

## НОВЕЙШИЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ

**З.А. Баходиров**

Институт почвоведения и агрохимических исследований, с.н.с,д.ф.б.н(PhD)

**А.Р. Маматкулов**

Институт почвоведения и агрохимических исследований, докторант

**Р.Ш.Нурматов**

Институт почвоведения и агрохимических исследований, Главный специалист отдела международных отношений

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7086755>

***Аннотация.** В статье излагается обзор на существующих методов мониторинга ветровой эрозии почв и краткая характеристика каждого метода, преимущества и недостатки, а также условия и ограничения их применения.*

***Ключевые слова:** дефляция почв, спутниковый мониторинг, деградация почв, методы исследования почв.*

### THE LATEST METHODS FOR MONITORING WIND EROSION OF SOILS

***Abstract.** The article provides an overview of the existing methods for monitoring wind erosion of soils and a brief description of each method, advantages and disadvantages, as well as the conditions and limitations of their application.*

***Keywords:** soil deflation, satellite monitoring, soil degradation, soil research methods.*

### ВВЕДЕНИЕ

Почва - важнейший регулятор биогенного углерода на Земле. Эрозия приводит к утрате углерода почвой, во-первых, в результате механического удаления на эродируемой почве, во-вторых, а ходе ускоренной минерализации, вызванной эрозией, как в эродированной почве, так и в наносной[1].

Изучение эрозии почв, её причин и следствий, а также мероприятий по её ликвидации имеет большое народнохозяйственное и научное значение. Эрозия почв – это постоянные, нередко разрушительные процессы, которые существенно усиливаются в результате деятельности человека и приносят большой ущерб народному хозяйству[1].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эрозия приводит к потере углерода почвой, во-первых, в результате механического удаления из эродируемой почвы, во вторых, в ходе ускоренной минерализации, вызванной эрозией, как в эродированной почве, так и в наносной. Процессы, приводящие к этому, требуют углублённого изучения, но уже теперь не подлежит сомнению, что одним из немногих возможных способов изъятия избытка углерода из атмосферы является запасание его в виде специфического органического вещества почвы[1].

Ветровая эрозия может нанести непоправимый вред, как за длительное время, так и всего за несколько часов. Пыльные (черные) бури довольно быстро уничтожают верхний слой почвы, унося его порой за многие сотни километров. Порой такая пыль, оседая, засыпает целые водоёмы[2].

В последние десятилетия появились новые технические возможности для исследования ветровой эрозии. Так, при регистрации и отслеживании пыли, поднятой в воздух во время обработки почвы или в результате эрозии, стали применять лидары, солнечные фотометры, счетчики фотонов; при изучении переноса почвы ветром в

приземном слое – пьезо- и мембранные датчики с высокой собственной частотой измерения, изокинетические пылеуловители, при физическом моделировании ветровой эрозии – усовершенствованные полевые и лабораторные аэродинамические установки[2].

Одновременно с развитием экспериментальных методов изучения ветровой эрозии совершенствовались системы дистанционного зондирования на основе аэрокосмической съёмки, что привело к накоплению огромного экспериментального материала, позволяющего анализировать явление ветровой эрозии почвы во всей его полноте, от стадии выдувания до стадии аккумуляции[3].

**Традиционные методы мониторинга ветровой эрозии почв.** Начало научному подходу к изучению ветровой эрозии почв и разработке противоэрозионных мероприятий положено трудами классиков почвоведения: В.В. Докучаева, П.А. Костычева, Н.М. Сибирцева, В.Р. Вильямса, – их сотрудников и последователей, которые уделяли внимание ветровой эрозии в первую очередь в качестве фактора образования и преобразования почв, а также трудами великих исследователей Центральной Азии: Н.М. Пржевальского, Н.Ф. Дубровина, В.И. Роборовского, П.К. Козлова, Г.Е. Грум-Гржимайло, М.В. Певцова, Г.Н. Потанина, В.А. Обручева, которые исследовали физические, почвоведческие, геологические и географические аспекты ветровой эрозии[2].

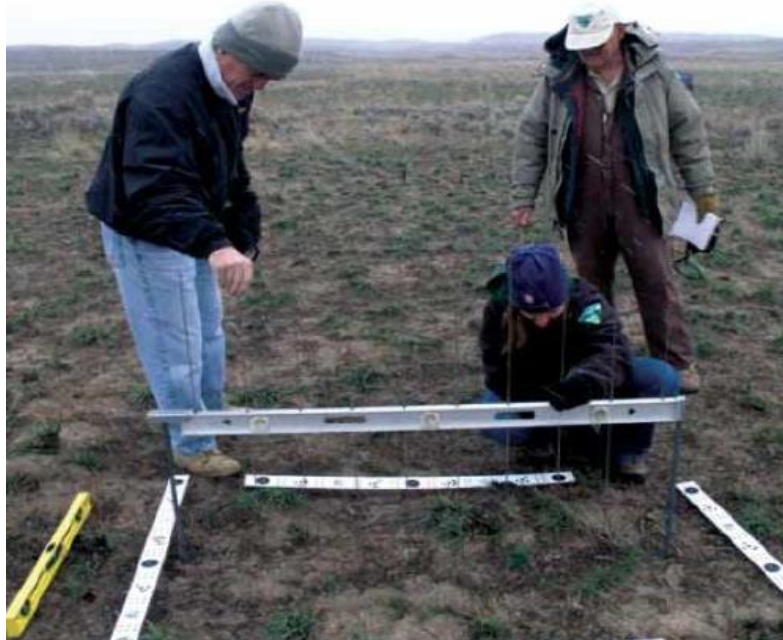
**Визуальная оценка.** Ниже приводится краткая характеристика основных традиционных методов оценки и мониторинга ветровой эрозии.

В 1967 г. в США впервые была разработана методика оценки эрозионного состояния земель площадью 160 млн акров в течение последующих 5–10 лет. Важно отметить, что на тот момент не было еще накоплено количественных показателей, позволяющих оценить эрозионную активность в конкретный момент. С этой целью была разработана Классификация эрозионного состояния (The Erosion Condition Classification System), основанная на свойствах поверхности почвы, которые исследователь может оценить в полевых условиях и которые можно представить в цифровом выражении и в дальнейшем использовать в качестве основы для выделения пяти эрозионных классов[2].

Основные преимущества метода визуальной оценки: 1) это относительно быстрый процесс; 2) наблюдения можно сделать при полевом обследовании; 3) могут быть выявлены потенциальные эрозионные проблемы, требующие осуществления мониторинга в каком-то конкретном месте (проблемные локации). К основным недостаткам использования метода визуальной оценки относятся: 1) субъективность, основанная на мнении и оценке эксперта; 2) количественные оценки (баллы) могут различаться у разных экспертов без соответствующей подготовки; 3) оценки могут варьировать в зависимости от времени наблюдения относительно момента, когда разыгралась буря; 4) экологический район должен быть известен, для него требуется соответствующий технический справочник с референсными значениями и методикой; 5) эта методика может быть выполнена только очень опытным, грамотным и знающим человеком[4].

**Эрозионный мост (метод шпилек).** Эрозионный мост – это простой в эксплуатации, функциональный, легкий и недорогой инструмент для оценки ветровой эрозии в полевых условиях. Он состоит из алюминиевой перекладки (или строительного уровня) длиной в 4 фута (приблизительно 1.2 м), который устанавливается на опорные стойки, представляющие собой своего рода реперы для микропрофилирования поверхности почвы под ними. Эта конструкция остаётся в поле на весь период

мониторинга (Shakesby, 1993; Ypsilantis, 2011). Расстояние от уровня до поверхности почвы измеряется в 10 фиксированных точках, расположенных равномерно по всей длине каждого уровня, с помощью специальных шпилей, которые опускаются до уровня поверхности земли. Эти измерения используются для расчёта средних изменений уровня поверхности почвы. (рис. 1).



**Рис. 1.** Эрозионный мост, используемый для количественной оценки интенсивности ветровой эрозии на выгоревшей территории, через 2 года после пожара, штат Айдахо (США) (Ypsilantis, 2011).

Преимущества эрозионного моста состоят в том, что это недорогой, быстрый, беспристрастный метод оценки эрозионной активности. Однако учетные площадки и их ориентацию необходимо выбирать случайным образом, чтобы избежать систематической ошибки.

К недостаткам можно отнести то, что уровень может быть смещен или сдвинут людьми, техникой или животными, а также в результате вспучивания грунта при промерзании, что делает измерения бессмысленными. Кроме того, шпильки довольно тонкие и в некоторой степени гибкие, поэтому если при измерении они не попадают в одну и ту же точку, то могут быть получены неточные значения [5]. Также сама исследуемая территория и количество учетных площадок довольно малы. Этим методом практически невозможно получить данные об эродированности почв на больших территориях.

**Фотограмметрический метод (наземная фотограмметрия).** Ближняя фотограмметрия – отличный метод получения детальной информации об эрозии на площадках размером от 1 м<sup>2</sup> до всего склона. Программное обеспечение позволяет создавать цифровую модель земной поверхности с густотой сетки в 1–2 мм и обнаруживать изменения уровня поверхности почвы с субмиллиметровой точностью на площадках меньшего размера. Этот метод особенно эффективен для мониторинга эрозии на участках свободных от растительности, таких как дороги, строительные площадки и дороги, накатанные в диких местах внедорожной техникой [6].

Наземная (ближняя) фотограмметрия представляет собой компиляцию фотографических материалов с их последующей обработкой и подразумевает расстояние между камерой и объектом менее 300 м.

В дальнейшем с помощью компьютера и специального программного обеспечения (например, PhotoModeler® или 3DM Analyst software (ADAM Technology, Australia)) создается цифровая модель поверхности (Matthews, 2008; Ypsilantis et al., 2011). С помощью отснятых фотографий для исследуемой площади программа создает мозаику, основанную на сложном автоматическом распознавании маркированных точек и схожих параметрах поверхности земли на разных фотографиях. Первичная обработка фотографий может быть выполнена в полевых условиях за несколько минут. Затем трехмерные цифровые модели поверхности анализируются в ArcGIS с использованием ArcMap и ArcScene. Чтобы выявить изменения уровня поверхности почвы первоначально смоделированная сетка поверхности сравнивается с сетками, полученными при последующих исследованиях.

**Использование ловителей пыли.** В упрощенном виде процессы ветровой эрозии представляют собой движение почвенной массы под действием воздушных потоков. Для того чтобы выявить причины движения этих масс, необходимо уметь измерять это движение – измерять поток твердой фазы (т. е. почвы) в процессе эрозии (Кузнецов, Глазунов, 2020). В настоящее время для этой цели используют всевозможные пыле- и пескоуловители, фильтры, пьезоэлектрические устройства для регистрации перемещения почвенных частиц и т. п.

Главная трудность при измерении потока почвенной фазы при дефляции – большая толщина потока, несущего почвенные частички: сплошной пылевой фронт во время пыльных бурь часто имеет толщину несколько сотен метров. Однако основная масса почвы переносится в слое до 1 м, что существенно упрощает задачу и открывает возможности для измерения переноса почвы ветром с использованием простых и доступных методов.

Наиболее широко при изучении дефляционных процессов используют пыле- или пескоуловители, представляющие собой коробку в форме параллелепипеда, одна из граней которого служит приемным отверстием.

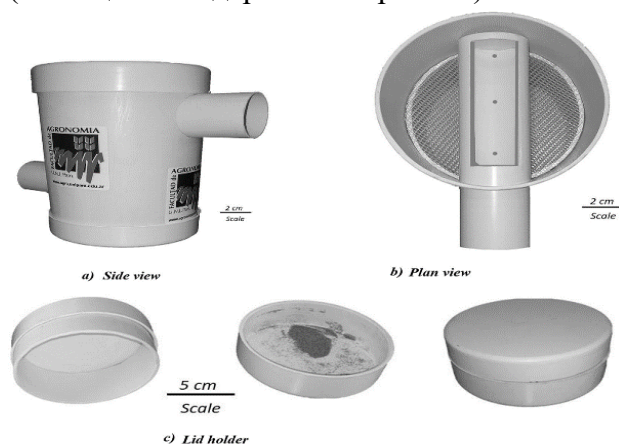
В качестве примера рассмотрим новый пробоотборник доктора Мендес Мариано Хавьера.

Коллектор пробоотборника был спроектирован таким образом, чтобы быть недорогим, простым в сборке и обращении, а также предотвращать загрязнение материала, собранного пробоотборником (падающие отложения).

Коллектор, именуемый в дальнейшем «Ловушка Мендеса (МТ)», имеет корпус из ПВХ-пластика с внешним диаметром 110 мм, внутренним диаметром 103 мм и длиной 160 мм[7] (рис. 1а и рис. 2).

На обоих концах корпуса коллектора имеются две крышки из ПВХ с внешним диаметром 116 мм и внутренним диаметром 110 мм. Две трубки по 36 мм в внутреннем диаметре и длиной 160 мм вставляются сбоку в корпус коллектора. Один из них вставлен на 50 мм ниже верхней части корпуса коллектора (верхняя трубка), а другой на 50 мм выше нижней части корпуса коллектора (нижняя трубка).

Собранный материал скапливается в нижней пластиковой крышке. После ветровой эрозии или периода отбора проб нижняя пластиковая крышка заменяется чистой пластиковой крышкой (помещается в держатель крышки).



**Рис. 2.** Фотографии ловушки Мендеса (а и б) и держателя крышки (в)

Крышка с эродированным материалом помещается в держатель крышки для транспортировки в лабораторию, где образец взвешивается и хранится. Работа ловушки Мендеса Держатель крышки позволяет избежать разборки и замены коллектора, а также предотвращает загрязнение и потерю материала пробы во время транспортировки из поля в лабораторию. Это является сравнительным преимуществом по сравнению с другими коллекторами, поскольку с помощью одного набора коллекторов возможны непрерывные измерения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Моделирование ветровой эрозии.** Моделирование ветровой эрозии началось еще в начале 60-х годов для полуколичественной оценки потерь почвы. Моделирование ветровой эрозии было и остается преимущественно полуэмпирическим методом и модели актуальны только для конкретных площадок, где и проводятся исследования, универсальной достоверной модели не существует. Эмпирические модели являются наиболее простыми и основаны на наблюдениях / экспериментальных данных, т. е. они отражают факты и помогают прогнозировать, что произойдет в будущем. У таких моделей есть ограничения и недостатки, которые заключаются в отсутствии информации о пространственном распространении эрозии, однако при использовании ГИС-технологий эти недостатки можно преодолеть. Физические модели основываются на знаниях о фундаментальных эрозионных процессах и внедрении закона сохранения вещества и энергии. В теории необходимые параметры можно измерить, но на практике значительное количество параметров требует постоянной калибровки[8].

Механизм работы моделей зачастую сложен, так же как и подготовка входных данных, это, как правило, требует вложения средств и времени, поскольку они включают данные, ограниченные мнением и компетенцией эксперта, и набором результатов полевых исследований. Эти ограничения можно преодолеть, если использовать спутниковые данные в сочетании с ГИС, которые позволяют отслеживать эрозию в динамике, контролировать изменения эрозионных процессов во времени и пространстве, что является основой при оценке, контроле и прогнозировании эрозии.



С развитием компьютерных технологий начали строить ГИС-модели развития эрозионных процессов. Например, уравнение ветровой эрозии (WEQ) широко используется для оценки ветровой эрозии в Монголии (Mandakh et al., 2016) в среде ArcGIS, модель включает метеорологические данные, значения стандартизованных индексов различий растительного покрова (NDVI), полученных с помощью MODIS, цифровую модель рельефа и почвенную карту Монголии. В США проводились исследования по моделированию ветровой эрозии не только в полевом масштабе, но и на региональном уровне. Для этого использовалось модифицированное уравнение – Revised Wind Erosion Equation (RWEQ), ГИС и изображения Landsat (Zobeck et al., 2000). ГИС-модели процессов ветровой эрозии разработаны в рамках проектов WEELS, Wind Erosion Prediction System (WEPS) и GIS-RWEQ (Borrelli et al., 2017), спонсируемых рядом европейских стран – European Soil Data Centre (ESDAC) [9].

С течением времени модели претерпевают изменения и совершенствуются. Например, для прогнозирования ветровой эрозии используют комбинированный способ – сочетание генетического алгоритма и искусственной нейронной сети (hybrid Genetic algorithm – Artificial neural network method GAANN method) (Kouchami-Sardoo et al., 2020).

Далее была разработана нейронная сеть, позволяющая прогнозировать эрозионные изменения в ответ на пространственную вариабельность выбранных факторов, перечисленных выше.

**Спутниковый мониторинг.** Данные дистанционного зондирования (аэро- и космические снимки) широко используют при картографировании и мониторинге эрозии почв.

Особенно активно в последнее время применяют спутниковые данные, которые позволяют изучать и картографировать эрозию почв на больших пространствах путем непосредственного дешифрирования ареалов эродированных почв (Vrieling et al., 2008), последствий эрозии и дают возможность оценивать и моделировать риск эрозии почв.

Использование спутниковых данных отличается меньшей вовлеченностью экспертного мнения, меньшими затратами труда и времени, эти данные могут служить основой как для эмпирических, так и для физических моделей при оценке степени эродированности.

В ряде работ показано, что спутниковые данные можно использовать для картирования ветровой эрозии, детектирования областей, затронутых ветровой эрозией и регистрирования времени, которое уходит на восстановление участков, затронутых ветровой эрозией. Так, например, Collado и другие (2002) применили подход динамического или мультивременного сравнения для картирования территорий в процессе опустынивания в Аргентине, используя изображения Landsat TM за разные сроки съемки. Для мониторинга процесса опустынивания в провинции San Luis, где в последние десятилетия наблюдаются признаки серьезной деградации ландшафта, использовался анализ цифровых изображений дистанционного зондирования.

Дистанционное зондирование используется при изучении эрозии в целях получения исходных данных для эрозионных моделей, для косвенной оценки почвенной эрозии путем анализа растительного покрова, а также для непосредственного определения эрозионных форм рельефа и стадий эрозии. Основной принцип идентификации эродированных и аккумулярованных почв основан на предположении, что спектральные

характеристики отражения аккумулярованных и незродированных “здоровых” почв отличаются. Эти различия объясняются изменениями химических и физических свойств верхнего слоя почвы, спровоцированных переносом почвенных частиц и их аккумуляцией[10].

Методы дистанционного зондирования, традиционно используемые для обнаружения эродированных земель, обычно включают визуальную интерпретацию изображений на основании интерпретации цвета почвы и его изменения, вызванного эрозионными процессами.

## **ОБСУЖДЕНИЕ**

В последние годы качество спутниковых данных и использование дистанционного зондирования, включая предварительную (первичную) компьютерную обработку изображений, и развитие методов автоматической классификации позволило анализировать большие территории с меньшими затратами времени, а также с количественной оценкой точности этих классификаций. Быстро внедряются методы классификации, основанные на попиксельном спектральном анализе. Однако их применение может быть проблематичным в тех случаях, когда наблюдается существенная спектральная вариабельность в пределах одного класса или комплексный эффект от различных поверхностей, особенно в условиях высокой неоднородности почвенного покрова.

Спутниковый мониторинг ветровой эрозии почв – это относительно экономичный, быстрый и беспристрастный способ получения информации о поверхности на больших территориях, в том числе и в труднодоступных местах. По сравнению с наземными методами для осуществления спутникового мониторинга требуется меньшее количество людей, кроме того, спутниковые изображения содержат большое количество дополнительных сведений. При использовании спутниковых изображений снимки одной и той же территории могут быть получены через определенные интервалы времени, таким образом позволяя отслеживать динамику изменений наблюдаемых процессов. Более того, цифровые изображения постоянно доступны для дополнительного анализа с применением различных техник и для оценки различных параметров и характеристик[11].

Недостаток состоит в том, что мультиспектральные данные представляют собой замещающие данные, т. е. они представлены в виде пространственных отношений и зависимостей или спектральных характеристик определенных свойств, а не в виде прямых измерений показателей эродированности почв. Следовательно, необходимо проводить проверку полученной информации на местности (верификацию, калибровку). Ограничивающим фактором также является низкое спектральное разрешение сенсоров.

## **ВЫВОДЫ**

Каждый из рассмотренных методов оценки и мониторинга ветровой эрозии имеет как преимущества, так и недостатки, поэтому при выборе метода необходимо учитывать условия проведения мониторинга, площадь рассматриваемой территории и масштаб проведения исследований, временные рамки, финансовые и трудовые ресурсы.

Метод визуальной оценки не является прямым измерением ветровой эрозии, он основывается на определении косвенных показателей, которые при комплексном рассмотрении специалиста позволяют отнести территорию к тому или иному эрозионному классу.

Эрозионный мост или метод шпилек представляет собой прямое измерение эрозионной активности, недорогой и быстрый (Ypsilantis, 2011), достаточно точный, если не было смещения шпилек, но трудоемкий; надежность результатов зависит от количества образцов. Применение возможно только на местном уровне (локально), метод эффективен и часто применяется на территориях после пожаров. Кроме того, метод неприемлем на сельхозугодьях, поскольку конструкции мостов создают препятствия для работы сельхозтехники, либо могут быть просто смещены, в этом случае результаты становятся недействительными [12].

Ближняя фотограмметрия также представляет собой прямое измерение, применение ограничивается локальным уровнем, не подходит для мониторинга обширных территорий. Метод очень точный, надежный и быстрый, однако для анализа данных требуется дорогостоящее программное обеспечение, а также точные предварительные настройки и калибровка камеры. К недостаткам – высокая стоимость и сложность оборудования для извлечения из этих фотографий требуемой информации.

Спутниковый мониторинг основывается на измерении косвенных параметров, применим как на локальном, так и на региональном и глобальном уровнях, быстрый и недорогой метод, достаточно надежный и точный. Метод спутникового мониторинга позволяет отслеживать состояние и тенденции развития эрозии, отражает подверженность земель эрозионной деградации.

Таким образом, наиболее актуальными, экономически оправданными и перспективными, особенно на больших территориях, являются методы дистанционного зондирования, позволяющие проводить мониторинг в различных масштабах, не только оценивать эрозионную активность, но и прогнозировать ее, таким образом обеспечивая заинтересованные стороны необходимой информацией для принятия верных, оперативных и своевременных хозяйственно-экономических решений, направленных как на борьбу с ветровой эрозией и устранение последствий, так и на организацию превентивных мер. Для повышения эффективности этих методов также необходимо создавать базы данных, расширять и накапливать почвенную информацию, которая позволяет верифицировать, уточнять, обрабатывать и калибровать полученные спутниковые данные.

## REFERENCES

1. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. “Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха”. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007 г. 240 с.
2. А.О Романовская, И.Ю.Савин “Современные методы мониторинга ветровой” 2020 г.110 с.
3. В.Гендугов, Г.Глазунов, “Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха” <https://books.google.co.uz/books>. 2022 г, 32 с.
4. Иванов А.Л., Кирюшин В.И., Молчанов Э.Н., Савин И.Ю., Столбовой В.С. “Анализ земельной реформы и агропромышленного производства за четверть века”, (доклад). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2016. 93 с.
5. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв. М.: Издательство МГУ, 2020. 387 с.
6. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М., 1993. 200 с.



7. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии (гл. ред. А.Л. Иванов). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2013. 756 с.
8. Семенов О.Е. Методика векторных расчетов ветрового переноса песка и солей во время песчано-солевых бурь. Агрометеорология. Л., 1988. С. 209–224.
9. Borrelli P., Lugato E., Montanarella L., Panagos P. A New Assessment of Soil Loss Due to Wind Erosion in European Agricultural Soils Using a Quantitative Spatially Distributed Modelling Approach // *Land Degradation & Development*. 2017. Vol. 28. P. 335–344. DOI: 10.1002/ldr.2588.
10. Chappell A., Webb N.P. Using albedo to reform wind erosion modelling, mapping and monitoring // *Aeolian Research*. 2016. Vol. 23. P. 63–78. DOI: 10.1016/j.aeolia.2016.09.006.
11. Clark R.D. Erosion condition classification system. Tech Note 346. Bureau of Land Management. Denver, Denver Service Center, 1980.