

А. В. Рожнов^{1✉}, В. А. Данилов¹

Обзор применения беспилотных воздушных судов для мониторинга эрозии почв

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: roznovanton00@gmail.ru

Аннотация. Эрозия почв остается одной из наиболее серьезных проблем современного землепользования, приводя к необратимой деградации плодородного слоя и снижению продуктивности сельскохозяйственных угодий. Традиционные методы мониторинга эрозионных процессов, основанные на полевых наблюдениях и стационарных исследованиях, не обеспечивают необходимой оперативности и пространственного охвата. В последнее десятилетие активно развиваются технологии дистанционного зондирования с использованием беспилотных воздушных судов (БВС), которые в сочетании с геодезическими методами открывают новые возможности для количественной оценки и картографирования эрозии. Цель данной обзорной статьи – систематизация современных подходов к применению БВС для мониторинга эрозии почв, анализ их преимуществ и ограничений, а также определение перспективных направлений развития. В работе рассмотрены основные типы беспилотных платформ и сенсоров, используемых для решения задач природоресурсного мониторинга. Детально проанализированы методические подходы к фотограмметрической обработке данных и построению цифровых моделей рельефа (ЦМР) высокого разрешения. Особое внимание уделено методам количественной оценки эрозионно-аккумулятивных процессов на основе разновременных ЦМР. Показано, что применение БВС позволяет получать данные с сантиметровой точностью, сопоставимой с наземными методами, но при значительно большей производительности. В статье также рассмотрены проблемы, связанные с влиянием растительного покрова на точность измерений, и пути их решения с использованием мультиспектральной съемки и алгоритмов машинного обучения. Сделан вывод о том, что интеграция БВС-технологий с геодезическим обеспечением и методами геоинформационного анализа представляет собой наиболее перспективное направление развития систем мониторинга земель, подверженных эрозии.

Ключевые слова: эрозия почв, беспилотные воздушные суда, геодезический мониторинг

A. V. Rozhnov^{1✉}, V. A. Danilov¹

Review of the Application of Unmanned Aerial Vehicles for Soil Erosion Monitoring

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: roznovanton00@gmail.ru

Abstract. Soil erosion remains one of the most serious problems of modern land use, leading to irreversible degradation of the fertile layer and reducing the productivity of agricultural lands. Traditional methods of monitoring erosion processes, based on field observations and stationary studies, do not provide the necessary efficiency and spatial coverage. In the last decade, remote sensing technologies using unmanned aerial vehicles (UAVs) have been actively developing, which, in

combination with geodetic methods, open up new opportunities for quantitative assessment and mapping of erosion. The purpose of this review article is to systematize modern approaches to the use of UAVs for soil erosion monitoring, analyze their advantages and limitations, and identify promising areas for development. The paper considers the main types of unmanned platforms and sensors used for solving natural resource monitoring problems. Methodological approaches to photogrammetric data processing and construction of high-resolution digital elevation models (DEMs) are analyzed in detail. Particular attention is paid to methods for quantitative assessment of erosion-accumulation processes based on multi-temporal DEMs. It is shown that the use of UAVs allows obtaining data with centimeter accuracy, comparable to ground-based methods, but with significantly higher productivity. The article also discusses problems associated with the influence of vegetation cover on measurement accuracy and ways to solve them using multispectral imaging and machine learning algorithms. It is concluded that the integration of UAV technologies with geodetic support and geoinformation analysis methods represents the most promising direction for the development of monitoring systems for lands subject to erosion.

Keywords: soil erosion, unmanned aerial vehicles, geodetic monitoring

Введение

Эрозия почв представляет собой глобальную экологическую и экономическую проблему. Ежегодные потери плодородного слоя составляет порядка 24–26 млрд тонн, что приводит к существенному недобору урожая и повышению затрат на восстановление данных земель. В Российской Федерации более 50 млн га пашни являются эрозионно опасными, а на 17 млн га процесс смыва уже принял активные формы [1].

Традиционными методами изучения эрозии считаются стационарные наблюдения на стоковых площадках, шпильный метод, почвенно-морфологические описания, наземные геодезические съемки [3]. Однако эти подходы обладают недостатками – они либо дают информацию только в дискретных точках, либо требуют значительных трудозатрат.

Развитие технологий беспилотных воздушных судов (БВС) и методов фотограмметрии позволило получать сверх детальные снимки и строить цифровые модели рельефа (ЦМР) с сантиметровым разрешением. В следствии чего интеграция БВС с геодезическим оборудованием обеспечивает пространственную привязку данных с точностью, достаточной для количественного анализа изменений земной поверхности.

Методы и материалы

Для подготовки обзора были проанализированы научные публикации за период 2015–2025 гг., включая монографии, статьи в рецензируемых журналах и материалы конференций по тематике дистанционного зондирования, фотограмметрии и почвоведения.

Для задач мониторинга эрозии используются мультироторные (квадрокоптеры, гексакоптеры) и самолетные беспилотные платформы. Мультироторные платформы подходят для съемки небольших участков (до 100 га) со сложным рельефом. Беспилотные самолеты эффективны для мониторинга крупных территорий.

Применяются следующие типы сенсоров:

- цифровые камеры видимого диапазона (RGB) – для получения ортофото-планов и построения ЦМР [3];
- мультиспектральные камеры – для расчета вегетационных индексов и оценки состояния растительности;
- тепловизионные камеры – для выявления зон с различной влажностью почвы;
- легкие лазерные сканеры (LiDAR) – для получения информации о рельефе под пологом растительности.

Планирование полетного задания включает определение высоты полета и перекрытий снимков. Для построения детальных ЦМР рекомендуется пространственное разрешение 3–5 см/пиксель, продольное и поперечное перекрытие – не менее 80 и 70 % соответственно.

Геодезическое обеспечение в свою очередь является критически важным для получения точных данных. Используются два подхода:

- прямое геопозиционирование с использованием бортового GNSS-приемника в режиме RTK или PPK.
- геодезическая привязка по наземным опознакам, координаты которых определяются высокоточными GNSS-методами [2].

Сочетание прямого геопозиционирования с контрольными точками позволяет достичь среднеквадратической ошибки по высоте 2–4 см.

После чего выполняется обработка данных с использованием алгоритмов Structure from Motion (SfM) и включает:

- выявление и сопоставление характерных точек на снимках;
- оценку параметров ориентирования камер;
- построение плотного облака точек;
- классификацию и фильтрацию для выделения класса «земля»;
- интерполяцию и построение ЦМР [6].

Основной метод – анализ разновременных цифровых моделей рельефа (DoD – DEM of Difference) рассчитываются по формуле:

$$\Delta h = h_{t2} - h_{t1} \quad (1)$$

где Δh – изменение высоты; h_{t1} , h_{t2} – высоты в начальный и конечный моменты времени.

Объем перемещенного материала рассчитывается по формуле:

$$V = \iint_S \Delta h(x, y) dS \quad (2)$$

где V – объем перемещенного материала (обычно в м^3); S – площадь исследуемого участка (в м^2), на которой производится интегрирование; dS – элементарная площадка (дифференциал площади), соответствующая одному пикселю растра ЦМР; $\Delta h(x, y)$ – функция изменения высоты в каждой точке с коорди-

натами (x, y), определяемая как разность высот между двумя разновременными съемками

Для отделения значимых изменений от ошибок измерений используется порог минимального уровня обнаружения [5].

Результаты

Анализ научных публикаций позволил систематизировать количественные показатели эффективности применения БВС для мониторинга эрозии почв. В табл. 1 представлены сравнительные характеристики различных методов съемки.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов мониторинга эрозии почв

Параметр	Традиционные методы	Наземное лазерное сканирование	БВС-съемка
Точность построения ЦМР по высоте, см	1–3 (в точках)	1–2	2–5
Производительность, га/день	0,5–2	5–10	50–200
Пространственное разрешение, см/пиксель	точечные данные	5–20	1–10
Относительная стоимость работ на 100 га	100 %	60–80 %	20–40 %

Установлено, что применение БВС позволяет фиксировать изменения высот на уровне 3–5 см, что соответствует средней интенсивности смыва за один сезон. При использовании геодезической привязки по опознакам ошибка снижается до 2–3 см [3].

Анализ разновременных ЦМР показывает четкую привязку эрозионно-аккумулятивных процессов к элементам микрорельефа: смыв приурочен к приводраздельным частям, аккумуляция – к днищам ложбин [7]. Объем смыва на склоновых участках достигает 100–150 м³/га в год, аккумуляции – 50–80 м³/га [7].

Применение мультиспектральных камер позволяет оценивать состояние растительности: на участках с NDVI < 0,3 эрозия развивается в 2–3 раза интенсивнее, чем при NDVI > 0,5.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность БВС для мониторинга эрозии. Технология обеспечивает оптимальное сочетание точности

(2–5 см) и производительности (до 200 га/день), значительно превосходя традиционные методы по скорости и стоимости работ [5].

Главное преимущество – возможность сплошного покрытия территории и расчета объемных показателей эрозии методом разностных ЦМР, что позволяет не только локализовать зоны смыва, но и количественно оценить ущерб [7].

Основные ограничения связаны с влиянием растительного покрова (ошибка возрастает до 10–15 см при проективном покрытии >60 %) и сложностями при съемке однородных поверхностей [6, 10]. Перспективным направлением является комбинирование фотограмметрии с легкими LiDAR-сенсорами и калибровка эрозионных моделей по данным БВС [8, 9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2023 году». – М.: Росреестр, 2024. – 198 с.
2. Литвин Л. Ф., Голосов В. Н., Добровольская Н. Г. Эрозия почв в России: современное состояние и проблемы // Почвоведение. – 2018. – № 1. – С. 94–104.
3. Королев В. А., Нефедов А. В. Фотограмметрическая обработка данных аэрофотосъемки с БПЛА для построения цифровых моделей рельефа // Геопрофи. – 2022. – № 5. – С. 12–17.
4. Красильников П. В., Арнольд Р. В. Почвенные ресурсы мира и продовольственная безопасность // Вестник Российской академии наук. – 2020. – Т. 90, № 4. – С. 322–330.
5. Жиденко А. А., Сидоренко М. В., Петров Н. Н. Применение беспилотных летательных аппаратов для оценки водной эрозии на склоновых землях Центрального Черноземья // Агрохимический вестник. – 2023. – № 2. – С. 23–28.
6. Голосов В. Н., Литвин Л. Ф. Эрозионно-аккумулятивные процессы и проблема переноса наносов в речных бассейнах // География и природные ресурсы. – 2020. – № 3. – С. 23–31.
7. Кузнецов М. С., Демидов В. В. Эрозия почв лесостепной зоны Центральной России: моделирование и экспериментальные исследования. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2019. – 280 с.

© А. В. Рожнов, В. А. Данилов, 2026