

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, изокINETические 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 перекладины (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 м² 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).

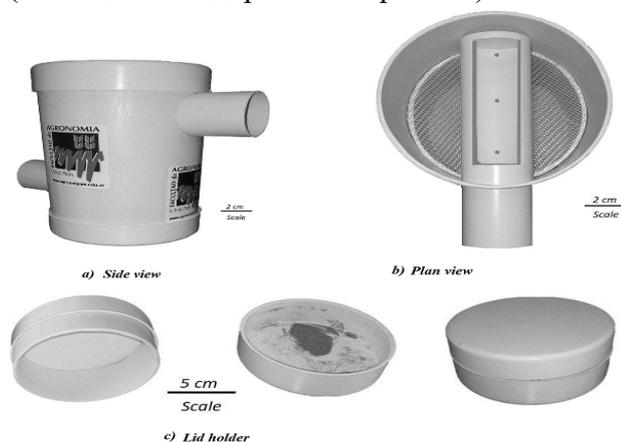


Рис. 2. Фотографии ловушки Мендеса (а и б) и держателя крышки (в)

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 мультитременного 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.