

О ПОРОГОВОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА ПРИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЕФЛЯЦИИ

Н.А. Лихацевич

Институт почвоведения и агрохимии, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Главными, наиболее быстротекущими факторами нарушения агропроизводительных функций почвы являются водная и ветровая эрозия (дефляция). Доля территорий со сниженным плодородием почв или выведенных из сельскохозяйственной по причине эрозии, в большей части ветровой, составляет 83% от площади всех деградированных почв [1]. Частота и масштабы проявления дефляции, ее распространение и влияние на отрасли сельского хозяйства, энергетики, транспорта привлекают к изучению данного явления исследователей, работающих в области фундаментальных и прикладных наук (механика, биология, грунтоведение, климатология, физика атмосферы и др.). Изучение процесса ветровой эрозии является одной из приоритетных задач почвоведения, поскольку результаты исследований в этой области используются для разработки систем почвозащитного земледелия.

Особенно активизировались исследования дефляции в последние годы. Благодаря им появилось несколько эмпирических моделей выдувания, разработанных на основе результатов лабораторных и полевых опытов [2-8]. Однако их применение ограничено условиями, в которых были проведены опыты и получены соответствующие эмпирические расчетные уравнения и коэффициенты.

Преодолеть трудности при обобщении эмпирических моделей возможно, используя известные физические теории, с помощью которых можно описать природные явления, составляющие процесс дефляции почвы. Подобный подход применили Глазунов Г.П. и Гендугов В.М., предложившие обобщенную теорию ветровой эрозии почвы [9,10].

Не вызывает сомнений актуальность разработки универсальной теории ветровой эрозии, позволяющей количественно определять (прогнозировать) интенсивность развития дефляции в любых условиях, в том числе в пределах Беларуси, особенно для территории Белорусского Полесья, где процессы ветровой эрозии достаточно интенсивны и наносят наибольший ущерб плодородию легких минеральных и осушенных торфяных почв. Поэтому несомненно важной является адаптация к условиям Беларуси выводов, вытекающих из обобщенной модели Гендугова В.М. и Глазунова Г.П. При этом важно проанализировать параметры, характеризующие дефляцию, и предложенные расчетные зависимости, используя возможность улучшения их статистических характеристик.

Одним из основных факторов, влияющих на вынос почвенных частиц с поверхности почвы, является *касательное напряжение трения*, вызываемое ветром. На территории бывшего СССР Андрейчук А.Л. первым использовал показатель «критическое напряжение трения» как фактор, определяющий начало развития дефляции [11]. При определении напряжения трения на поверхности почвы он рекомендовал в первую очередь учитывать скорость ветра и силу тяжести (размеры) почвенных частиц в качестве противодействия подъемной силе воздушного потока, вызываемой ветром.

Касательное напряжение трения вызывается воздействием ветра на поверхность почвы, которая всегда имеет некоторую противодефляционную устойчивость (шероховатость, размер и плотность сложения почвенных частиц). Величина касательного напряжения трения находится в прямой зависимости от скорости ветра: с ростом скорости она увеличивается. И наоборот, уменьшение скорости ветра вызывает уменьшение касательного напряжения трения, что объясняет меньшую силу воздействия на почвенные частицы.

Многие исследователи, работавшие над эмпирическими моделями дефляции, анализируя опытные данные по величине дефляции и соответствующей ей скорости ветра, доказывали, что наиболее точную аппроксимацию экспериментальных точек в зависимости дефляции от ветра дает скорость ветра в кубе (М.П. О'Брайен и Б.Д. Риндлауб, 1936, Р. Багнольд, 1941, А.В. Гвоздиков, 1962, А.К. Дюнин, 1963, Закиров, 1968 и др.). Поскольку величина дефляции однозначно связана прямой пропорциональностью с касательным напряжением трения, вызываемым ветром на поверхности почвы, аналогичная структура связи (скорость ветра в кубе) должна присутствовать и в зависимости касательного напряжения трения от скорости ветра. Однако В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым было замечено, что в соответствии с теорией размерностей физических величин касательное напряжение трения на поверхности почвы, вызванное ветром, имеет размерность $(кг/м)/с^2$ и прямо пропорционально произведению плотности воздуха на квадрат скорости ветра, т.е. $(кг/м)/с^2 = (кг/м^3)(м^2/с^2)$. Поэтому авторы справедливо утверждали, что интерполяционная зависимость касательного напряжения трения, вызванного ветром на поверхности почвы, обоснованная с соблюдением соотношения размерностей физических величин (с учетом плотности воздуха), должна зависеть от квадрата скорости ветра.

Цель данной работы заключается в проверке гипотез разных авторов о форме связи касательного напряжения трения и скорости ветра, а также обосновании расчетной зависимости для количественной оценки дефляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проверку гипотез разных авторов о форме зависимости касательного напряжения трения от скорости ветра мы осуществили, используя опытные данные В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова, опубликованные в монографии [10]. Прежде всего при анализе зависимости касательного напряжения трения на почвенной поверхности от скорости ветра наше внимание привлекла возможность использования экспериментальных данных упомянутых авторов для оценки тесноты связи и совершенствования структуры расчетного эмпирического уравнения. Желая определить со степенью, в которую следует возводить скорость ветра в расчетной формуле, и разрешить давний спор о ее величине, мы в первую очередь проанализировали зависимость, предложенную В.М. Гендуговым и Г.П. Глазуновым [10]. Для аппроксимации опытных данных авторы использовали линейную форму связи (рис. 1)

$$\tau_1 = a_1 \rho u^2, \quad (1)$$

где τ_1 – касательное напряжение трения на поверхности почвы, $(кг/м)/с^2$;

a_1 – эмпирический коэффициент пропорциональности (безразмерная величина);

ρ – плотность воздуха, $кг/м^3$;

u – скорость ветра, $м/с$.

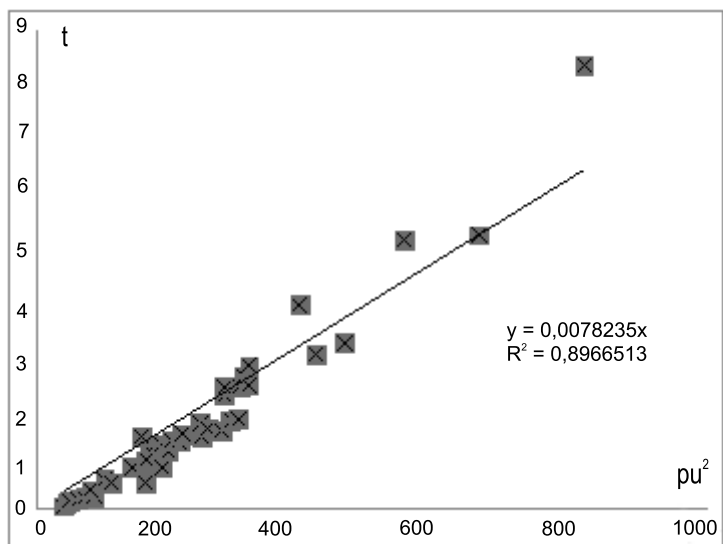


Рис. 1. Интерполяционная зависимость касательного напряжения трения на поверхности почвы от скорости ветра по данным В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова [10]

Достаточно высокие статистические характеристики эмпирического представления связи (1), приведенные на рисунке 1 (коэффициент детерминации $R^2 = 0,897$), позволяют с доверием относиться к гипотезе В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова о форме искомой зависимости со скоростью ветра в квадрате. Вместе с тем, расположение точек на интерполяционном поле (рис. 1) показывает, что следует проанализировать и другие варианты интерполяционного уравнения с надеждой на повышение тесноты связи. При этом наиболее интересно проверить предположение других авторов о зависимости касательного напряжения трения на поверхности почвы от скорости ветра в кубе.

На рисунке 2 показан результат подобного анализа, который подтверждает, что использование куба скорости ветра при построении эмпирической зависимости (по экспериментальным данным В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова) дает лучший результат. В нашем случае при анализе тех же экспериментальных точек коэффициент детерминации зависимости с кубом скорости ветра оказался существенно выше ($R^2 = 0,951$).

Однако здесь возникает противоречие: если строить зависимость касательного напряжения трения от скорости ветра, возведенной в третью степень, происходит нарушение размерностей величин. Это представляет собой серьезное затруднение. При построении теоретически непротиворечивой модели ветровой эрозии зависимость касательного напряжения трения все же необходимо связывать с квадратом скорости ветра, тогда проблемы с балансом размерностей не возникает.

Здесь возможно альтернативное предложение: в соответствии с принятыми нормами при построении эмпирических уравнений, правомерным в данном случае является введение в расчетное уравнение эмпирического параметра с размерностью, обратной размерности скорости ветра, т.е.

$$\tau_2 = a_2 \rho u^3, \quad (2)$$

1. Почвенные ресурсы и их рациональное использование

где a_2 – эмпирический параметр с размерностью $(\text{м/с})^{-1}$, т.е. $a_2 = a_3/u_x$; a_3 – эмпирический коэффициент пропорциональности (безразмерная величина).

В уравнении (2) параметр u_x представляет собой некую скорость ветра, обратно пропорциональную касательному напряжению трения. Однако известно, что касательное напряжение трения, создаваемое ветром на поверхности почвы, всегда прямо пропорционально силе (скорости) ветра. Поэтому возникает неопределенность при установлении скорости u_x , а структура уравнения (2) не позволяет вложить в данный параметр какой-то физический смысл и хотя бы приблизительно задать его количественное значение.

В связи с возникшими трудностями при использовании эмпирической зависимости (2) для аппроксимации опытных данных у нас появилась уверенность, что в основе зависимости следует использовать именно квадрат скорости ветра, но с определенной поправкой, а именно: квадрат скорости ветра за минусом некоторой величины. Во избежание нарушения размерностей данная величина также должна иметь размерность скорости ветра.

Наиболее простое решение состоит в том, чтобы приравнять эту величину так называемой «критической скорости ветра», которая успешно используется многими исследователями как характеристика начала дефляции. Однако критическая скорость ветра зависит от противодефляционной устойчивости поверхности почвы (шероховатости поверхности, размера и плотности сложения почвенных частиц и т.п.) и для разных почв различна (является переменной величиной). Поэтому возникла идея проверить гипотезу о существовании в процессе дефляции некой пороговой скорости ветра, создающей касательное напряжение трения на поверхности почвы, которая меньше критической, причем постоянна для любой поверхности, с любой шероховатостью, размером и плотностью сложения частиц. С достижением этой скорости ветра еще не наблюдается перемещения и отрыва от поверхности почвенных частиц, но уже возникает касательное напряжение трения, вызванное ветром, и появляются предпосылки к началу развития процесса дефляции, который реально начинается при достижении ветром критической скорости.

Эту гипотетическую скорость ветра мы называем «пороговой скоростью касательного напряжения трения (пороговой скоростью ветра)». Расчетная зависимость в таком случае приобретает вид:

$$\tau = a_4 \rho (u - u_0)^2, \quad (3)$$

где u_0 – пороговая скорость касательного напряжения трения (пороговая скорость ветра), м/с.

В соответствии со структурой зависимости (3) касательное напряжение трения возникает на поверхности почвы только при превышении ветром пороговой скорости, т.е.

$$\tau > 0 \text{ при } u > u_0, \text{ а при } u \leq u_0 \text{ } \tau = 0.$$

Следующим этапом анализа было обоснование численного значения пороговой скорости ветра, вызывающей касательное напряжение трения на поверхности почвы, по экспериментальным данным Глазунова Г.П. и Гендугова В.М. [10]. Отправной точкой анализа явилась известная нам наименьшая критическая скорость ветра, которая, по результатам исследований, выполненных в Беларуси, является минимальной для песчаных почв без растительности и составляет около 4,6 м/с [12].

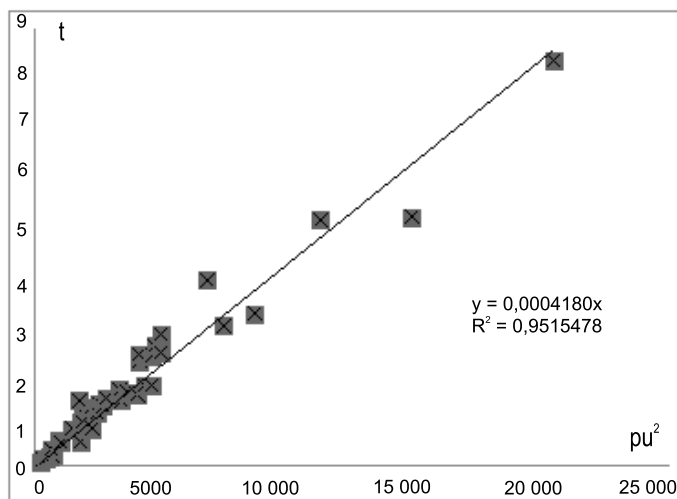
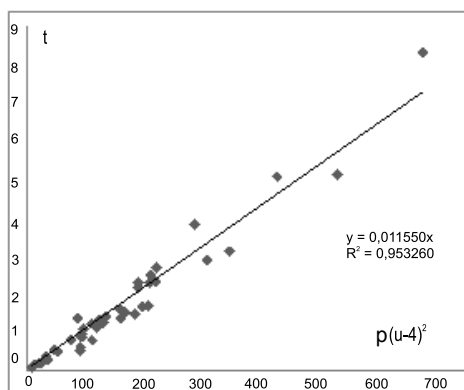
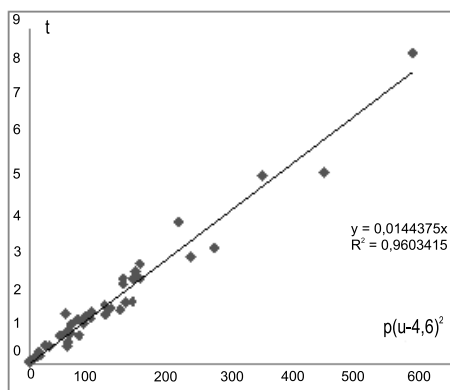


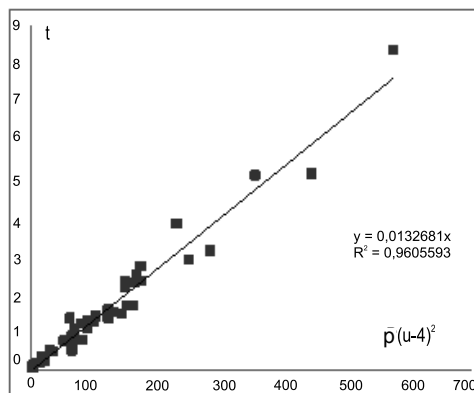
Рис. 2. Расположение опытных точек, приведенных на рис. 1, при выражении зависимости касательного напряжения трения от скорости ветра в кубе



а



б



в

Рис. 3. Интерполяционные зависимости касательного напряжения трения на поверхности почвы от скорости ветра: а) $u_0=3$ м/с; б) $u_0=4,6$ м/с; в) $u_0=4$ м/с.

1. Почвенные ресурсы и их рациональное использование

При обосновании численного значения пороговой скорости ветра, вызывающей касательное напряжение трения на поверхности почвы, мы использовали три варианта наиболее вероятных значений скорости ветра: 3; 4 и 4,6 м/с (рис. 3). Статистический анализ опытного материала показал, что, во-первых, теснота связи во всех вариантах оказалась выше, чем у скорости ветра в кубе (рис. 2), а во-вторых, лучшие характеристики имеет зависимость, где $u_0=4$ м/с.

Таким образом, полученные выше результаты анализа зависимости касательного напряжения трения на поверхности почвы от скорости ветра убедительно свидетельствуют о правомерности включения в расчетное уравнение принципиально нового параметра – *пороговой скорости ветра* (вызывающей касательное напряжение трения на поверхности почвы), имеющей ясный физический смысл и конкретное численное значение. Следовательно,

$$\tau > 0 \text{ при } u_0 > 4 \text{ м/с, а при } u_0 \leq 4 \text{ м/с } \tau = 0.$$

В дальнейших исследованиях, безусловно, следует проверять точность сделанной количественной оценки этой скорости, но в любом случае будет некорректным игнорировать данный параметр, введенный нами и показавший свою эффективность в повышении точности расчета (прогнозирования) касательного напряжения трения на поверхности почвы, вызывающего дефляцию.

ВЫВОДЫ

Гипотеза о существовании пороговой скорости ветра, при которой возникает (и начинает расти при дальнейшем росте скорости ветра) касательное напряжение трения на поверхности почвы, получила экспериментальное подтверждение. Нами определено количественное значение пороговой скорости ветра, которое в соответствии с опытными данными В.М. Гендугова и Г.П. Глазунова составляет около 4 м/с.

Пороговая скорость ветра (в отличие от критической скорости) постоянна для любой поверхности, с любой шероховатостью, размером и плотностью сложения частиц. С достижением ветром пороговой скорости еще не наблюдается перемещения и отрыва от поверхности почвенных частиц, но уже возникает касательное напряжение трения и появляются предпосылки к началу развития процесса дефляции, который реально начинается при достижении ветром критической скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. The Extent of Human-Induced Soil Degradation / L.R. Oldeman [et al] // In: World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation. Wageningen. 1991. Proceedings of the 16-th World Congress of Soil Science. Montpellier, 20-26/08/1998.
2. Азаров, Н.К. Уточнение расчетного метода возможных потерь почвы от ветровой эрозии для оценки вариантов почвозащитных мероприятий с учетом элементов рельефа территории / Н.К. Азаров // Обработка почвы и агротехника полевых культур в Северном Казахстане. – Целиноград, 1986. – С. 30-40.
3. Долгилевич, М.И. Механизм отрыва эрозионной частицы от поверхности почвы / М.И. Долгилевич, Ю.И. Васильев // Бюллетень Всесоюзного научно-исслед. института агролесомелиорации. – Волгоград. – Вып. 12. – № 66. – 1973. – С. 3-7.
4. Дюнин, А.К. Механика метелей / А.К. Дюнин. – Новосибирск: Изд-во АН СССР, 1963. – 377 с.
5. Иванов, А.П. Физические основы дефляции песков пустыни / А.П. Иванов. – Ашхабад: Ылым, 1972.

6. Шиятый, Е.И. Эродлируемость южных карбонатных черноземов в зависимости от шероховатости поверхности почвы / Е.И. Шиятый // Вестник с.-х. науки. – Алма-Ата, 1965. – № 10. – С. 92-100.

7. Chepil, W.S. The physics of wind erosion and its control / W.S. Chepil, N.P. Woodruff // *Advances in Agronomy*, 1963. – V. 15. – P. 211-302.

8. Ларионов, Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки / Г.А. Ларионов. – М.: МГУ, 1993. – 200 с.

9. Глазунов, Г.П. Теория ветровой эрозии почв: автореф. дис. ... д-ра биол. наук.: 03.00.27 / Г.П. Глазунов; Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. – Москва, 2005. – 44 с.

10. Гендугов, В.М. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха / В.М. Гендугов, Г.П. Глазунов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 240 с.

11. Андрейчук, А.Л. Устойчивость почв к дефляции и теоретические аспекты почвозащитной технологии: автореф. ... д-ра биол. наук.: 06.01.03 / А.Л. Андрейчук. – Москва, 1983. – 39 с.

12. Методические указания по прогнозированию водно-эрозионных и дефляционных процессов на обрабатываемых землях Беларуси – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2006. – 44 с.

ABOUT THE THRESHOLD WIND VELOCITY AT QUANTITATIVE ASSESSMENT OF WIND EROSION INTENSITY

N.A. Lihatsевич

Summary

Short analysis of present empirical dependences introduced for wind soil erosion calculation and generalized empirical model developed by V.M. Gendugov and G.P. Glazunov for the purpose of their further approbation and adaptation for conditions of Belarusian Polesie, where wind erosion is the most intensive and inflict the largest damage to soils, is performed in the article. The main factor influencing the carrying out of soil particles by air stream – friction shear stress invoked by wind on soil surface, is considered. Test of hypothesis about dependence form between friction shear stress and wind velocity at approximation of published experimental data received by V.M. Gendugov and G.P. Glazunov in the wind tunnel is realized. For the first time has established, that wind velocity minus value called by us “threshold wind velocity” having clear physical sense: only during obtaining threshold wind velocity friction shear stress appears on soil surface (and begins to grow with further wind velocity growth), should be used as argument of calculated quadratic dependence. Has determined, that transference and removal of soil particles from surface during obtaining threshold wind velocity are not yet may be observed, but friction shear stress appears and preconditions of wind soil erosion occur.

Experimental data statistical analysis has shown, that strength of links of derived dependence higher than of earlier suggested wind soil erosion models with use of cube and squared wind velocity, what authenticates about the competence of the proposed parameter introduction. Substantiation of numerical value of threshold wind velocity is realized, which is permanent for any soil surface with any roughness, size and particles composition density, and is about 4 m/s.

Поступила 27 апреля 2012 г.