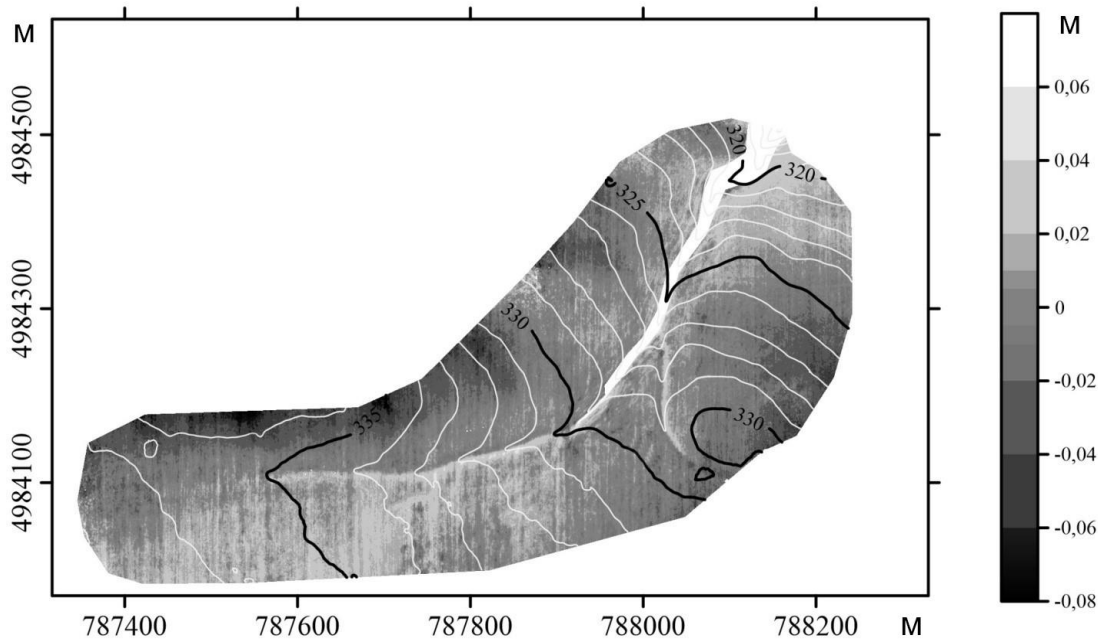


Рис. 6. Карта почвенной эрозии за период съемок с БПЛА на малом водосборе в Ставропольском крае  
Fig. 6. Map of soil erosion over the survey period using UAV on a small catchment in the Stavropol Krai

### Выводы

Беспилотные летательные аппараты, обладая компактными габаритами и сравнительно низкой стоимостью, позволяют создавать высокоточные цифровые модели рельефа и местности [Pineux et al., 2017] для территории водосборов первого порядка площадью до 5 км<sup>2</sup> за сутки полевых работ. При этом, при организации высокоточной привязки, проведение повторных наблюдений позволяет проводить оценку изменений, произошедших на объекте исследования.

В ходе проведенных работ были получены высокоточные разновременные цифровые модели рельефа, количественные и качественные данные о смыве и аккумуляции на выбранных водосборах, оценены плановые изменения в струйчатом звене. Результаты, в целом, согласуются с исследованиями, проведенными на аналогичных территориях другими исследователями и дополняют их. Для малого водосбора в Республике Татарстан вынос почвенного материала составил 19.43 м<sup>3</sup>/га (средний слой смыва – 1.94 мм), для участка в Ставропольском крае – 10.38 м<sup>3</sup>/га (средний слой смыва – 1.04 мм). Анализ планового изменения сети размывов показал 30 % прирост суммарной длины и густоты размывов.

В отличие от классических полевых методов оценки эрозии, которые дают обобщенную информацию о слое смыва или, как в случае с методом датирования отложений в днищах балок, опосредованно оценивают интенсивность эрозии по слою аккумуляции [Walling et al., 2003]. Использование предложенного подхода, в котором

рассчитываются изменения всей поверхности относительно исходной, позволяет оценить объемы перемещенного материала внутри территории исследования, а также оценить объем вынесенного материала. Однако, помимо очевидных преимуществ, существуют некоторые недостатки, к которым относятся чувствительность результатов съемки к оптике камеры [Arfaoui, 2017] и необходимость проведения процедуры геодезического обоснования на местности [Agüera-Vega et al., 2017], что, порой, затруднительно.

### Благодарности

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-50004.*

### Список литературы

#### References

1. Булыгин С.Ю., Ачасов А.Б., Лисецкий Ф.Н. 2014. Использование интегрального анализа данных дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа при картографировании почвенного покрова Черноземной зоны. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные Науки, 10 (181): 125–132.

Bulygin S.Yu., Achasov A.B., Lisetsky F.N. 2014. The use of an integral analysis of remote sensing data and digital elevation models in mapping the soil cover of the Chernozem zone. Scientific Reports of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences, 10 (181): 125–132. (in Russian)

2. Гафуров А.М. 2017. Возможности использования беспилотного летательного аппарата для оценки почвенной и овражной эрозии. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 159 (4): 654–667.

Gafurov A.M. 2017. The possibility of using an unmanned aerial vehicle to assess soil and gully erosion. Scientific notes of the Kazan University. Series of Natural Sciences, 159 (4): 654–667. (in Russian)

3. Голосов В.Н., Ермолаев О.П. 2019. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине. Казань, АН РТ, 372.

Golosov V.N., Yermolaev O.P. 2019. Spatio-temporal patterns of development of modern processes of natural anthropogenic erosion on the Russian Plain. Kazan, TAS, 372. (in Russian)

4. Егоров И.Е. 2009. Полевые методы изучения почвенной эрозии. Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле», 1 (6): 157–170.

Yegorov I.E. 2009. Field methods for studying soil erosion. Bulletin of Udmurt University. Series “Biology. Earth Sciences”, 1 (6): 157–170. (in Russian)

5. Ермолаев О.П., Гафуров А.М., Усманов Б.М. 2018. Оценка интенсивности и динамики эрозии методом наземного лазерного сканирования. Почвоведение, 7: 893–906.

Ermolaev O.P., Gafurov A.M., Usmanov B.M. 2018. Evaluation of the intensity and dynamics of erosion using ground-based laser scanning. Soil Science, 7: 893–906. (in Russian)

6. Ермолаев О.П., Медведева Р.А., Платончева Е.В. 2017. Методические подходы к мониторингу процессов эрозии на сельскохозяйственных землях Европейской части России с помощью материалов космических съемок. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 159 (4): 668–680.

Ermolaev O.P., Medvedeva R.A., Platoncheva E.V. 2017. Methodical approaches to monitoring erosion processes on agricultural lands of the European part of Russia using satellite imagery materials. Scientific notes of the Kazan University. Natural Sciences Series, 159 (4): 668–680. (in Russian)

7. Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. 2018. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 160 (3): 514–530.

Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M. 2018. Digital elevation models and their use in calculating the rate of soil erosion on arable land. Scientific notes of the Kazan University. Series of Natural Sciences, 160 (3): 514–530. (in Russian)





8. Спесивый О.В., Лисецкий Ф.Н. 2014. Оценка интенсивности и нормирование эрозионных потерь почвы в Центрально-Черноземном районе на основе бассейнового подхода. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные Науки, 10 (181): 125–132.

Spesiviy O.V., Lisetsky F.N. 2014. Estimation of intensity and rationing of erosion losses of soil in the Central Black Earth region based on the basin approach. Scientific Reports of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences, 10 (181): 125–132. (in Russian)

9. Шарифуллин А.Г., Гусаров А.В., Голосов В.Н. 2018. Современный тренд эрозионно-аккумулятивных процессов в малом распаханном водосборе, Республика Татарстан. Геоморфология, 3: 93–108.

Sharifullin A.G., Gusarov A.V., Golosov V.N. 2018. The current trend of erosion-accumulation processes in a small plowed spillway, the Republic of Tatarstan. Geomorphology, 3: 93–108. (in Russian)

10. Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P. 2017. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. Measurement, 98: 221–227.

11. Arfaoui A. 2017. Unmanned Aerial Vehicle: Review of Onboard Sensors, Application Fields, Open Problems and Research Issues. International Journal of Image Processing, 11 (1): 12–24.

12. Eltner A., Schneider D. 2015. Analysis of Different Methods for 3D Reconstruction of Natural Surfaces from Parallel-Axes UAV Images. The Photogrammetric Record, 30 (151): 279–299.

13. Gafurov A.M. 2018. Small catchments DEM creation using Unmanned Aerial Vehicles. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 107 (1): 012005.

14. Golosov V., Koiter A., Ivanov M., Maltsev K., Gusarov A., Sharifullin A., Radchenko I. 2018. Assessment of soil erosion rate trends in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years. Journal of Soils and Sediments, 18 (12): 3388–3403.

15. James M., Robson S., D'Oleire-Oltmanns S., Niethammer U. 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. Geomorphology, 280: 51–66.

16. Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G. 2013. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. Remote Sensing, 5 (12): 6880–6898.

17. Neugirg F., Stark M., Kaiser A., Vlacilova M., Della Seta M., Vergari F., Schmidt J., Becht M., Haas F. 2016. Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys. Geomorphology, 269: 8–22.

18. Pineux N., Lisein J., Swerts G., Bielders C.L., Lejeune P., Colinet G., Degré A. 2017. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? Geomorphology, 280: 122–136.

19. Takasu T., Yasuda A. 2009. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. International Symposium on GPS/GNSS, 4–6.

20. Walling D., He Q., Whelan P.A. 2003. Using 137Cs measurements to validate the application of the AGNPS and ANSWERS erosion and sediment yield models in two small Devon catchments. Soil and Tillage Research, 69 (1–2): 27–43.

#### Ссылка для цитирования статьи

#### Reference to article

Гафуров А.М. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки почвенной эрозии // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43, №2. С. 182–190. doi: 10.18413/2075-4671-2019-43-2-182-190

Gafurov A.M. Using Unmanned Aerial Vehicles for Evaluation of Soil Erosion // Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series. 2019. V. 43, №2. P. 182–190. doi: 10.18413/2075-4671-2019-43-2-183-190