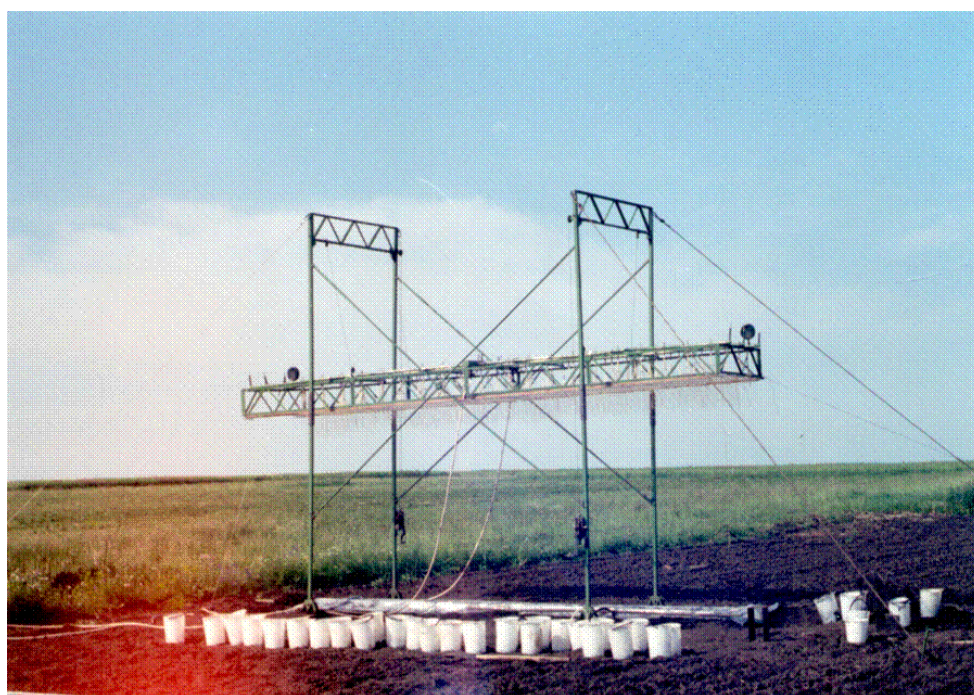


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК

Государственное научное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии



МЕТОДИКА
ДОЖДЕВАНИЯ СТОКОВЫХ ПЛОЩАДОК ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ



Курск - 2005

УДК: 631.459.2.57

Методика дождевания стоковых площадок для исследования эрозионных процессов (Под редакцией доктора сельскохозяйственных наук Ю.П. Сухановского). Курск. ВНИИЗиЗПЭ РАСХН. 2005. – 30 с.

Авторский коллектив:

Сухановский Ю.П., д.с.-х.н., Санжаров А.И., к.б.н., Чуян О.Г., к.с.-х.н., Проценко Е.П., д.с.-х.н., Рязанцева Н.В., к.с.-х.н. (ВНИИЗиЗПЭ), Проценко А.А., к.б.н., Балабанов С.С., к.с.-х.н., (КГСХА), Горин В.Б., к.т.н. (КГУ).

В проведении экспериментов принимали участие:

Титов А.Г., Вытовтов В.А., Таланов С.П., Олещицкий В.В.

Описывается методика дождевания стоковых площадок для исследования эрозионных процессов. Методика включает: выбор параметров искусственных дождей; планирование эксперимента; подготовку стоковых площадок; проведение измерений; интерпретацию полученных данных. Приводятся примеры применения методики для оценки эффективности различных агротехнических приемов и выноса биогенных веществ.

Методика предназначена для аспирантов и научных сотрудников, занимающихся исследованиями эрозионных процессов и решением прикладных задач.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Планирование эксперимента	5
1.1. Выбор параметров искусственных дождей	8
1.2. Выбор размеров и организация стоковых площадок	11
2. Проведение дождевания.....	13
3. Обработка результатов измерений и их интер- претация	14
4. Примеры проведения экспериментов.....	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
ЛИТЕРАТУРА	29

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 30-х годов прошлого века, дождевание стоковых площадок стало широко применяться в исследованиях эрозионных процессов. Объясняется это сравнительно небольшими затратами на проведение эксперимента и быстрым получением данных. Основной проблемой была разработка критериев выбора параметров искусственных дождей. В 40-х годах для обоснования параметров модельного дождя стали уделять внимание ударному воздействию дождевых капель на почву (Meyer, 1963). Характерными в этом отношении были исследования, проведенные Эллисоном (Ellison, 1944, 1947) и Экерном (Ekern, 1953). Аналогичные работы проводили Г.И.Швебс (1968), Ц.Е. Мирцхулава (1970), А.В.Хмельницкий (1970), Ю.П.Сухановский (1981) и многие другие исследователи.

В 1959 году Вишмайер (Wishmeier, 1959) для естественных дождей предложил эрозионный индекс дождя EI , потери почвы от которого описываются линейной зависимостью (Wischmeier, Smith, 1978; Renard et al., 1977). Это означает, что разные естественные дожди с одинаковым значением индекса EI вызывают и одинаковые потери почвы (при прочих равных условиях). В 1972 году Янг и Бурвелл (Young, Burwell, 1972) экспериментально установили, что потери почвы для естественных и искусственных дождей были одинаковыми при одинаковых значениях эрозионного индекса EI . Это стало основанием для перехода от результатов дождевания к естественным дождям, следовательно, и для выбора параметров искусственных дождей. Индекс дождя EI имеет следующие недостатки: 1) он является эмпирическим, то есть не раскрывает физическую сущность воздействия дождевых осадков на почву; 2) значение индекса EI (произведение кинетической энергии капель дождя на максимальную 30-ти минутную интенсивность) определяется для всего дождя и возможны случаи, когда значение индекса для части дождя будет больше, чем для всего дождя.

В 1983 году Сухановский и Хан (Сухановский, Хан, 1983) предложили физически обоснованную эрозионную характеристику A для искусственных дождей. На основе этой характеристики была разработана методика дождевания стоковых площадок (Сухановский и др., 1999). В дальнейшем, используя эрозионную характеристику A , был предложен новый эрозионный индекс AI для естественных дождей (Sukhanovski et al., 2002) и показано, что он является физическим обоснованием эмпирического индекса EI (Сухановский и др., 2003). Также было показано (Сухановский и др., 2003), что потери почвы для искусственных и естественных дождей будут одинаковыми, если для них будут одинаковые значения индексов AI . Описываемая ниже методика дождевания основана на индексе AI и представляет собой дальнейшее усовершенствование методики (Сухановский и др., 1999; Сухановский, 2005).

1. Планирование эксперимента

При дождевании стоковых площадок проводятся исследования влияния одного или нескольких факторов на сток воды и смыв почвы. К таким факторам относятся, например, свойства почвы (тип почвы и ее механический состав), различные агротехнические приемы (обработка почвы, мульчирование), растительный покров и другие факторы. С этой целью одинаковым образом подготавливаются несколько площадок, среди которых минимум как одна должна быть контрольной (без растительности и противоэрозионных приемов, обработка почвы проводится вдоль площадки). Данные, полученные на других площадках с исследуемым фактором, сравниваются с данными для контрольной площадки, и делается вывод о влиянии этого фактора. Обычно в одном эксперименте получают данные по стоку воды и смыву почвы.

Исследование смыва почвы. Планирование эксперимента основывается на модифицированном уравнении USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier, Smith, 1978). Модифицированное уравнение (Сухановский и др., 2003) справедливо, как для естественного, так и для искусственного дождя и записывается в следующем виде

$$M = (AI - AI_{cr}) \times K_{AI} \times L \times S \times C \times P, \quad (1.1)$$

где M – средний смыв почвы со склона, т/га; AI – новый эрозионный индекс дождя (Sukhanovski et al., 2002), т-м/га; AI_{cr} – критическое значение индекса AI , при достижении которого начинается сток и смыв почвы, т-м/га; K_{AI} – фактор эродируемости почвы, т/ т-м; L , S – соответственно факторы длины и уклона склона, безразмерные; C и P – факторы, учитывающие использование склона (соответственно растительность и противоэрозионные мероприятия), безразмерные. Здесь и далее запись “т-м” выражает энергию как произведение тонны-силы на метр, принятую в эрозионных расчетах (Wischmeier, Smith, 1978). Фактор K_{AI} является аналогом фактора K в уравнениях USLE (Wischmeier, Smith, 1978) и RUSLE (Renard et al., 1997). При стандартных условиях (длина склона 22,1 метра, уклон 9%, отсутствуют растительность и противоэрозионные мероприятия, а обработка почвы проводится вдоль склона) $L=S=C=P=1$.

Если факторы L и S не являются исследуемыми факторами, то их значения определяются по приводимым ниже выражениям, взятым из работы (Renard et al., 1997). В таком случае целью эксперимента является оценка значений величин AI_{cr} , K_{AI} , C и P или $C \times P$. Полученные значения могут применяться и для естественных дождей. В общем случае оценка значения какого-либо фактора (или нескольких факторов) оценивается по отношению, вытекающему из (1.1),

$$F = \frac{M_{fac}}{M_{con}} \times \frac{LS_{con}}{LS_{fac}}, \quad (1.2)$$

где F – коэффициент, показывающий, на сколько исследуемый фактор (или факторы) влияет на смыв почвы по отношению к контрольному варианту, например, если исследуется фактор C , то $F = C$; M_{con} – смыв почвы на контрольном варианте, т/га; M_{fac} – смыв почвы на варианте с исследуемым фактором, т/га. Здесь и далее нижние индексы “con” и “fac” определяют, что величины относятся соответственно к контрольной площадке и к площадке с исследуемым фактором, а $LS = L \times S$.

Исследование стока воды. Скорость впитывания для естественных и искусственных дождей описывается зависимостью (Сухановский, 2003)

$$K = K_{\infty} + (K_{cr} - K_{\infty}) \exp\left[-\alpha\left(\frac{AI}{AI_{cr}} - 1\right)\right], \quad (1.3)$$

где K – скорость впитывания, соответствующая значению индекса дождя AI , мм/мин; K_{∞} – установившаяся скорость впитывания, когда значение AI стремится к бесконечности, мм/мин; K_{cr} – скорость впитывания при $AI = AI_{cr}$, мм/мин; α – безразмерный параметр, который, строго говоря, зависит от свойств почвы и ее исходного состояния. Значения параметров в (1.3) определяются следующим образом. При постоянной интенсивности дождя $K_{cr} = I$, а значение K_{∞} рассчитывается по уравнению

$$K_{\infty} = I - Q_{\infty} / S_{plot}, \text{ мм/мин}, \quad (1.4)$$

где Q_{∞} – измеренный установившийся расход воды с площадки, л/мин; S_{plot} – рабочая площадь стоковой площадки, m^2 .

Поскольку измеряется сток воды, то для оценки неизвестного параметра α используется выражение для коэффициента стока

$$\sigma = \frac{h_r - h_{inf}}{h_r}, \quad (1.5)$$

где h_r – слой дождя, мм; h_{inf} – слой впитавшейся воды, мм. Для монодисперсного дождя (одинаковые размер капель и скорость их падения) с постоянной интенсивностью при $AI > AI_{cr}$ коэффициент стока, соответствующий индексу дождя AI , определяется зависимостью

$$\sigma = \frac{I - K_{\infty}}{I} \left\{ 1 - \frac{AI_{cr}}{AI} \left[1 + \frac{1}{\alpha} \left(1 - \exp \left(-\alpha \left(\frac{AI}{AI_{cr}} - 1 \right) \right) \right) \right] \right\}. \quad (1.6)$$

При $AI \leq AI_{cr}$ коэффициент стока $\sigma = 0$. Выражение (1.6) представляет собой зависимость коэффициента стока σ (безразмерная величина) от безразмерных величин $(I - K_{\infty}) / I$, AI / AI_{cr} и α . Целью эксперимента является оценка значений параметров K_{∞} , K_{cr} , α и AI_{cr} , которые могут применяться в формуле (1.3) и для естественных дождей.

1.1. Выбор параметров искусственных дождей

Для естественного дождя значение индекса AI рассчитывается по формуле (Сухановский и др., 2003; Sukhanovski et al., 2002)

$$AI = 10^{-2} \sum \Delta E_i b I_i^c, \text{ т-м/га.} \quad (1.7)$$

Для интенсивности дождя $I < 7,6$ см/час $b = 1$, $c = 0,9$,

$$\Delta E_i = [210 + 89 \text{Log}_{10}(I_i)] \Delta h_i, \text{ т-м/га; для } I \geq 7,6 \text{ см/час } b = 0,82, c = 1,$$

$$\Delta E_i = 288 \Delta h_i, \text{ т-м/га.}$$

Величина ΔE_i определяет кинетическую энергию дождевых капель в слое дождя Δh_i (см) (Wischmeier, Smith, 1978), выпавшего за интервал времени Δt_i со средней интенсивностью I_i (см/час). Суммирование проводится по интервалам времени Δt_i .

Для рассматриваемых климатических условий рассчитываются значения индекса AI для зарегистрированных естественных дождей. Период наблюдений должен быть не менее 22 лет (Wischmeier, Smith, 1978). По полученным данным определяется диапазон изменения значений индекса AI , который должен быть обеспечен при проведении дождевания.

В качестве искусственного дождя используется монодисперсный дождь с постоянной интенсивностью (все капли имеют одинаковые размер и скорость падения). Использование такого дождя значительно упрощает технику проведения эксперимента, обработку и интерпретацию данных измерений. В таком

случае эрозионная характеристика дождя записывается (Сухановский, Хан, 1983)

$$A = \frac{1}{2} \rho V I^2 t, \text{ Дж/м}^2, \quad (1.8)$$

где ρ – плотность воды, кг/см³; V – скорость падения капель дождя, м/сек; I – интенсивность дождя, м/сек; t – время, сек. Величины A и AI связаны соотношением (Сухановский и др., 2003)

$$AI(\text{т-м/га}) = 2,3 \times 10^4 A(\text{Дж/м}^2). \quad (1.9)$$

Следовательно, во всех приводимых формулах можно заменять индекс дождя AI на эрозионную характеристику A и наоборот, но с учетом коэффициента пропорциональности.

Поскольку эрозионный индекс AI в большей мере зависит от интенсивности дождя, то необходимо, чтобы она задавалась с высокой точностью.

При выборе размера и скорости падения капель следует руководствоваться следующим правилом: капли дождя должны производить разбрызгивание почвы, которое прямо пропорционально импульсу капли mV (Сухановский, 1981). Следовательно, уменьшение скорости капли V (высоты ее падения) может быть компенсировано увеличением ее массы m . Для естественных дождей с интенсивностью в диапазоне 2 - 4 мм/мин средний диаметр капель приблизительно равен 3 мм. Это следует из зависимости (Мирцхулава, 1970)

$$d = 1,06 I^{0,2}, \quad (1.10)$$

где d - средний диаметр капель, мм; I – интенсивность дождя, мм/час.

Диаметр капель может быть определен весовым способом. Для этого определяется масса какого-то количества капель, затем рассчитывается масса одной капли (m) и по формуле массы шара рассчитывается диаметр $d = (6m/\pi\rho)^{1/3}$, где $\pi = 3,14$.

Скорость падения капель с диаметром 0,5 - 5 мм может быть рассчитана с точностью 4,4% по формуле Даскалова (Даскалов, 1978)

$$V = \alpha_1 \sqrt{gd[1 - \exp(-\beta H / d)]} , \quad (1.11)$$

где

$$\alpha_1 = \sqrt{4\rho / 3\varphi\rho_a} , \quad \beta = 3\varphi\rho_a / 2\rho ,$$

$g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ – ускорение гравитации; d – диаметр капли, м; H – высота падения капли, м; $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; $\rho_a = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха; $\varphi = 0,6$ – коэффициент сопротивления воздуха (безразмерный). При приведенных значениях параметров $\alpha_1 = 41,5$ и $\beta = 1,16 \times 10^{-3}$.

При использовании монодисперсного дождя исключается необходимость измерения спектра дождевых капель. Таким образом, при известных значениях диаметра капель, скорости их падения, интенсивности дождя и продолжительности дождевания по формулам (1.8) и (1.9) для искусственных дождей рассчитываются значения величины AI , входящей в уравнение (1.1).

Продолжительность дождевания определяется по двум критериям. Первый – при дождевании должен быть обеспечен диапазон изменения индекса AI для исследуемых естественных дождей. Второй – должна быть достигнута стабилизация расхода воды, стекающей с площадки. Заметим, что при высокой водопроницаемости почвы режим установившегося стока не всегда удается достичь. Такое наблюдалось в эксперименте с мульчированием почвы соломой, описание которого приводится ниже.

В проведенных экспериментах использовалась дождевальная установка (Сухановский и др., 1999), создающая капли диаметром $4,2 \pm 0,3 \text{ мм}$ и интенсивность дождя в интервале 1 - 3 мм/мин. В этом интервале стабильность интенсивности поддерживается в пределах 10%. В большинстве проведенных экспериментов высота падения капель устанавливалась 2 метра.

1.2. Выбор размеров и организация стоковых площадок

Длина и ширина площадки должны быть много больше: а) максимального размера шероховатости поверхности почвы (например, размеров комков); б) расстояния, на которое перемещается основная масса почвы при ее разбрызгивании (это расстояние оценивается сантиметрами (Мирцхулава, 2000)). При выборе длины и уклона площадки необходимо также учитывать зависимость от этих параметров факторов L и S в уравнении (1.1).

Фактор L определяется выражением (Wischmeier, Smith, 1978; Renard et al., 1997)

$$L = (\lambda / 22,1)^m, \quad (1.12)$$

где λ – горизонтальная проекция длины склона, м; m – параметр, определяемый отношением ручейковой эрозии (вызванной потоком воды) к межручейковой эрозии (обусловленной ударом дождевых капель о почву). Значение параметра m определяется следующим соотношением (Renard et al., 1997)

$$m = \beta / (1 + \beta), \quad (1.13)$$

где β – отношение ручейковой эрозии (размыв почвы концентрированными потоками воды) к межручейковой (ударное воздействие дождевых капель на почву). Значение величины β зависит от степени проявления ручейковой эрозии. Для обрабатываемых сельскохозяйственных полей (когда проявляются оба вида эрозии)

$$\beta = [\sin(\theta) / 0,0896] / [3,0\sin^{0,8}(\theta) + 0,56], \quad (1.14)$$

где θ – угол наклона склона. Если восприимчивость почвы к ручейковой эрозии высокая (подобная свежеподготовленным строительным площадкам), то величина β , рассчитанная по (1.14), удваивается. В противоположном случае значение β уменьшается, например, для естественного пастбища берется одна вторая от β (1.14).

Для длины склона больше 4,6 метра фактор S определяется выражениями (Renard et al., 1997):

$$S = 10,8 \sin(\theta) + 0,03 \text{ для уклонов меньше } 9\%; \quad (1.15)$$

$$S = 16,8 \sin(\theta) - 0,50 \text{ для уклонов больше или равным } 9\% . \quad (1.16)$$

Для длины склона меньше 4,6 метра (когда ручейковая эрозия практически отсутствует)

$$S = 3,0 \sin^{0,8}(\theta) + 0,56. \quad (1.17)$$

Приводимые выше зависимости показывают роль отношения ручейковой эрозии к межручейковой, что необходимо учитывать, если исследуется влияние факторов L и S на смыв почвы.

Достоинством площадок с большой длиной является то, что в этом случае обеспечивается ручейковая и межручейковая эрозия, что ближе к реальным условиям для сельскохозяйственных полей. Но при увеличении длины площадки появляются трудности с техническим обеспечением эксперимента: увеличивается размер дождевальной установки, зависящий от площади орошения; увеличивается потребление воды и расход стекающей воды с площадки, что может привести к разработке специального более дорогостоящего оборудования; обеспечение одинаковых скоростей падения капель вдоль площадки.

Недостатком коротких площадок (менее 4,6 метра) является создание условий для слабого проявления (или отсутствия) ручейковой эрозии. Поэтому выбор длины площадки определяется возможностями и задачами, которые решаются при проведении эксперимента. Например, для исследования инфильтрации могут применяться короткие площадки. Но в любом случае при планировании эксперимента и при интерпретации полученных данных необходимо учитывать длину площадки, связанную с отношением ручейковой и межручейковой эрозией.

Организация стоковых площадок проводится обычным образом. Ее рабочая часть, с которой производится учет стока воды и смыва почвы, по бокам и с верху ограждается жесткими водонепроницаемыми стенками, заглубленными в почву на глубину 15 – 20 сантиметров. Нижняя часть площадки оборуду-

ется приемником в виде жесткой конусообразной пластины, плавно сопряженной с поверхностью почвы и имеющей большой уклон по сравнению с уклоном площадки. Через этот приемник вода и наносы поступают в мерные емкости. Площадь орошения должна быть несколько больше по сравнению с площадью рабочего участка.

Подготовке почвы на площадках требуется уделять особое внимание. Почва на глубину промачивания должна быть однородной, чтобы исключить “провальное” впитывание воды. Поверхность площадок должна быть тщательно выровненной, не допускается локальное образование понижений, где наносы могут аккумулироваться. Почва около бортов ограждения и приемника уплотняется, чтобы избежать большой инфильтрации. А чтобы избежать формирования потоков воды вдоль бортов, поверхность почвы здесь должна быть немного выше, чем на остальной поверхности площадки.

Перед дождеванием на всех площадках проводятся измерения влажности и плотности сложения почвы до глубины 40 см. Очень важно, чтобы исходная влажность почвы была одинаковой на всех площадках (если она не является исследуемым фактором).

2. Проведение дождевания

Площадка накрывается водонепроницаемой (полиэтиленовой) пленкой и на нее подается дождь. Далее по расходу воды с пленки устанавливается необходимая интенсивность дождя и убирается пленка. Момент снятия пленки принимается за начало отсчета времени. Фиксируется время t_{cr} , когда начинается сток и в этот момент времени в приемник устанавливается мерная емкость (ведро). Через 20-30 секунд это ведро убирается и сразу ставится другое. Проводится взвешивание ведер с отобранными пробами. Так продолжается в течение времени t_s , которое интересует с точки зрения смыва почвы. Таким образом, происходит полный учет стока и смыва почвы за интервал времени $(t_{cr} - t_s)$.

Заметим, что взятие проб на содержание наносов в воде в некоторые дискретные моменты времени приводит к увеличению погрешности в оценке кумулятивного смыва почвы. Это обусловлено флуктуацией во времени расхода воды и концентрации наносов в потоке. Далее для времени $t > t_s$ расход воды измеряется эпизодически (с интервалом через 5-10 минут и в пятикратной повторности) до его стабилизации. Стабилизация расхода соответствует установившейся скорости впитывания. После этого площадка накрывается пленкой и измеряется расход воды (стекающий с пленки) для определения интенсивности дождя, соответствующей установившейся скорости впитывания и для контроля стабильности интенсивности дождя. На этом дождевание заканчивается.

В дальнейшем емкости с водой и почвой оставляют на длительное время до осаждения наносов. После осаждения чистая вода сливается, а остаток фильтруется, высушивается и взвешивается. По этим данным для каждой емкости определяются количество смытой почвы и объем воды.

3. Обработка результатов измерений и их интерпретация

Смыв почвы. Зная количество смытой почвы за каждый интервал времени (t_{i-1}, t_i) , строятся графики зависимости кумулятивного смыва почвы от эрозионного индекса дождя AI_i , соответствующего моменту времени t_i . Для этого сначала по (1.8) рассчитывается эрозионная характеристика A_i , а затем по (1.9) рассчитывается значение AI_i . Пример таких графиков представлен на рис. 1- 4. Если эксперимент проведен правильно, то зависимость кумулятивного смыва почвы от индекса дождя AI должна быть приближенно линейной. Отклонение от линейной зависимости может быть вызвано следующими причинами: 1) интенсивность дождя не была постоянной; 2) в подготовке стоковой площадки (включая почву) были допущены нарушения.

По данным измерений для каждой площадки строятся уравнения линейной регрессии

$$M = C_1 AI - C_2 = B(AI - AI_{cr}), \quad (3.1)$$

$$B = C_1, \quad AI_{cr} = C_2 / C_1,$$

где M – средний смыв почвы с площадки, т/га; C_1 и C_2 – коэффициенты уравнения регрессии. Величина AI_{cr} (т-м/га) определяет предельное (критическое) значение индекса дождя AI (т-м/га), при превышении которого начинается сток и смыв почвы.

Значение фактора эродируемости почвы K_{AI} (т/т-м) определяется по уравнению регрессии (3.1) для контрольной площадки ($C = P=1$). Из сопоставления (1.1) и (3.1) следует, что

$$K_{AI} = B_{con} / (LS_{con}), \text{ т/т-м.} \quad (3.2)$$

Для оценки значений факторов C и P или их совместного действия используется соотношение (1.2), записанное в следующем виде

$$F = \frac{B_{fac}}{B_{con}} \times \frac{AI - AI_{cr,fac}}{AI - AI_{cr,con}} \times \frac{LS_{con}}{LS_{fac}}. \quad (3.3)$$

Если исследуется один фактор, то F равняется фактору C или P . Если же рассматривается совместное действие факторов C и P , то $F = C \times P$. Следовательно, в общем случае влияние фактора (факторов) может зависеть от эрозионного индекса дождя. В частном случае при $AI_{cr,con} = AI_{cr,fac}$ или при $AI \gg AI_{cr,con}$ и при $AI \gg AI_{cr,fac}$ значение F будет постоянной величиной.

Среднемноголетние потери почвы от естественных дождей рассчитываются по уравнению

$$M_{av} = \frac{1}{T} \sum M_i, \text{ т/га год,} \quad (3.4)$$

где T – период, за который проводится усреднение, лет; M_i – потери почвы от i -го естественного дождя с индексом AI_i , рассчитываемые по (1.1), т/га. Суммирование в (3.4) проводится для всех дождей, выпавших за период времени T . При этом учитываются только дожди, для которых $AI_i > AI_{cr}$. При расчете среднемноголетних потерь почвы для естественных условий должны использо-

ваться данные, полученные при исходной влажности почвы 0,7 – 0,8 предельной полевой влагоемкости (Сухановский и др., 2003).

Инфильтрация. В уравнении (1.3) $K_{cr} = I$, установившаяся скорость впитывания K_{∞} рассчитывается по (1.4), значение AI_{cr} рассчитывается по (1.8) и (1.9) при зафиксированном времени начала стока t_{cr} . Значение неизвестного параметра α определяется из условия наилучшего совпадения рассчитанных по (1.6) и измеренных значений коэффициентов стока. Таким образом, для условий проведения эксперимента зависимость скорости впитывания (1.3) может применяться и для естественного дождя, если для него значение индекса AI выразить как функцию от времени.

4. Примеры проведения экспериментов

Рассмотрим несколько примеров дождевания стоковых площадок. Во всех этих примерах (если не оговорено специально) длина площадки была 5 метров, ширина – 1 метр, диаметр капель – 4,2 мм, высота их падения – 2 метра.

Пример 1. Оценка значения фактора C для посевов кукурузы и вико-овсяной смеси (Сухановский, Рязанцева, Агарков, 2003). Проведено дождевание трех площадок с одинаковым уклоном и одинаковой исходной влажностью почвы. Одна площадка была контрольной, на двух других площадках были посева кукурузы и вико-овсяной смеси. На момент дождевания развитие растений соответствовало фазе третьего листа, биомасса кукурузы составила 189 кг/га, а вико-овсяной смеси – 596 кг/га.

На рис. 4.1 показаны полученные зависимости смыва почвы от индекса дождя AI , а в табл. 4.1 представлены полученные коэффициенты уравнения регрессии (3.1 -14). Принимая приближенно, что для всех трех случаев значения AI_{cr} одинаковые, по (3.3 -16) оценивается значение фактора C (в данном случае $F=C$). Полученные результаты представлены в табл. 4.1.

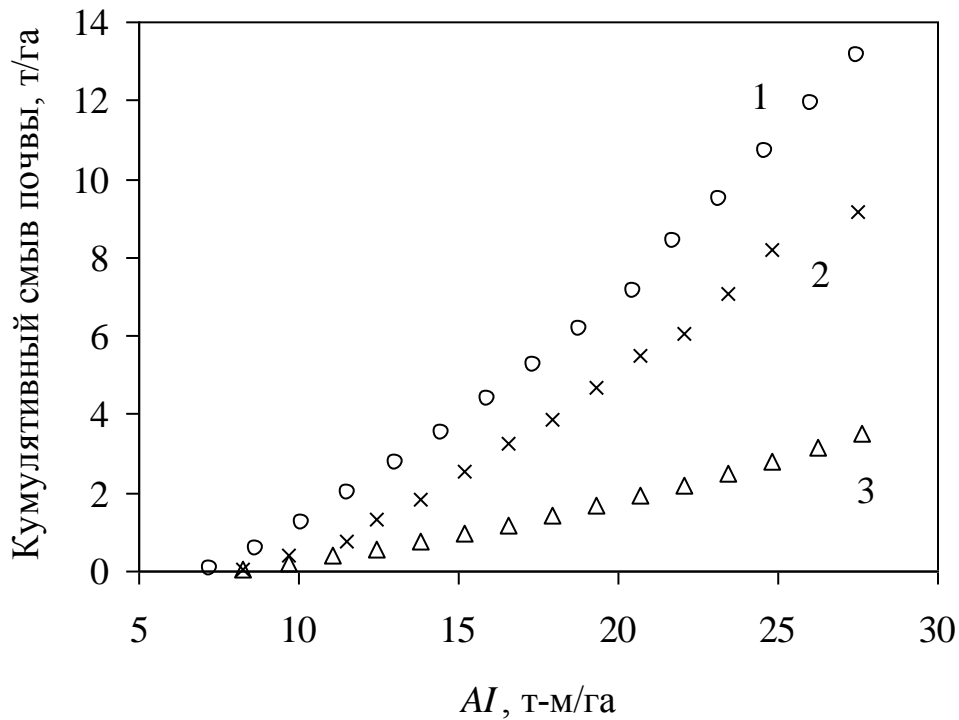


Рис.4.1. Зависимость измеренного смыва почвы от индекса дождя AI : 1 – контроль, 2 – кукуруза; 3 – вико - овсяная смесь.

Таблица 4.1. Результаты экспериментов с посевами кукурузы и вико-овсяной смеси

Параметр	Контрольная площадка	Кукуруза	Вико-овсяная смесь
B , т/т-м	0,647	0,498	0,177
AI_{cr} , т-м/га	8,48	9,52	9,13
Фактор C	1,00	0,77	0,27

Пример 2. Эффективность мульчирования почвы соломой (Сухановский и др., 1999). Были одинаково подготовлены стоковые площадки (с одинаковым уклоном). Одна площадка служила контролем, а в почву на двух других площадках на глубину 5 сантиметров была заделана солома с дозой соответственно 2 и 4 т/га. Высота падения капель была 3,5 метра.

Для всех трех площадок на рис. 4.2 показаны полученные зависимости кумулятивного смыва почвы от индекса дождя AI . На этом же рисунке (правая ось ординат) показана повторяемость дождевых осадков, зарегистрированных

на Нижнедевицкой воднобалансовой станции (Воронежская область) за период 1959 – 1988 год. Максимальное значение индекса дождя за

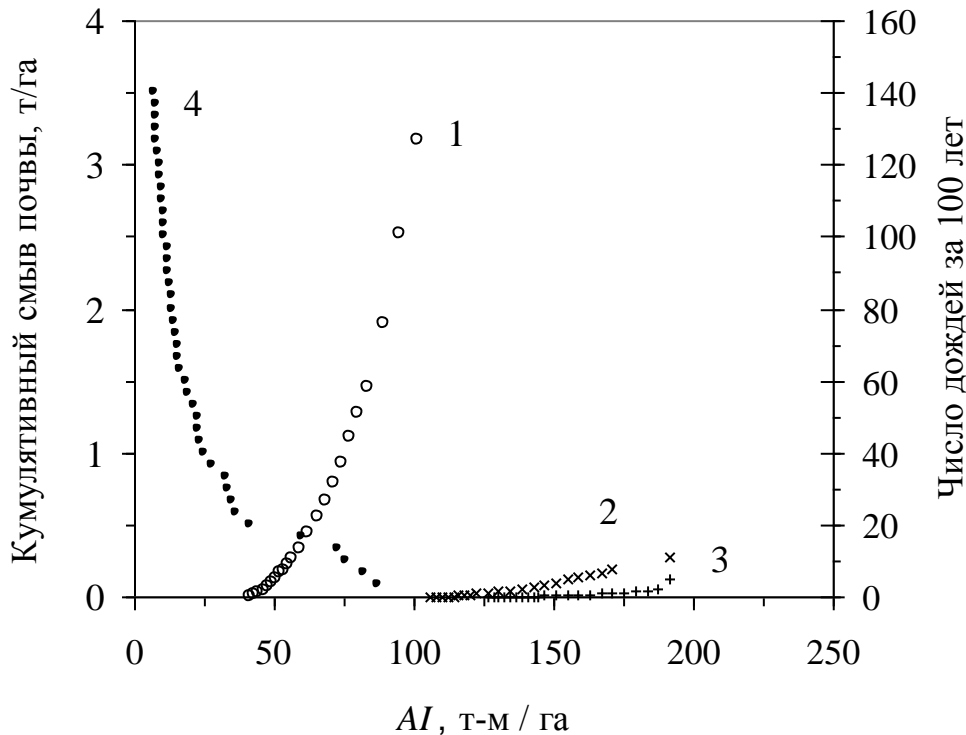


Рис. 4.2. Зависимость измеренного смыва почвы от индекса дождя AI : 1 – контроль; 2, 3 – мульчирование с дозой соответственно 2 и 4 т/га; 4 – повторяемость выпадения естественных дождей.

30-ти летний период $AI_{max} = 87$ т-м/га. Из данных, представленных на рис. 4.2, следует, что даже при этом максимальном значении индекса дождя смыв почвы не происходит. Таким образом, мульчирование почвы соломой является эффективным способом предотвращения смыва почвы.

Пример. 3. Влияние исходной влажности почвы (Сухановский и др., 1999). Эксперимент проведен на трех одинаково подготовленных площадках (без растительности) с влажностью почвы 6-7% в слое 0-10 см и 10% в слое 10-30 см. Одна площадка служила контролем, а две остальные были увлажнены соответственно со слоем осадков 8,9 и 16,1 мм. На рис. 4.3 показаны полученные зависимости смыва почвы от индекса AI . По данным измерений для каждой площадки получены уравнения регрессии (3.1). Учитывая, что для условий

эксперимента $B=K_{AI} \times LS$, из этого равенства при $LS = 0,31$ рассчитывались значения фактора эродуемости почвы K_{AI} . Полученные результаты представлены в табл. 4.2.

Из данных, представленных на рис. 4.3 и в табл. 4.2, следует, что предварительное увлажнение почвы приводит к уменьшению значения AI_{cr} и к увеличению значения фактора эродуемости почвы K_{AI} .

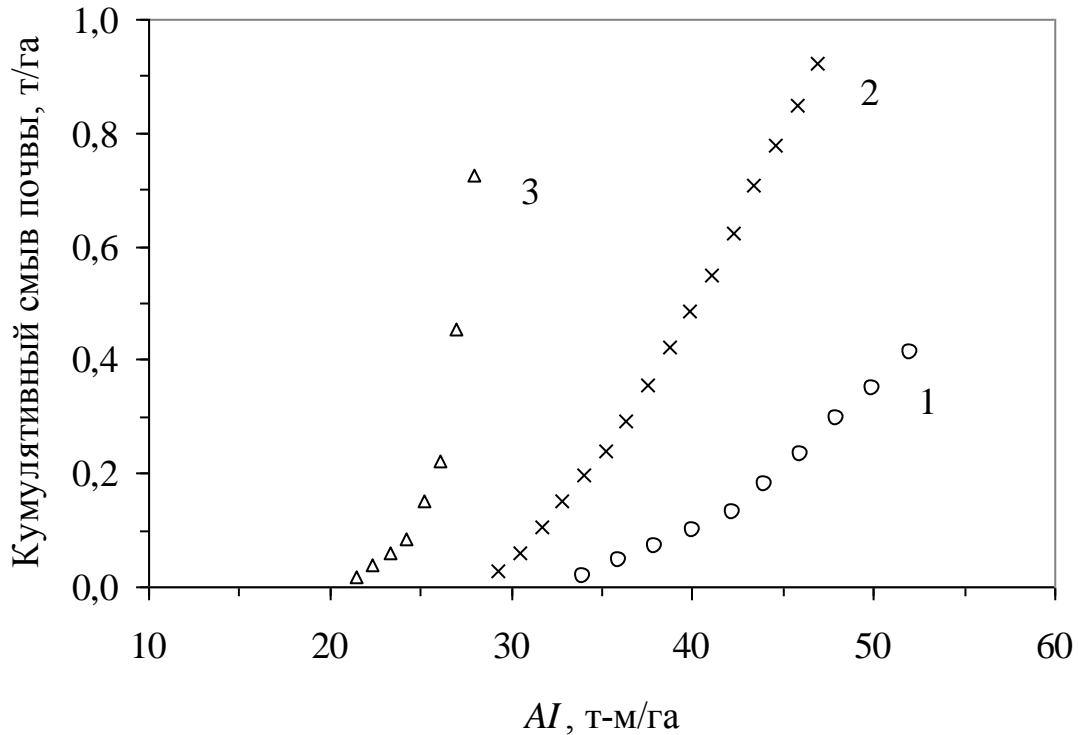


Рис. 4.3. Зависимость измеренного смыва почвы от индекса дождя AI : 1- контроль; 2, 3 – увлажнение почвы соответственно 8,9 и 16,1 мм.

Таблица 4.2. Результаты экспериментов по влиянию увлажнения почвы на ее смыв

Параметр	Увлажнение стоковых площадок, мм		
	0	8,9	16,1
AI_{cr} , т-м/га	34,7	30,0	22,4
B , т/т-м	0,022	0,052	0,097
K_{AI} , т/т-м	0,07	0,17	0,31

Пример 4. Оценка среднемноголетнего смыва почвы в состоянии пара для условий Центрально-Черноземной зоны (почва – чернозем) и для Краснодарского края (почва – бурая лесная) (Сухановский и др., 2003). В обоих случаях исходная влажность почвы была 0,7 – 0,8 наименьшей полевой влагоемкости. В Центрально-Черноземной зоне эксперимент проведен на стоковой площадке с уклоном 3,5% ($LS = 0,247$), в Краснодарском крае на площадке с уклоном 13,4% ($LS = 0,748$).

На рис. 4.4 для обоих случаев представлены полученные зависимости смыва почвы от индекса дождя AI . По этим данным получены уравнения регрессии (3.1). Для условий проведения экспериментов фактор эродируемости почвы $K_{AI} = B/LS$. Полученные результаты представлены в табл. 4.3. Из данных табл. 4.3 следует, что значения AI_{cr} для обоих типов почв близкие, а

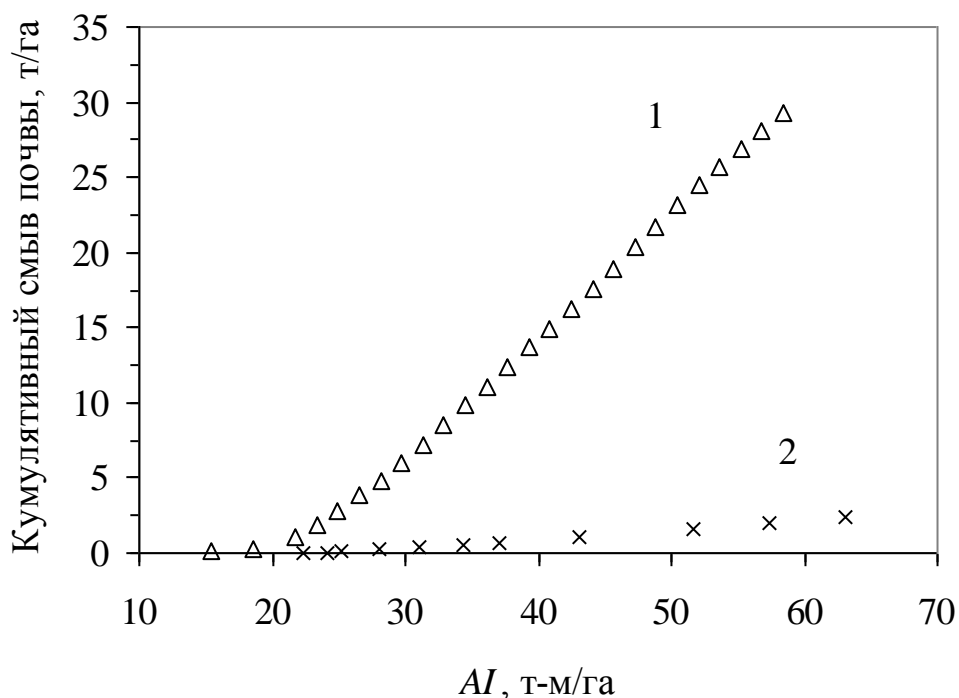


Рис. 4.4. Зависимость измеренного смыва почвы от индекса дождя AI : 1- Краснодарский край (почва – бурая лесная); 2 – Центрально-Черноземная зона (почва – чернозем).

Таблица 4.3. Значения параметров смыва почвы, полученные по данным экспериментов

Почва	B , т/т-м	AI_{cr} , т-м/га	K_{AI} , т/т-м
Чернозем (Центрально-Черноземная зона)	0,0585	23,9	0,24
Бурая лесная (Краснодарский край)	0,7529	20,4	1,0

фактор эродуемости почвы K_{AI} для чернозема в 4 раза меньше, чем для бурых лесных почв.

Определив по результатам дождевания значения AI_{cr} и K_{AI} , по уравнению (1.1) можно рассчитать смыв почвы для естественных дождей, а по уравнению (3.4) оценить среднемноголетние потери почвы. Чтобы корректно сопоставить потери почвы для двух различных регионов, расчет проведен для склона длиной 90 метров и с уклона 9% (значения факторов $LS=2,0$, $C=P=1$). Для Центрально-Черноземной зоны использованы зарегистрированные дожди за 30 лет на Нижнедевицкой воднобалансовой станции (Воронежская область), а для Краснодарского края использованы данные метеостанции Горячий Ключ за 21 год. Полученные результаты расчетов представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Среднемноголетние потери почвы для склонов с длиной 90 м и с уклоном 9%, рассчитанные по данным экспериментов

	Период усреднения T , лет	Количество дождей:		Среднемноголетние потери почвы, т/га год
		за период усреднения*	с $AI > AI_{cr}$	
Центрально-Черноземная зона	30	196	12	5,2
Краснодарский край	21	237	24	37,7

- - количество дождей со слоем больше 10 мм.

Пример 5. Влияние длины стоковой площадки на смыв почвы, когда ее длина меньше 4,6 метра. Как отмечалось выше, с уменьшением длины увеличи-

вается вклад межручейковой эрозии (разбрызгивание почвы дождевыми каплями). Оценим значения параметра m (1.13), характеризующего влияние фактора длины L (1.12) на смыв почвы в уравнении (1.1). С этой целью были одинаково подготовлены три стоковые площадки длиной 5 метров: на тяжелосуглинистый чернозем нанесен слой серой лесной почвы толщиной 15 см. Первая площадка дождевалась полностью, вторая – на половину, а на третьей площадке дождеванию подвергалась нижняя часть длиной 1,2 метра. Характеристики площадок и дождевания приведены в табл. 4.5. На рис. 4.5 показано состояние поверхности почвы после дождевания. Из этого рисунка видно, что с уменьшением длины уменьшается формирование ручейка, то есть изменяется отношение ручейковой эрозии к межручейковой, что, в свою очередь, влияет на значение параметра m . Как отмечалось выше, в зависимости от восприимчивости почвы к ручейковой эрозии, в формулу (1.13) вместо параметра β подставляется этот параметр, умноженный на некоторый коэффициент, обозначим его через K_β . Тогда формула (1.13) примет следующий вид

$$m = \beta K_\beta / (1 + \beta K_\beta). \quad (4.1)$$

Для длины площадки 5 м (больше 4,6 м) значение поправочного коэффициента $K_\beta = 1$. Значения коэффициента K_β (следовательно, и значения параметра m) для более коротких площадок оценим следующим образом.

Рассмотрим величину смыва почвы M_{st} , приведенную к стандартным условиям (факторы $L = S = C = P = 1$). Учитывая, что для условий проведения эксперимента $C = P = 1$, из уравнения (1.1) следует

$$M_{st} = \frac{(AI - AI_{cr}) K_{AI}}{L \times S}. \quad (4.2)$$

Из (4.2) следует, что для всех трех площадок измеренные значения приведенного смыва почвы должны описываться одной и той же зависимостью от величины $(AI - AI_{cr})$. Следовательно, можно для двух коротких площадок по-

Рис. 4.5. Состояние поверхности почвы после дождевания
(фото Олешицкого В.В.)

добрать значения коэффициента K_β , чтобы измеренные значения M_{st} описывались приблизительно одной зависимостью. В результате были получены следующие значения: для площадки с длиной 2,5 м $K_\beta = 2,8$, а для площадки с длиной 1,2 м $K_\beta = 3,8$. Затем по формуле (4.1) были рассчитаны значения параметра m . На рис. 4.6 показана зависимость измеренного приведенного смыва почвы от $(AI - AI_{cr})$ при полученных значениях коэффициента K_β . А на рис. 4.7 показана зависимость параметра m от длины площадки. Из последнего рисунка следует вывод, что при уменьшении длины с 5 до 3 метров возрастает вклад межручейковой эрозии, а затем он остается примерно одинаковым.

Таким образом, дождевание можно проводить и на коротких площадках, но с учетом изменения параметра m .

Таблица 4.5. Характеристики площадок и дождевания

№ площадки	Длина, м	Уклон, %	Интенсивность дождя, мм/мин	AI_{cr} , т-м / га
1	5,0	6,8	1,43	5,4
2	2,5	7,2	1,54	5,8
3	1,2	5,2	1,74	8,0

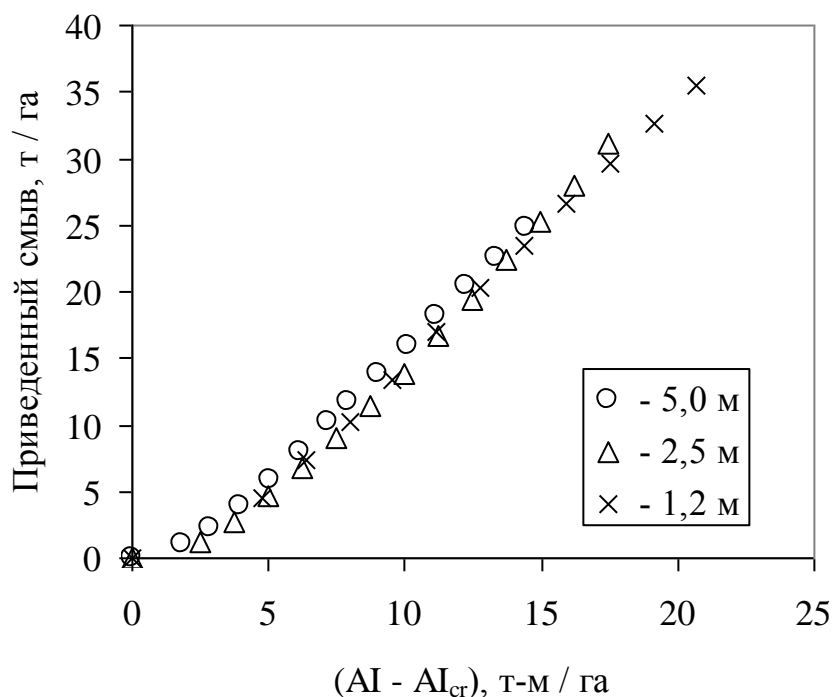


Рис. 4.6. Зависимость приведенного смыва от величины $(AI - AI_{cr})$

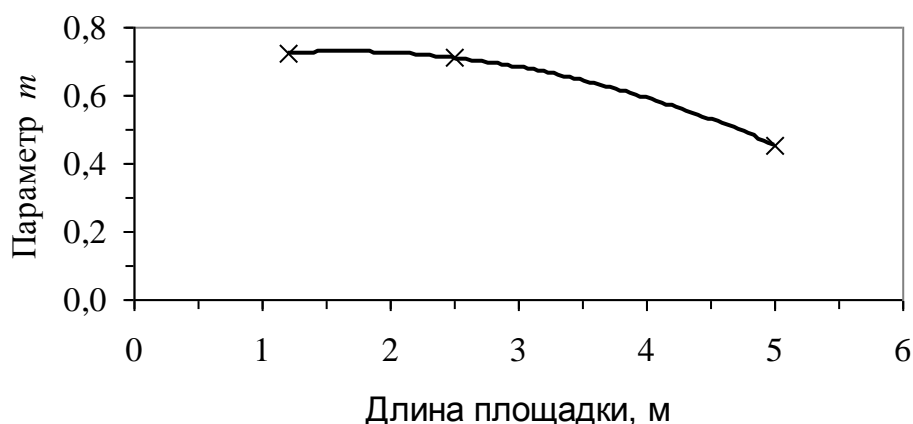


Рис. 4.7. Зависимость параметра m от длины площадки

Пример 6. Инфильтрация: оценка значений параметров в формуле (1.3). Для этого использованы данные экспериментов, описанные в примере 4 (Сухановский, 2003). В табл. 4.6 представлены результаты этих экспериментов. На рис. 4.8 приводится сопоставление измеренных и рассчитанных значений коэффициента стока (для обоих случаев расчет проведен при $\alpha = 1,6$, точность расчета равняется 2,7%). Из данных, представленных на рис. 4.8, следует, что для обоих типов почвы коэффициент стока практически описывается одной и той же зависимостью (1.6).

Таблица 4.6. Условия и результаты дождевания

Показатели	Курская область	Краснодарский край
Уклон площадки, %	3,5	11
Высота падения капель, м	2,0	2,0
$I=K_{cr}$, мм/мин	1,88	1,76
Время до стока, мин	6,0	5,5
Слой осадков до стока, мм	11,3	9,7
$A_{ср} \times 10^3$, Дж/м ²	0,97	0,78
$K_{уст}$, мм/мин	0,35	0,35
α^* , безразмерная	1,6	1,5
$\varepsilon_{ср.вз.}$, %	12	0,7

* - значения подобраны из условия минимума $\varepsilon_{ср.вз.}$

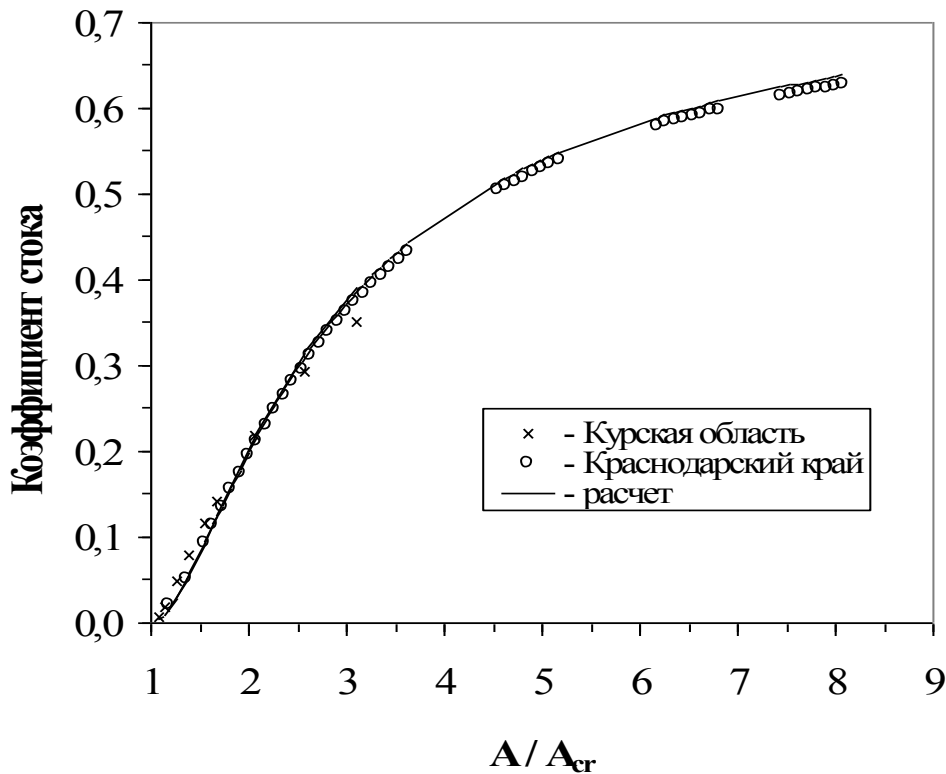


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента стока от отношения A/A_{cr}

Пример 7. Механизм вымывания из почвы биогенных веществ поверхностным стоком изучен слабо. Поэтому необходимы экспериментальные данные, которые позволили бы разрабатывать модели этого процесса. Можно предположить, что чем больше время контакта стекающей воды с поверхностью почвы, тем больше должно происходить вымывание химических элементов. А продолжительность контакта связана с длиной склона. Поэтому на примере нитратного азота была поставлена задача оценить влияние длины стоковой площадки на вынос химических элементов. При этом использовались данные эксперимента, описанного в примере 5. Дополнительно к этим данным были получены данные по концентрации нитратного азота в стекающей воде (брались пробы на анализ за те же интервалы времени, за которые измерялся объем воды).

Для анализа зависимости концентрации нитратного азота от времени лучше рассматривать зависимость концентрации от слоя стока за это время. На

рис. 4.9 для всех трех площадок показана зависимость концентрации нитратного азота от слоя стока, соответствующего времени измерения концентрации. На рис. 4.10 представлена полученная зависимость кумулятивного выноса нитратного азота с единицы площади почвы от слоя стока воды. По этим данным получено регрессионное уравнение $M_{NO_3} = 1,08 Y^{0,67}$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,88$, где M_{NO_3} – вынос нитратного азота с единицы площади поверхности почвы ($\text{мг} / \text{м}^2$), Y – слой стока (мм). Это уравнение с точностью 21% описывает данные измерений всех трех площадок.

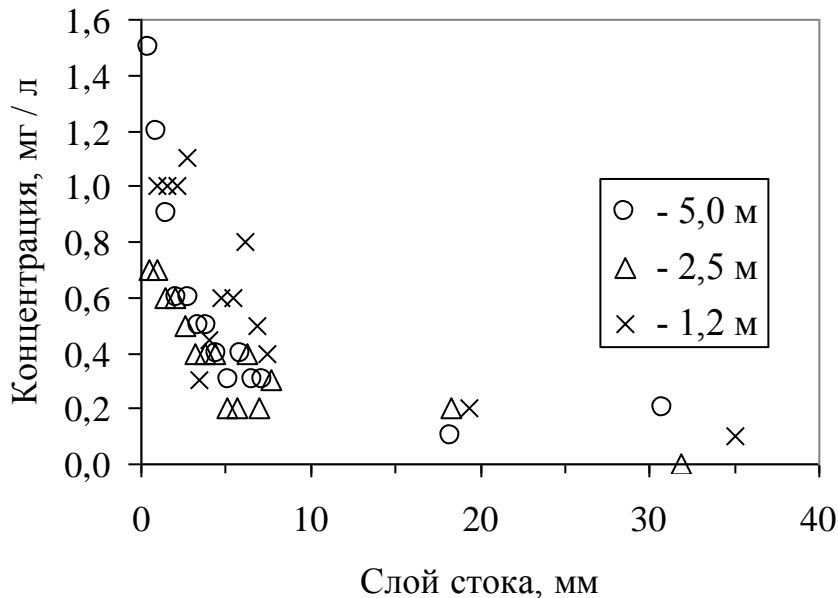


Рис. 4.9. Зависимость концентрации нитратного азота от слоя стока воды, соответствующего времени измерения концентрации

На основе полученных данных можно сделать вывод: вынос нитратного азота с единицы площади поверхности почвы приблизительно не зависит от длины стоковой площадки, а зависит от слоя стока. С практической точки зрения это означает следующее: 1) исследование этого процесса можно проводить на коротких площадках, что упрощает проведение экспериментов, особенно в полевых условиях; 2) полученные данные можно использовать и для естественных дождей (строго говоря, для условий проведения эксперимента).

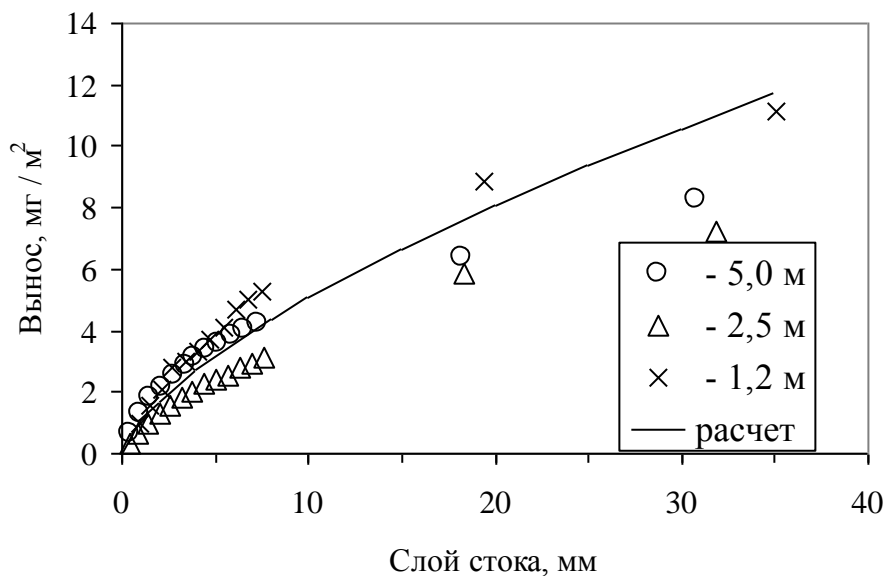


Рис. 4.10. Зависимость кумулятивного выноса нитратного азота с единицы площади поверхности почвы от слоя стока воды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главное достоинство описанной методики дождевания стоковых площадок заключается в том, полученные результаты экспериментов можно применять для естественных дождей (строго говоря, для условий, для которых проведены эксперименты). Это существенно сокращает временные и материальные затраты по сравнению с получением натуральных данных, период наблюдений для которых должен быть не менее примерно 20-25 лет.

Использование монодисперсного дождя (одинаковые размер и скорость падения капель) с постоянной интенсивностью и коротких стоковых площадок значительно упрощает технику проведения эксперимента, обработку и интерпретацию данных измерений. Все это в целом позволяет за короткое время получать разнообразные данные по инфильтрации, смыву почвы и выносу химических элементов с поверхности почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даскалов И.Т. О скорости падения капель //Научные доклады симпозиума стран членов СЭВ по теме 4.3 "Разработка мероприятий по борьбе с эрозией почв". ВНР. Комполът. 1978. С. 53-63.
2. Мирцхулава Ц.Е. Водная эрозия почв. Тбилиси: МЕЦНИЕРЕБА. 2000. 424 с.
3. Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос. 1970. -239 с.
4. Сухановский Ю.П. Методика дождевания стоковых площадок в исследовании эрозии почв // Почвоведение. 2005 (в печати).
5. Сухановский Ю.П., Оллеш Г., Хан К.Ю., Майснер Р., Роде М., Волокитин М.П., Сон Б.К. Применимость универсального уравнения потерь почвы от эрозии (USLE) для условий Европейской территории России // Почвоведение. 2003. №6. С. 733-739.
6. Сухановский Ю.П., Оллеш Г., Хан К.Ю., Майснер Р., Роде М., Волокитин М.П., Сон Б.К. Применимость универсального уравнения потерь почвы от эрозии (USLE) для условий Европейской территории России // Почвоведение. 2003. №6. С. 733-739.
7. Сухановский Ю.П., Рязанцева Н.В., Агарков В.А. Применение метода дождевания в оценке эффективности противозерозионных приемов // В сб. Модели и технологии оптимизации земледелия. Курск. Курский ЦНТИ. 2003. С. 468-470.
8. Сухановский Ю.П., Санжаров А.И., Санжарова С.И., Горин В.Б., Агарков В.А., Чуян Г.А., Карпинец Т.В., Виноградов Ю.А. Метод дождевания в почвенно-эрозионных исследованиях / Под ред. В.М. Володина и Ю.П. Сухановского. Курск: Изд. центр "ЮМЭКС". 1999. 68 с.
9. Сухановский Ю.П., Хан К.Ю. Эрозионная характеристика дождя // Почвоведение. 1983. № 9. С. 123-125.

10. Сухановский Ю.П. Гидродинамическая модель капельной эрозии почвы // Теоретические и практические вопросы почвозащитного земледелия. Научн. техн. бюлл. ВНИИЗиЗПЭ. 1981. Вып. 1(28)-81. С. 29-34.
11. Хмельницкий А.В. Отрыв и перенос частиц при ударе капель воды о поверхность почвы // Физические проблемы мелиораций и обработки почв. Л.: Колос. 1970. С. 80-87.
12. Швевс Г.И. Материалы к изучению эродирующего действия капель воды // Почвоведение. 1968. № 2. С. 133-140.
13. Ellison W.D. Soil erosion studies. Part 3. Soil detachment hazard by rain-drop splash // Agriculture engineering. 1947. V. 28. № 5. P. 197-201.
14. Ellison W.D. Studies of raindrop erosion // Agriculture engineering. 1944. V. 25. № 4. P. 131-135. № 5. P. 181-182.
15. Meyer L.D. Philosophy and development of simulated rainfall for erosion control research // Amer. Soc. of Agric. Engineers. Paper № 63-724.
16. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., MacCool D.K., Yoder D.C. (coordinators) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Handbook No. 703. 1997. 404 pp.
17. Sukhanovski Y.P., Ollesh G., Khan K.Y., Meisner R. A new index for rainfall erosivity on a physical basis // J. Plant Nutrition and Soil Science. 2002. № 165. P. 51-57.
18. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agricultural handbook No. 537. Washington. 1978. 65 p.
19. Wischmeier W.H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation // Soil Science Society of America Proceedings 23. 1959. P. 246-249.
20. Young R.A., Burwell R.E. Prediction of runoff and erosion from natural rainfall using a rainfall simulator // Soil Science Soc. America Proceedings. 1972. V. 36. № 5. P. 827-830.

Методика дождевания стоковых площадок для исследования эрозионных процессов (Под редакцией доктора сельскохозяйственных наук Ю.П. Сухановского). Курск. ВНИИЗиЗПЭ РАСХН. 2005. – 30 с.

Сдано в набор 14.10.2005 г. Подписано в печать 14.10.2005 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага Айсберг. Объем 2,0 усл. печ. л.
Гарнитура Times New Roman
Тираж 150 экз. Заказ № 176.

Отпечатано: ПБОЮЛ Киселева О.В.
ОГРН 304463202600213