УДК: 631.4

ШИРОКО ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МИРЕ МОДЕЛИ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ

Маматкулов Аслиддин Рустамбек угли,
докторант III – курса,
e-mail: amamatqulov@tersu.uz

Институт почвоведения и агрохимических исследований

Аннотация. Ветровая эрозия представляет собой угрозу для многочисленных ланд-шафтов по всему миру, которая может усиливаться или подавляться прямыми и косвенными воздействиями. В последние годы были предприняты большие усилия по определению масштабов ветровой эрозии почвы в различных экологических условиях по всему миру. С появлением моделей ветровой эрозии лучшее понимание динамики и основных механизмов ветровой эрозии обеспечивает основу для оценки не только эрозии почвы, но и различных методов природоохранного управления с целью борьбы с ветровой эрозией почв.

Существуют различные модели ветровой эрозии различной степени сложности и конкретных возможностей, а также диапазон пространственных и временных масштабов применения. Из-за их неопределённости и ограничений их применимость к различным регионам и исследовательским вопросам все ещё обсуждается. В данной статье рассматривается несколько широко используемых моделей ветровой эрозии для сравнения основных концепций динамики ветровой эрозии и приводятся некоторые рекомендации относительно применимости моделей, ожидаемой достоверности и будущие направления исследований по моделированию.

Ключевые слова: почва, ветровая эрозия, модели ветровой эрозии, механизмы ветровой эрозии.

Аннотация: Шамол эрозияси бутун дунё бўйлаб кўплаб ландшафтларга ўзига хос хавф туғдиради. Бу тўғридан-тўғри ва билвосита таъсирлар билан кучайиши ёки ўзгариши мумкин. Сўнгги йилларда бутун дунё бўйлаб турли хил экологик шароитларда тупроқ шамол эрозиясининг кўламини аниқлаш бўйича катта изланишлар олиб борилди. Тупроқ шамол эрозияси моделларининг пайдо бўлиши билан, шамол эрозиясининг динамикасини аниқлаш ва мониторинг қилиш ҳамда асосий механизмларини яхшироқ тушуниш имконияти яратилди.

Шамол эрозияси моделларининг турли хил даражадаги мураккаблилик ва ўзига хос имкониятларга эга бўлган турлари ишлаб чиқилган бўлиб, қўлланиши жиҳатдан масофадан зондлаш маълумотларидан фойдаланган ҳолда шамол эрозияси моделлаштирилади. Ноаниқликлар ва моделларда бўлган чекловлар туфайли ушбу моделлар турли минтақаларга қўлланилиши ва тадқиқот натижалари ҳар хил мунозаралар остида қолмоқда. Ушбу мақола шамол эрозияси динамикасининг асосий тушунчаларини солиштириш учун бир нечта кенг қўлланиладиган шамол эрозияси моделларининг имкониятлари таҳлил қилинди ва моделларнинг қўлланилиши, олинадиган натижаларнинг аниқлиги ҳамда моделлаштириш тадқиқотларининг келажакдаги йўналишлари бўйича баъзи тавсиялар келтирилган.

Калит сўзлари: тупроқ, шамол эрозияси, шамол эрозияси моделлари, шамол эрозияси механизмлари.

Annotation. Wind erosion is a threat to numerous landscapes around the world, which can be amplified or suppressed by direct and indirect impacts. In recent years, great efforts have been made to determine the extent of wind erosion of soil in various environmental conditions around the world. With the advent of wind erosion models, a better understanding of the dynamics and basic mechanisms of wind erosion provides a basis for assessing not only soil erosion, but also various environmental management methods to combat wind erosion of soils.

There are various models of wind erosion of varying degrees of complexity and specific capabilities, as well as a range of spatial and temporal scales of application. Due to their uncertainties and limitations, their applicability to various regions and research issues is still being debated. This article examines several widely used wind erosion models to compare the basic concepts of wind erosion dynamics and provides some recommendations regarding the applicability of the models, expected reliability and future directions of modeling research.

Key words: soil, wind erosion, wind erosion models, wind erosion mechanisms.

Введение. За последние столетия более трети земной поверхности подвергается ветровой эрозии, которая представляет собой естественный процесс, в основном это явление происходит в засушливых условиях и при высокой скорости ветра или на голых почвах, когда растительная биомасса низкая [40]. Антропогенное давление, такое как чрезмерный сбор растительности, системы монокультуры, вырубка лесов, чрезмерный выпас пастбищ, отказ от сельскохозяйственных угодий или оставление обрабатываемых земель под паром на длительное время, ускоряет темпы потери почвы [23].

Ветровая эрозия — это перемещение крупных и мелких частиц ветром по ландшафту с помощью различных механизмов, посредством которых они попадают в атмосферу и впоследствии рассеиваются по поверхности Земли. Воздействие выброшенных частиц на окружающую среду зависит от состава и размера частиц, а также продолжительности их воздушной траектории.

Ветровая эрозия контролируется рядом факторов, таких как сила ветра, влажность почвы, шероховатость поверхности, текстура и агрегатный состав почвы, содержания органического состава в почве, сельскохозяйственная деятельность, растительный покров и размер поля [6]. Воздействие и взаимосвязь этих факторов учитываются при оценке скорости ветровой эрозии. Кроме того, агрегатный состав и устойчивость почвы являются показателями подверженности почв к ветровой эрозии.

Измерение ветровой эрозии может улучшить наше понимание механизмов этого процесса, оценку воздействия ветровой эрозии на окружающую среду, прогнозирование её возникновения и оценку методов сохранения. Начиная с 1940-х годов, полевые и лабораторные исследования оценивали влияние отдельных факторов на ветровую эрозию, но из-за сложного взаимодействия физических процессов, человеческих факторов и окружающей среды мониторинг этих процессов вызывал трудности у исследователей [2].

Модели ветровой эрозии часто используются в сочетании с полевыми и лабораторными измерениями для одновременного учёта влияния различных факторов ветровой эрозии. Эти модели могут предоставить подробной информации о ветровой эрозии и движении частиц почвы в определённых временных и пространственных масштабах [7]. Такие важные знания могут помочь землепользователям отслеживать и прогнозировать, как способствующие факторы влияют на ветровую эрозию, а также для реализации природоохранной политики. Модели ветровой эрозии различаются по сложности, требуемыми входными данными и получаемыми результатами. Следовательно, приемлемость модели зависит от целей пользователей этих моделей [25]. Каждая модель эрозии имеет ограничения, которые вызывают некоторые неопределённости в точности прогнозируемых результатов. Хотя первоначальные модели ветровой эрозии имели ряд ограничений и

неопределённостей, включая высокие требования к входным данным, нереалистичные исходные предположения и неадекватную проверку результатов испытаний в различных регионах. Эти модельные недостатки были расширены, чтобы обеспечить более точной оценки ветровой эрозии почвы и предложить обоснованные рекомендации по управлению состоянием ветровой эрозии.

Описание моделей ветровой эрозии. Моделирование ветровой эрозии обеспечивает хорошую интеграцию эрозионных процессов и факторов и может быть полезно для оценки локальных и внешних эффектов ветровой эрозии в различных пространственных и временных масштабах. Они могут оценить скорость эрозии почвы от небольших до более крупных географических территорий на региональной и национальной основе и оценить соответствующие стратегии борьбы с эрозией [1]. Большинство современных моделей основаны на первоначальных исследованиях механики и динамики ветра для разработки моделей ветровой эрозии, проведённых Чепилем 1945 году. Более ранние исследования рассматривали климат и свойства поверхности почвы как два основных фактора механики ветровой эрозии. Чепиль (1959) предложил уравнение (уровнение-1) для расширения теоретической базы, сосредоточив внимание на основные факторы, влияющих на ветровую эрозию.

Уровнение-1

$$E = \mathrm{IRKFBWD}$$

Где: комковатость почвы (I), растительный покров (R), шероховатость гребня (K), способность почвы к истиранию (F), ветровой барьер (B), ширина поля (W) и направление ветра (D).

Модели постоянно совершенствуются за счёт дальнейшего понимания факторов, влияющих на ветровую эрозию. Было разработано несколько моделей ветровой эрозии с различными возможностями прогнозирования, которые разделены на три категории: эмпирические, концептуальные и основанные на процессах [25].

Существует множество моделей ветровой эрозии, которые не рассматриваются в данном обзоре. Наше внимание сосредоточено на моделях, разработанных для широкого спектра применений в различных масштабах и регионах. Цель этого обзора — проиллюстрировать выбранные модели с точки зрения их структуры, входных данных, выходных данных модели и масштабов их применения. Краткое описание этих моделей представлено в Таблице 1.

Таблице 1

Модели ветровой эрозии

Модель	Первичная ссылка	Тип модели	Шкала времени	Сфера использования	Требования к программному обеспечению	Источник программного обеспечения
WEQ	Вудрафф и Сиддоуэй, 1965 год.	Эмпиричес |кий	Среднегодовое, долгосрочное	Сельскохозяйственная/несельскохозяйственная сфера	MS Windows 3.1 или новее, MS Excel.	https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/technical/tools/weps/?cid=nrcs144p2_080201 .
RWEQ	Фрайрир и др., 1998 г.	Эмпирический/процессуальный	От одного периода до недель	Сельскохозяйственная/несельскохозяйственная сфера	DOS, можно перевести в PCRaster	https://www.csrl.ars.usda.gov/wewc/rweq/get_rweq.htm.
WEPS	Хаген, 1991 г.	Основанный на процессах	Ежедневно или раз в час, долгосрочное	Сельскохозяйственная/несельскохозяйственная сфера в регионе	Linux/Unix, Windows XP или новее, Java 8 или новее.	https://www.ars.usda.gov/research/software.

ISSN 2181-0826 3/2024 y.

Модель	Первичная ссылка	Тип модели	Шкала времени	Сфера использования	Требования к программному обеспечению	Источник программного обеспечения
SWEEP	Татарко и др., 2019	Основанный на процессах	Одно событие от часа до часа	Сельскохозяйственная/несельскохозяйственная сфера	Windows XP или новее и Java 8 или новее	https://www.ars.usda.gov/research/software.
EPIC	Уильямс и др., 1984 г.	Эмпирический	Ежедневный временной шаг, долгосрочный	Сельскохозяйственное поле для всей фермы (несколько полей)	Среда DOS, Windows или Linux	https://epicapex.tamu.edu/epic/
APEX	Уильямс и др., 1995 г.	Эмпирический	Ежедневный временной шаг, долгосрочный	Сельскохозяйственное поле, небольшие водоразделы, ландшафт	Среда DOS, Windows или Linux	https://epicapex.tamu.edu/apex/
TEAM	Грегори и др., 1999 г.	Основанный на процессах	Одно событие	Различные земельные участки	Windows 95, 98 или NT	Нет общего доступа
WEELS	Бёнер и др., 2003 г.	Основанный на процессах	Одно событие	Несколько полей, определяемых пользователем	SAGA-GIS, Windows или Linux	Нет общего доступа

Модель	Основные входные параметры	Результат ветровой эрозии	Конкретные цели
WEQ	Эродированность почвы I (агрегаты > 0,84 мм); Шероховатость, K (гребневая шероховатость); Климат, C (годовая скорость ветра, осадки, температура); Длина поля, L (незащищенное расстояние); Растительность, V (вид, количество, направленность)	Средняя потеря почвы на площадь в год. Также доступно в табличной форме (см. исходный веб – сайт).	Оценить долгосрочную среднегодовую потерю почвы
RWEQ	Эродируемая фракция (агрегаты >0,84 мм); Почвенная корка (% глина и органическое вещество); Влажность почвы (осадки, орошение, солнечная радиация); Погода (скорость ветра, направление ветра, количество осадков, солнечная радиация, температура воздуха, снегопад); Обработка почвы (неровность почвы); Геометрия поля (размер поля, форма, ориентация, длина); Урожай (живой покров, высота пожнивных остатков, диаметр стебля, количество); Холмы (уклон склона, длина)	Средняя потеря почвы на площадь за год или более короткий период	Оценить годовую или ежедневную эрозию почвы в масштабе поля и внутри поля.
WEPS	Эродированность почвы (% песка, ила, глины, объёмная плотность, толщина слоя почвы), Поверхностный покров (камни); Состояние поверхности почвы (случайная и ориентированная шероховатость, гранулометрический состав, поверхностная влажность); Климат (скорость ветра, направление ветра); Управление (обработка почвы и посевные работы)	Потери/отложения почвы по направлению и классу размера, такие как сольтация, ползучесть, взвешенное состояние и PM_{10}	Моделирование погоды, полевых условий и ветровой эрозии для сохранения почвы и экологического планирования.
SWEEP	Эродированность почвы (% песка, ила, глины, объёмная плотность, толщина слоя почвы); Поверхностный покров (доля породы/корки, рыхлый и эродируемый материал на корке, плоская/случайная биомасса); Состояние поверхности почвы (случайная и ориентированная шероховатость, гранулометрический состав, поверхностная влажность); Климат (скорость ветра, направление ветра)	Потери/отложения почвы по направлению и классу размера, такие как сальтация, ползучесть, взвешенное состояние и PM_{10}	Смоделирует потерю почвы на заданную дату с учётом запланированных условий поверхности для конкретного участка и методов контроля.
EPIC	Эродированность почвы (агрегаты > 0,84 мм); Шероховатость (случайная и ориентированная); Клима т (годовая скорость ветра, осадки, температура); Длина поля (незащищённое расстояние); Растительный покров (вид, количество, направленность)	Процесс, связанный с ветровой эрозией	Определить связь между эрозией почвы и продуктивностью почвы.

Модель	Основные входные параметры	Результат ветровой эрозии	Конкретные цели
APEX	Эродированность почвы (агрегаты > 0,84 мм); Шероховатость (случайная и ориентированная); Растительный покров (живая биомасса, коренные пожнивные остатки, плоские пожнивные остатки); Длина поля (размеры и ориентация поля); Климат (суточные осадки, максимальная и минимальная температура воздуха, солнечная радиация, суточная скорость ветра, относительная влажность)	Потеря почвы, процесс, связанный с ветровой эрозией	Моделирование систем управления сельским хозяйством
TEAM	Эродированность почвы (средний % песка, ила, глины, каменного покрова); Ветровая эрозия (расстояние от ветрозащиты, высота ветрозащиты, плотность ветрозащиты, скорость ветра); Климат (среднечасовая скорость ветра, относительно влажность); Геометрия поля (размер поля, форма, ориентация, длина); Поверхностный покров (растительный покров, остатки)	Общие потери почвы, скорость движения почвы по полю	Имитация отделения и максимальной скорости переноса почвы и связанной с ней пылевой нагрузки в окружающую среду.
WEELS	Эродированность почвы (% песка, ила, глины, органики); Ветровая эрозия (высота ветрозащиты, плотность ветрозащиты, скорость ветра); Шероховатость (культура и тип культуры); Землепользование (севооборот, сценарии землепользования и статистика); Климат (осадки, температура воздуха, влажность воздуха, глобальная радиация, скорость ветра)	Часы эрозии и потери почвы	Оценить пространственное распределение рисков ветровой эрозии для изменения стратегий управления.

История моделей WEQ и RWEQ. В 1960-х годах уравнение ветровой эрозии (WEQ) было первой эмпирической моделью ветровой эрозии, основанной на опытах Чепиля (1959) оценить ежегодную потерю почвы разработанной на основе измерений ветровой эрозии с помощью аэродинамической трубы в полевых условиях [16]. В то время WEQ была моделью, доступной для планирования систем борьбы с ветровой эрозией, и она постоянно совершенствовалась, что привело к разработке пересмотренного уравнения ветровой эрозии (RWEQ) [15] для рассмотрения дополнительной информации с сельскохозяйственных полей. Модель RWEQ была выпущена для того, чтобы обеспечить краткосрочную (т.е. ежедневную и более длительную) оценку эрозии почвы.

Ограничения и применение моделей WEQ и RWEQ. Погода, почва, растительность и неровности рельефа являются основными факторами моделей WEQ и RWEQ. Управления одним параметром относительно каждого из других факторов может определить влияние каждого отдельного параметра на скорость потери почвы. Это, в свою очередь, позволяет пользователям узнать, какой параметр в первую очередь влияет на потерю почвы и что может быть применено к управленческим решениям по борьбе с эрозией.

WEQ является эмпирическим и основан на трёхлетних данных полевых наблюдений в аэродинамической трубе в Гарден – Сити, штат Канзас, США и таким образом не может точно предсказать ветровую эрозию там, где климат и поверхность сильно отклоняются от этого места. Определение входных значений затруднено из-за меняющихся условий поверхности в течение моделируемого года. В целом, RWEQ можно применять для небольших шероховатых поверхностей с низкой скоростью ветра, однако он не работает на сильно и средне шероховатых поверхностях [28].

Ежедневные изменения погоды и управленческой деятельности, такие как замерзание – оттаивание и неровность почвы, в модели RWEQ не поддерживаются [8]. RWEQ использует среднее значение погодных данных для прогнозирования скорости

ISSN 2181-0826 3/2024 y.

потери почвы из однородных единиц за определённый период. Однако погодные условия постоянно меняются, поэтому средняя погода не учитывает временные изменения погодных факторов. Эта модель также имеет ограничения при оценке скорости потери почвы которые находятся во взвешенном состоянии. Было обнаружено, что производительность RWEQ улучшается после калибровки для местных условий, в противном случае модель RWEQ недооценивает эрозию [10].

История моделей WEPS и SWEEP. Модель системы прогнозирования ветровой эрозии (WEPS) была разработана Службой сельскохозяйственных исследований Министерства сельского хозяйства США (USDA) в 1985 году для пользователей, чтобы выявлять более точные прогнозы, чем WEQ и RWEQ [21]. Из-за их эмпирического и сложного характера WEQ и RWEQ нелегко адаптировать к условиям или климату, отличающимся от Великих равнин США [21]. Тем не менее WEPS представляет собой новую технологию, а не просто новую и улучшенную версию модели WEQ. Как и WEQ, наиболее важным заказчиком модели WEPS является Служба охраны природных ресурсов Министерства сельского хозяйства США (NRCS), которая использует модель для планирования сохранений почвенных ресурсов и борьбы с ветровой эрозией.

Эта модель способна рассчитать общие выбросы, ползучесть частиц почвы, сальтация и потерю взвеси, а также оценить выбросы PM-10 (частицы <10 мкм в аэродинамическом эквивалентном диаметре) с поля. Таким образом, эта модель применима для планирования систем сохранения почв и оценки воздействия ветровой эрозии на орошаемых сельскохозяйственных полях при определённых севооборотах.

Программа оценки ветровой эрозии при одном событии (SWEEP) представляет собой автономную версию подмодели эрозии WEPS [35]. Эта модель была разработана для оценки потенциальной потери почвы за один шторм (т. е. ≤24 часов) с учётом заданных пользователем поверхностных и ветровых условий.

Модель SWEEP — это модель одного события, в которой используются те же научные данные подмодели эрозии и компьютерный код, что и в WEPS. В дополнение к подмодели эрозии WEPS, SWEEP имеет графический пользовательский интерфейс (GUI), обеспечивающий более лёгкий доступ к входным и выходным данным и работает независимо от модели WEPS. Входные параметры SWEEP группируются на основе 1) геометрии поля (длина поля, ширина, ориентация и барьеры, если они присутствуют); 2) растительный материал (плоская мёртвая биомасса, высота биомассы, индекс площади листьев и стеблей); 3) слои почвы (гранулометрический состав частиц и агрегатов, объем горных пород, плотность агрегатов и устойчивость); 4) поверхность почвы (корка и рыхлый материальный покров, устойчивость корки, грядовая и случайная шероховатость, поверхностная влажность почвы); и 5) параметры ветра (скорость и направление) с доступными интервалами средней скорости от 5 до 60 минут [13]. SWEEP моделирует все те же процессы эрозии, что и WEPS, в течение одного дня с заданными пользователем условиями поверхности и при желании предоставляет результаты менее чем за час [36].

Ограничения и применение моделей WEPS и SWEEP. Текущее ограничение WEPS заключается в том, что он не адаптирован к холмистой местности, что становится все более важным по мере того, когда исследователи пытаются применять модели ветровой эрозии на другие области, такие как пастбище. Частично проблема

связана с трудностью разработки больших топографических баз данных, необходимых для удобных общих приложений. WEPS требует подробных входных данных о погоде на исследуемой территории, состоянии поверхности почвы и растительности, которые может быть непросто получить даже для небольшой территории [36].

WEPS известен тем, что плохо прогнозирует как малые, так и крупные эрозии. Фенг и Шарратт (2009) протестировали подмодель эрозии WEPS (т.е. также SWEEP) для очень небольших штормов и обнаружили, что модель недооценивает эрозию из-за переоценки пороговой скорости трения. Другие исследователи также сообщили, что WEPS недооценивает возникновение небольших штормов [14]. Хаген (2004) обнаружил аналогичную реакцию на небольшие штормы, но объяснил это пространственной изменчивостью поверхности, когда части поля имели более высокую эродированность, чем «средняя» поверхность [22].

WEPS считается уникальной моделью ветровой эрозии из-за того, что она определяет подверженность поверхности почвы ветровой эрозии с использованием более подробной информации на ежедневной основе, в то время как другие модели ветровой эрозии не способны определять состояние поверхности [37]. Производительность WEPS была протестирована в разных регионах мира разными исследователями, и приемлемые результаты задокументированы.

История моделей EPIC и APEX. Усовершенствования модели WEQ привело к появлению модели EPIC, данная модель расшифруется как «Erosion Productivity Impact Calculator», предназначенной для определения взаимосвязи между эрозией почвы и продуктивностью почвы на всей территории США [41]. EPIC была одной из нескольких комплексных моделей системы земледелия, которые были разработаны в США. Модель представляет собой эмпирическую компьютерную модель, которая включает ежедневный прогноз скорости потери почвы под воздействием ветра и воды в ответ на управленческие решения, а также позволяет более детально оценить связь между эрозией почвы и продуктивностью почвы [42].

Величину потери почвы в результате ветровой и водной эрозии можно смоделировать с помощью модели EPIC, однако эта модель не используется широко для оценки ветровой эрозии из-за отсутствия полевых испытаний модели [31]. Модель EPIC была улучшена и доработана и теперь известна как модель интегрированного климата экологической политики для использования в управлении целыми полями или фермами. Были внесены улучшения, позволяющие не только моделировать качество воды, круговорот питательных веществ, урожайность зерна, изменение климата и воздействие атмосферного углекислого газа, но также оценивать сток и эрозию в результате таяния снега путём внедрения новых алгоритмов [32].

Модель Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) представляет собой расширенную версию модели EPIC, разработанную Техасским университетом A&M в качестве гибкого и динамичного инструмента для моделирования стратегий управления сельским хозяйством и воздействия землепользования для целых ферм и небольших водоразделов [17]. В моделях EPIC и APEX применяется один и тот же алгоритм для моделирования ветровой эрозии. В настоящее время APEX используется в Проекте оценки воздействия на сохранение возделываемых земель (CEAP) Министерства сельского хозяйства США и NRCS для национальной оценки эффективности методов сохранения се

ISSN 2181-0826 3/2024 y.

земель [30].

Ограничения и применение моделей EPIC и APEX. В настоящее время EPIC имеет возможность сравнивать различные операции по управлению, а также их влияние на циклы питательных веществ, пестицидов и отложений [41]. Первоначальный компонент ветровой эрозии модели EPIC был преобразован из модели WEQ и из годового прогноза в ежедневный. Скидмор и Уильямс (1991) заявили, что преобразование относительной эрозии полей в среднегодовую потерю почвы сопровождается неопределённостью. Связь между обыкновенной эрозией поля и отдельными ураганами не ясен и является основным ограничением модели EPIC [34].

APEX имеет различные функции, одной из которых является возможность подразделять определённые участки или поля по характеристикам почвы, расположению на ландшафте, гидрологию поверхности, методами управления и по разнообразию сельскохозяйственных культур на орошаемых полях. Применение APEX включает в себе информацию о последствиях различных методов управления, изменения климата, концентрации CO_2 в атмосфере и систем производства биоэнергии. APEX может моделировать события на ежедневном временном интервале, при этом некоторые процессы моделируются на часовом или субчасовом временном интервале. Эта модель учитывает ежедневные изменения погоды и рассматривает различные методы управления, основанные на моделирование физических, биологических и экологических процессов. Моделирование APEX можно запускать для разных периодов времени (т. е. одного года или сотен лет если необходимо), а результаты можно проверять ежедневно, ежемесячно, ежегодно с помощью многолетнего анализа [38].

По данным Пи и др. (2017), хотя измеренная и смоделированная потеря почвы в модели ветровой эрозии APEX имеет приемлемую связь, влияние фактора растительного покрова может быть переоценено для моделирования эрозии почвы. Это может быть связано с упрощённым коэффициентом растительного покрова, который применяется к общей биомассе (т. е. площади листьев или стеблей), которые влияют на сдвиг ветра на поверхности [29].

История модели TEAM. The Texas Erosion Analysis Model (TEAM) была разработана для удовлетворения необходимости понимания процессов ветровой эрозии и сохранения ценных природных ресурсов для защиты здоровья человека и окружающей среды. TEAM попыталась смоделировать ветровую эрозию как для чистых песков, как описано, так и для сельскохозяйственных почв, как смоделировано Чепилом и Вудраффом (1963) [11]. Эта модель была разработана с использованием системного подхода для применения текущего состояния информации и математического моделирования. Начиная с 1985 года Исследовательский центр ветротехники Техасского технологического университета в Лаббоке, штат Техас, США собирал данные основные уравнения и математические модели для создания данной модели.

TEAM может моделировать скорость отслоения почвы и максимальный перенос, а также попадание пыли в окружающую среду и предоставлять рекомендации для разработки методов борьбы с ветровой эрозией. Позже TEAM была расширена для прогнозирования концентрации пыли и видимости в зависимости от высоты на площади и за её пределами с подветренной стороны от источника эрозии. Описания поверхностного покрова и почвы были включены для прогнозирования как ветровой, так

и водной эрозии, чтобы облегчить интеграцию модели водной и ветровой эрозии в будущем.

Ограничения и применение модели TEAM. TEAM — это модель, которая включает в себя различные факторы, которых нет ни в одной другой модели ветровой эрозии, такие как относительная влажность, фактор порывов ветра и коэффициент динамической длины. Учитывая все э ти факторы, TEAM относительно прост в использовании и быстро рассчитывает движение грунта [20]. Как и WEPS, эта модель предоставляет пользователям возможность оценивать новые типы почвы и условия покрова, а также выбирать подходящие единицы для входных, так и для выходных данных, что делает эту модель гибкой и удобной для пользователя [19]. С другой стороны, TEAM не имеет возможности регулировать эрозию почвы в зависимости от количества осадков и циклов увлажнения и высыхания, что является её слабой стороной. TEAM использовался для анализа пыльной бури, вызвавшей дорожно-транспортное происшествие с участием нескольких транспортных средств в Калифорнии [33]. Персон и Чиу (1996) также продемонстрировали, что модель TEAM можно использовать в качестве инструмента анализа для очистки участка с крупным загрязнением.

История модели WEELS. Ветровая эрозия европейских лёгких почв (WEELS) является хорошим примером интегрированной модели и первой процессно – ориентированной оценкой европейских почв [9]. Четыре разные страны (Германия, Нидерланды, Швеция и Великобритания) участвовали в финансируемом Европейским Союзом (ЕС) исследовательском проекте WEELS на Северо – Европейских равнинах на трёх полевых экспериментальных площадках, которые были расположены в Германии, Швеции и Великобритания. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе с определёнными почвами. Основная цель проекта WEELS заключалась в оценке рисков пространственного распределения ветровой эрозии путём разработки пространственно – распределённой моделью ветровой эрозии, которая может работать в различных временных масштабах от часов до десятилетий, а также учитывать различные методы управления, такие как период севооборота и климатических изменений [9].

Ограничения и приложения модели WEELS. Модель WEELS ограничена скоростью горизонтального переноса наносов в процессе сальтации. Кроме того, эта модель не оценивает количественную оценку скорости переноса наносов в виде взвеси, поэтому чистые потери почвы не рассчитываются [9]. Без компонента подвески модель не способна оценить влияние ветровой эрозии на качество воздуха.

В проекте, финансируемом ЕС, WEELS применялся для прогнозирования долгосрочного пространственного распределения рисков ветровой эрозии с точки зрения часов и потери почвы вызванной ветром а также для расчёта динамики эоловых отложений в различных климатических условиях и сценариях землепользования. Его также использовали для определения экономических выгод и проблем, связанных с процессами ветровой эрозии. Модель WEELS даёт представление об общих изменениях риска эрозии по месяцам, благодаря чему можно оценить ущерб от ветровой эрозии и сформулировать некоторые стратегии природоохранной деятельности для каждого региона [18]. WEELS обладает способностью включать выходные данные в ГИС и упрощает экономические оценки для текущих и будущих сценариев.

Другие модели. За последние десятилетия было разработано

ISSN 2181-0826 3/2024 y.

несколько других моделей для описания и оценки потенциала ветровой эрозии. Однако эти модели подходят не для всех регионов из-за их входных данных, которые могут быть недоступны. В этом разделе рассматриваются другие модели, применимые в конкретных условиях.

В 1995 году Иранским научно-исследовательским институтом лесов и пастбищ была разработана экспериментальная эмпирическая модель под названием IRIFR, которая может быть применена для оценки потенциальной потери почвы в пустынных районах Ирана с учётом специфических экологических условий этих территорий [3]. Эта модель подходит для оценки различных сценариев систем управления земельными ресурсами и изменений в землепользовании и применялась в ряде исследований в регионе, таких как анализ затрат и выгод применяемых практик, а также последствий взаимодействия человека и животных с окружающей средой в условиях пустыни [5].

Модель производства пыли (DPM) была разработана специально для сельскохозяйственных почв в Испании и Нигере. Он оценивает не только вертикальные потоки массы твёрдых частиц аэродинамического размера 20 мкм или менее (PM20), выбрасываемых во время ветровой эрозии, но и их распределение по размерам. Аэродинамические параметры и характеристики почвы являются двумя важными входными данными этой модели, которая использовалась в различных проектах и проверялась для разных регионов, таких как финансируемая Францией программа «Почва и эрозия» (PROSE) в Нигере и испанский проект «Ветровая эрозия и потеря почвы», «Питательные вещества в полузасушливой Испании» (WELSONS). Из-за отсутствия доступных данных необходимы дополнительные исследования для проверки других аспектов модели [4].

The Integrated Wind-Erosion Modelling System (IWEMS) представляет собой усовершенствованный региональный модель прогнозирования погоды и модели выбросов и переноса пыли, которые связаны с базой данных ГИС, предоставляющей необходимые входные параметры для системы. IWEMS моделирует количественную оценку и прогнозирует пыльные бури в региональном масштабе, а также интенсивность выбросов пыли и переноса пыли в атмосферу [24].

Australian Land Erodibility Model (AUSLEM) представляет собой ежедневную временную модель, которая была создана на основе системного анализа факторов, контролирующих ветровую эрозию, и разработана как инструмент географической информационной системы для оценки восприимчивости земель к ветровой эрозии в Австралии. Входными данными этой модели являются растительный покров, влажность почвы, текстура почвы и шероховатость поверхности почвы. Модель хорошо работает в засушливых южных и западных регионах Квинсленда Австралии [39].

Модель The Aeolian EROsion (AERO) в настоящее время разрабатывается для моделирования ветровой эрозии и выбросов пыли с помощью интерфейса, который предоставит неопытным землепользователям инструмент для принятия решений по ветровой эрозии [12]. AERO включает в себя процессы на поверхности земли и уравнения переноса эоловых отложений из существующих моделей ветровой эрозии и был разработан для применения с имеющимися наборами данных для долгосрочного мониторинга в США. Модель моделирует горизонтальный и вертикальный поток массы по классификациям размеров частиц в масштабе графика на основе введённых пользователем метеорологических

данных, данных о почве и растительности. AERO удовлетворяет потребность в обобщаемой модели ветровой эрозии, которую можно применять в различных условиях земного покрова.

Обсуждение. Обзор моделей ветровой эрозии показывает, что существует необходимость в долгосрочных измерениях для оценки скорости ветровой эрозии почвы в результате изменений в окружающей среде. Когда модели калибруются и проверяются, мы имеем доступ к надёжным измеренным данным, с помощью этого можно оценить компьютерные модели для прогнозирования ветровой эрозии в различных условиях и в разных промежутках времени. Такие данные должны будут учитывать различные входные и выходные данные всех моделей.

Что касается моделирования ветровой эрозии, лишь немногие исследования предоставляют полную информацию о различных аспектах эффективности модели в ответ на основные вопросы пользователей относительно того, какая модель, в каком регионе и при каких условиях подходит для определения скорости ветровой эрозии. За последние десятилетия были разработаны многочисленные модели эрозии разной степени сложности, от простых до сложных Каждая модель имеет свои собственные потребности и ограничения, которые следует учитывать для конкретного применения. Однако некоторые ограничения моделей решаются с появлением современных компьютеров. В текущем обзоре была предоставлена некоторые информации об истории, структуре, входных и выходных данных каждой модели. Для дальнейшего понимания моделей ветровой эрозии почвы было проведено сравнение существующих широко используемых моделей ветровой эрозии.

Используемые базы данных для моделирования. Базы данных для моделей WEQ, RWEQ и WEPS основаны на долгосрочных климатических данных, но каждая модель использует данные по-разному, чтобы стимулировать процесс эрозии. Например, модель WEQ требует среднегодовой скорости ветра и преобладающего направления ветра для каждого месяца. Учитывая что климатическая база данных RWEQ содержит ежемесячные вероятности скорости и направления ветра, а также солнечной радиации, температуры и осадков для регионов США [10].

Необходимая информация о почве для модели RWEQ включает текстуру, органическое вещество и карбонат кальция. База данных скоростей ветра WEPS содержит распределение скорости и направления ветра по месяцам, на основе которого генерируются информация почасовой скорости ветра и суточное направление этих ветров. Среднемесячные максимальные и минимальные температуры воздуха, температура точки росы, солнечная радиация и количество осадков изымаются из отдельной климатической базы данных, под названием CLIGEN [27].

База данных почв для модели WEPS извлекается в интерактивном режиме из национальной базы данных почв Министерства сельского хозяйства США (USDA-NRCS). Рост урожая, разложение остатков и операции управления в WEPS настраиваются с помощью набора параметров, которые определяют и управляют процессами, представленными в коде модели. Базы данных с этими параметрами для США были разработаны ARS и NRCS, что позволяет пользователям создавать методы управления посевами для конкретных участков для моделирования условий пахотных земель для WEPS моделей.

SWEEP использует те же базы

ISSN 2181-0826 3/2024 y.

данных о почве, ветре и ветрозащитных барьерах, что и WEPS. Модели EPIC и APEX моделируют потерю почвы из-за ветровой эрозии при различных стратегиях управления, но этим моделям требуется больше входных данных по сравнению с другими моделями для отражения эффекта методов управлений почвой. Следовательно, эти модели полезны только при наличии широкой и точной базы данных [17].

Модель TEAM имеет базу данных климата, доступ к которой осуществляется, когда пользователь указывает на определённый исследуемый участок для получения данных о ветре, относительной влажности и дождливых днях. Другие данные просто рассчитываются на основе вводимых пользователем данных, таких как тип почвы для определения распределения частиц по размерам, а также выбора почвенного покрова.

WEELS получает доступ к доступной топографической и климатической информации из баз данных [9]. Данные о ветре можно получить, воспользовавшись программой анализа и применения атласа ветров [26]. С наборами климатических данных из существующей сети метеорологических станций. Рельеф получен из цифровых моделей местности с пространственным разрешением 50×50 м, которые были обработаны и преобразованы в горизонтальные (векторные данные) с интервалом горизонтов 2 м.

Выводы и заключения. Согласно литературе, исследователи выбирают типы моделей в зависимости от потребностей исследования в котором они сосредоточены. Каждая модель служит для цели исследования, которая во многом зависит от функции, которую она обеспечивает, поэтому конкретный тип модели не может считаться более применимым во всех ситуациях. При принятии конкретной модели следует учитывать её точность, надёжность, простоту использования при минимальном количестве входных данных, способность учитывать изменения в землепользовании, климат, достоверность результатов для каждого конкретного применения и временной масштаб моделирования.

Наиболее распространённые виды моделей ветровой эрозии почвы бывают от эмпирических до физических или их в сочетании. Мы вели обзор несколько моделей с точки зрения их истории, структуры, процессов и ограничений. Кроме того, мы оценили необходимые базы данных, а также входные и выходные данные, чтобы предоставить информацию о каждой модели, чтобы в дальнейшем помочь исследователям при выборе модели на основе желаемых приложений и условий.

Свести к минимуму потерю почвы и улучшать плодородность земель в регионах, подверженных ветровой эрозии. Прогнозирование потери почвы является важным аспектом в планировании землепользования, рыночных стратегий управления и в методах ведения сельского хозяйства. Модели ветровой эрозии могут предоставить полезные информации исследователям эрозионных процессов, а также землепользователям и политикам для решения ключевых вопросов управления природными ресурсами и для устойчивого развития сельского хозяйства.

Список использованной литературы:

1. Баходиров З. А., Маматкулов А. Р. Новейшие методы мониторинга ветровой эрозии почв 2022. – С. – 9.

2. Мирзажанов К. М. Ветровая эрозия орошаемых почв Узбекистана и борьба с ней // – Т.: Фан. 1973.

3. Ahmadi H. Applied Geomorphology: Desert-Wind Erosion // Tehran: Tehran University Publication. 1998. (23). – C. – 85-395.

4. Alfaro S. C., Rajot J. L., Nickling W. Estimation of PM20 emissions by wind erosion: main sources of uncertainties // Geomorphology. 2004. № 1–4 (59). – C. – 63–74.

5. Azarkar S. M. [и др.]. Investigating the relationship between wind erosion and value of animal habitats in desert areas // International Journal of Environmental Science & Technology. 2006. (2). – C. – 387-393.

6. Bagnold R. A. The physics of blown sand and desert dunes / R. A. Bagnold, Courier Corporation, 2012.

7. Bhuyan S. J. [и др.]. Soil loss predictions with three erosion simulation models // Environmental Modelling & Software. 2002. № 2 (17). – C. – 135-144.

8. Blanco-Canqui H., Lal R. Soil and water conservation Springer, 2010. – C. – 1-19.

9. Böhner J. [и др.]. The WEELS model: methods, results and limitations // Catena. 2003. № 3–4 (52). – C. – 289-308.

10. Buschiazzo D. E., Zobeck T. M. Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas // Earth Surface Processes and Landforms. 2008. № 12 (33). – C. –1839-1850.

11. Chepil W. S., Woodruff N. P. The physics of wind erosion and its control // Advances in agronomy. 1963. (15). – C. – 211-302.

12. Edwards B. L., Webb N. P., McCord S. E. AERO: A wind erosion modeling framework with applications to monitoring data 2018.

13. Fan J. [и др.]. Statistical physics approaches to the complex Earth system // Statistical physics approaches to the complex Earth system. 2021. (896). – C. – 1-84.

14. Feng G., Sharratt B. Validation of WEPS for soil and PM10 loss from agricultural fields within the Columbia Plateau of the United States // Earth Surface Processes and Landforms. 2007. № 5 (32). – C. – 743-753.

15. Fryrear D. W. [и др.]. Revised wind erosion equation. Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory // Technical Bulletin. 1998. (1).

16. Fryrear D. W. [и др.]. Wind Erosion Estimates with RWEQ and WEQ.

17. Gassman P. W. [и др.]. The Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) model: An emerging tool for landscape and watershed environmental analyses // Transactions of the ASABE, 53 (3): 711-740. 2010. № PNNL-SA-67169 (53).

18. Goossens D., Riksen M. Wind erosion and dust dynamics at the commencement of the 21st century // Wind erosion and dust dynamics: observation, simulation, modelling. Wageningen: ESW publications. 2004. – C. –7-13.

19. Gregory J. M. [и др.]. TEAM: The Texas tech wind erosion analysis model Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1999. – C. – 24-29.

20. Gregory J. M. [и др.]. TEAM: integrated, process-based wind-erosion model // Environmental Modelling & Software. 2004. № 2 (19). – C. – 205-215.

21. Hagen L. J. A wind erosion prediction system to meet user needs // Journal of Soil and Water Conservation. 1991. № 2 (46). – C. – 106-111.

22. Hagen L. J. Evaluation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) erosion submodel on cropland fields // Environmental Modelling & Software. 2004. № 2 (19). – C. – 171-176.

23. He X. [и др.]. Soil erosion response to climatic change and human activity during the Quaternary on the Loess Plateau, China // Regional Environmental Change. 2006. (6). – C. – 62-70.

24. Lu H., Shao Y. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications // Environmental Modelling & Software. 2001.

№ 3 (16). – С. – 233-249.

25. Merritt W. S., Letcher R. A., Jakeman A. J. A review of erosion and sediment transport models // Environmental modelling & software. 2003. № 8–9 (18). – С. – 761-799.

26. Mortensen N. G. [и др.]. Wind atlas analysis and application program (WAsP) 1993.

27. Nicks A. D., Lane L. J., Gander G. A. Weather generator // USDA_Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, NSERL Report. 1989. № 10.

28. Oro L. A. de, Colazo J. C., Buschiazzo D. E. RWEQ – Wind erosion predictions for variable soil roughness conditions // Aeolian Research. 2016. (20). – С. – 139-146.

29. Pi H. [и др.]. Evaluation of two empirical wind erosion models in arid and semi-arid regions of China and the USA // Environmental Modelling & Software. 2017. (91). – С. – 28-46.

30. Plotkin S. [и др.]. APEX calibration and validation of water and herbicide transport under US Southern Atlantic Coastal Plain conditions // Transactions of the ASABE. 2013. № 1 (56). – С. – 43-60.

31. Potter K. N. [и др.]. Evaluation of EPIC's wind erosion submodel using data from southern Alberta // Canadian Journal of Soil Science. 1998. № 3 (78). – С. – 485-492.

32. Puurveen H. [и др.]. Evaluation of EPIC's snowmelt and water erosion submodels using data from the Peace River region of Alberta // Canadian journal of soil science. 1997. № 1 (77). – С. – 41-50.

33. Singh U. B., Gregory J. M., Wilson G. R. Texas erosion analysis model: theory and validation Citeseer, 1997. – С. – 3-5.

34. Skidmore E. L., Williams J. R. Modified EPIC wind erosion model // Modeling plant and soil systems. 1991. (31). – С. – 457-469.

35. Tatarko J. [и др.]. Application of the WEPS and SWEEP models to non-agricultural disturbed lands // Heliyon. 2016. № 12 (2). – С. e00215.

36. Tatarko J., Wagner L., Fox F. The Wind Erosion Prediction System and its Use in Conservation Planning John Wiley & Sons, Ltd, 2019. – С. – 71-101.

37. Wagner L. E. A history of Wind Erosion Prediction Models in the United States Department of Agriculture: The Wind Erosion Prediction System (WEPS) // Aeolian Research. 2013. (10). – С. – 9-24.

38. Wang C. [и др.]. Interpolation of soil properties from geostatistical priors and DCT-based compressed sensing // Ecological Indicators. 2022. (140). – С. 109013.

39. Webb N. P. [и др.]. A model to predict land susceptibility to wind erosion in western Queensland, Australia // Environmental Modelling & Software. 2009. № 2 (24). С. 214–227.

40. Weinan C., Fryrear D. W. Grain-size distributions of wind-eroded material above a flat bare soil // Physical Geography. 1996. № 6 (17). – С. – 554-584.

41. Williams J. [и др.]. APEX model validation for CEAP // USDA-Natural Resources Conservation Service, Temple, Texas. 2010. – С. – 1-13.

42. Williams J. R., Jones C. A., Dyke P. T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity // Transactions of the ASAE. 1984. № 1 (27). – С. – 129-0144.