

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
**«КУРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»**  
(ФГБНУ «Курский ФАНЦ»)

**А. В. Прущик, Ю. П. Сухановский, В. А. Вытовтов,  
Ю. О. Рубаник, С. А. Тарасов**

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

**ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОРТАТИВНОЙ ЛАБОРАТОРНО-ПОЛЕВОЙ  
ДОЖДЕВАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
**«КУРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»**  
(ФГБНУ «Курский ФАНЦ»)



А. В. Прущик, Ю. П. Сухановский, В. А. Вытовтов,  
Ю. О. Рубаник, С. А. Тарасов

**Методические рекомендации  
по применению портативной лабораторно-полевой  
дождевальной установки**

Курск – 2024

УДК 631.6.02:631.421.2  
ББК 40.7  
П 85

Прущик Анастасия Викторовна

**Методические рекомендации по применению портативной лабораторно-полевой дождевальной установки [Текст] : брошюра / А. В. Прущик, Ю. П. Сухановский, В. А. Вытовтов, Ю. О. Рубаник, С. А. Тарасов. – Курск : ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2024. – 49 с. – ISBN 978-5-6052912-5-1**

Методические рекомендации разработаны на основе экспериментальных исследований, проведенных в 2019-2024 гг., с применением авторского устройства – портативной лабораторно-полевой дождевальной установки, на базе ФГБНУ «Курский ФАНЦ». Описана конструкция дождевальной установки, рекомендации по проведению экспериментов для измерения впитывающей способности почв, выноса со стоком химических элементов, в том числе и тяжелых металлов.

Брошюра рассчитана на ученых и специалистов в области эрозии почв, агропочвоведения, экологии, других смежных сельскохозяйственных и биологических дисциплин, как руководство по проведению экспериментальных исследований с применением метода физического моделирования дождевых осадков на малых стоковых площадках.

Область применения – земледелие, агропочвоведение, экология.

Рецензент:

***В. К. Кузнецов** – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» - ВНИИРАЭ*

Брошюра рассмотрена и одобрена Ученым советом ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (протокол № 14 от 22 ноября 2024 г.)

Работа выполнена в соответствии с темами государственного задания № 0632-2019-0017 и FGUW-2022-0002 ФГБНУ «Курский ФАНЦ» на 2019-2024 г.

© А. В. Прущик, Ю. П. Сухановский, В. А. Вытовтов,  
Ю. О. Рубаник, С. А. Тарасов, 2024

© Курский федеральный аграрный научный центр, 2024

ISBN 978-5-6052912-5-1

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
<b>Глава 1. История использования дождевальных установок.....</b>	<b>5</b>
1.1. Естественные дожди и проблема их физического моделирования...	5
1.2. Конструкции дождевальных установок.....	8
<b>Глава 2. Методика проведения исследований.....</b>	<b>16</b>
<b>Глава 3. Примеры проведения экспериментов.....</b>	<b>24</b>
3.1. Исследование впитывающей способности почвы.....	24
3.2. Исследование выноса химических элементов со стоком.....	35
Заключение.....	44
Список использованных источников.....	45

## ВВЕДЕНИЕ

Многообразие природно-климатических условий, характерных для различных регионов, делает практически невозможным исследование процессов водной эрозии почв исключительно на основе натуральных наблюдений.

Для исследования водной эрозии почв необходимо проведение активных экспериментов. Такой подход позволяет создать необходимые условия для исследуемых процессов. Среди методов, используемых в экспериментальных исследованиях, выделяют физическое моделирование. Измерения проводят на уменьшенной физической модели оригинала, а полученные результаты измерений используют для оригинала. Такие методы существенно сокращают время на проведение экспериментов.

Для физического моделирования дождей используют специальные установки. Важным достоинством методов моделирования служит то, что полученные результаты измерений для искусственных дождей можно использовать для любых естественных дождей. Полученные экспериментальные данные необходимы для разработки и проверки математических эрозионных моделей, прогнозов, а также для их использования при проведении мероприятий по защите почв от эрозии.

Метод физического моделирования дождя с применением портативной лабораторно-полевой дождевальной установки может быть использован для любых почвенно-климатических условий, где выпадают дожди.

# ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ УСТАНОВОК

## 1.1. Естественные дожди и проблема их физического моделирования

Значительная доля вклада в интенсивность проявления эрозионных процессов принадлежит дождям.

Дождь – это атмосферные осадки в виде капель воды, имеющие диаметр до 7 мм [1].

Следует отметить, что естественные дожди очень разнообразны по структуре, которая со временем изменяется случайным образом. Ее определяют по распределению капель дождя по размеру и скорости их падения. Как следствие, интенсивность дождя также изменяется во времени, а продолжительность дождя – случайная величина [2].

Морозящие дожди и ливни представляют собой два различных типа атмосферных осадков, которые значительно отличаются друг от друга, как по своему характеру, так и по воздействию на почву.

Моросью называют осадки с размером диаметра капель менее 0,5 мм, и с точки зрения, дождевой эрозии не рассматриваются. В отличие от морозящих дождей ливни имеют гораздо более высокую интенсивность и меньшую продолжительность. Во время такого дождя большая часть осадков выпадает за короткий промежуток времени, что может привести к формированию на почве поверхностного потока воды. Для них характерны крупные капли. Укрупнение размеров капель ведет к увеличению их силы удара о поверхность почвы и разрушения почвенных агрегатов. Как следствие образовывается «почвенная корка», существенно уменьшающая впитывающую способность почвы.

Удар капель воды подобен взрыву, в результате которого разлетаются в разные стороны частицы почвы. Это называют капельной эрозией почвы, её экспериментальные исследования и математическая модель приведены в

монографии «Моделирование водной эрозии почв» [3]. С другой стороны, удары капель о поток воды, стекающей с поверхности почвы, увеличивают количество почвы, поступающей в поток.

Следовательно, от структуры дождя и его продолжительности зависит динамика впитывающей способности почвы, а значит, и слой стока, и количество смытой почвы. Практически невозможно разработать такую дождевальную установку, которая могла бы создавать искусственный дождь точно такой же, как любой зарегистрированный естественный дождь.

История использования дождевальных установок на стоковых площадках насчитывает многие десятилетия. Главные достоинства применения дождевальных установок – независимость от погодных условий, сокращение временных затрат на проведение эксперимента.

В начале XX века ученые стали более детально исследовать воздействия дождей на почву, занимающих ключевую роль в процессах водной эрозии. Первые эксперименты, направленные на исследование влияния различных параметров дождя, проводили в 1930-х годах [1-6].

В 1950-х и 1960-х годах были разработаны инженерные установки для создания искусственных дождей, позволяющие проводить систематические эксперименты на стоковых площадках. В них использовали разные каплеобразователи с целью имитации естественных дождей. В это же время была начата разработка стандартов для проведения дождеваний, которые обеспечивали бы сопоставимость результатов между различными исследованиями [3, 7, 8].

Современные исследования в области дождевания стоковых площадок продолжают совершенствоваться, активно применяя новые технологии, такие как электронные датчики для мониторинга влажности почвы, системы автоматического управления и анализа данных. Необходимость получения экспериментальных данных связана с потребностью в разработках и проверки математических эрозионных моделей, а также для их использования при принятии практических мер по защите почв от эрозии [3]. Применение

геоинформационных систем и математического моделирования также позволяет значительно повысить точность прогнозов и понимания процессов, связанных с водной эрозией [9, 10, 11].

В России этот метод получил значительное развитие благодаря работам таких ученых, как Захаров С. А., который внес весомый вклад в исследование процессов водной эрозии и изучение факторов, влияющих на их интенсивность. Исследования Вознесенского А. С. привнесли понимание микромасштабных процессов, происходящих в верхнем слое почвы, а Гусак В. Б. сосредоточился на количественной оценке потерь почвы под действием дождевых осадков.

Федоров С. Р. глубоко исследовал влияние растительности на устойчивость почвы к эрозии, а Бефани Н. Ф. осуществила систематизацию и анализ данных по экспериментам с дождеванием, что дало возможность более точно прогнозировать последствия эрозионных процессов. Швевс Г. И. и Сластухин В. В. изучали влияние разных типов почвы на их восприимчивость к эрозии, проводя верификацию своих моделей на основе полевых экспериментов.

Федотов В. С. и Сурмач Г. П. исследовали влияние климатических условий на процессы дождевой эрозии, предлагая методы, которые могут быть адаптированы для различных регионов России. Сухарев И. П. сосредоточился на разработке технологий, направленных на минимизацию эрозионных потерь, что важно для устойчивого сельского хозяйства [1]. В то время не было ответа на вопрос: как можно использовать для естественных дождей результаты измерений, полученные при дождевании (для искусственных дождей)?

Для ответа на этот вопрос были разработаны три метода физического моделирования дождевых осадков [3]: метод дождевания для смыва почвы, метод дождевания для впитывающей способности почвы и метод дождевания для потерь из почвы растворенных веществ. Методика применения двух последних методов приведена в Главе 2.



## 1.2. Конструкции дождевальных установок

Стоковые площадки чаще выбирают в форме прямоугольника или окружности. В такой же форме размещают образователи капель дождя. В зависимости от способа получения капель, дождевальные установки разделяют на капельные (образуются капли примерно одинакового размера, падающие с одинаковой скоростью) и насадковые (когда струя воды распадается на капли разного размера, летящих с разной скоростью).

В капельных установках капли формируются за счет отверстий в дне сосуда с водой, нитей, выпускаемых воду из таких отверстий, капиллярных трубок и медицинских игл, вставляемых в дно сосудов. Эти установки создают одинаковые крупные капли, падающие с одинаковой высоты.

Мелкокапельный дождь создается в два этапа: сначала с использованием насадковых установок формируется крупнокапельный дождь, а затем он дробится на специальной сетке, натянутой над поверхностью почвы.

Дождевальные установки разных размеров широко используют и в настоящее время [5, 12-18]. Группа исследователей занимается дождеванием для исследования впитывающей способности и противоэрозионной устойчивости почв, что позволяет им ограничиться малыми площадями орошения, при этом получать интересующие их характеристики. Георгий Пантелеймонович Сурмач считал, что впитывающая способность, определенная при дождевании, относится к максимально возможной. Неонила Феофановна Бефани утверждала, что можно достаточно корректно определять впитывающую способность почвы с использованием дождевания малых стоковых площадок.

В ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» (и ранее во Всероссийском научно-исследовательском институте земледелия и защиты почв от эрозии (ВНИИЗиЗПЭ)) использовали дождевальные установки капельного типа. На первых этапах исследования применяли установки, в которых каплеобразователями служили гвозди (рис. 1).



Рисунок 1 – Дождевальная установка с каплеобразователями – гвоздями (фото из диссертации Е. А. Гаршенева)

Такие дождевальные установки имели простую конструкцию, состоящую из несущей рамы (1), дождевого сита (2), питающей емкости (3) и опорных стоек (4). Устройство обеспечивало относительно равномерное распределение капель по площади орошения. Диапазон изменения интенсивности дождевания варьировал в пределах от 0,4 до 12 мм/мин. Интенсивность дождя в течение эксперимента уменьшалась по причине скопления пузырьков воздуха.

Позднее каплеобразователи-гвозди заменили медицинскими иглами, что обеспечило меньший разброс в размерах капель дождя (рис. 2-3).



Рисунок 2 – Дождевальная установка  
с каплеобразователями – медицинскими иглами  
(фото из архива лаборатории моделирования эрозионных процессов)

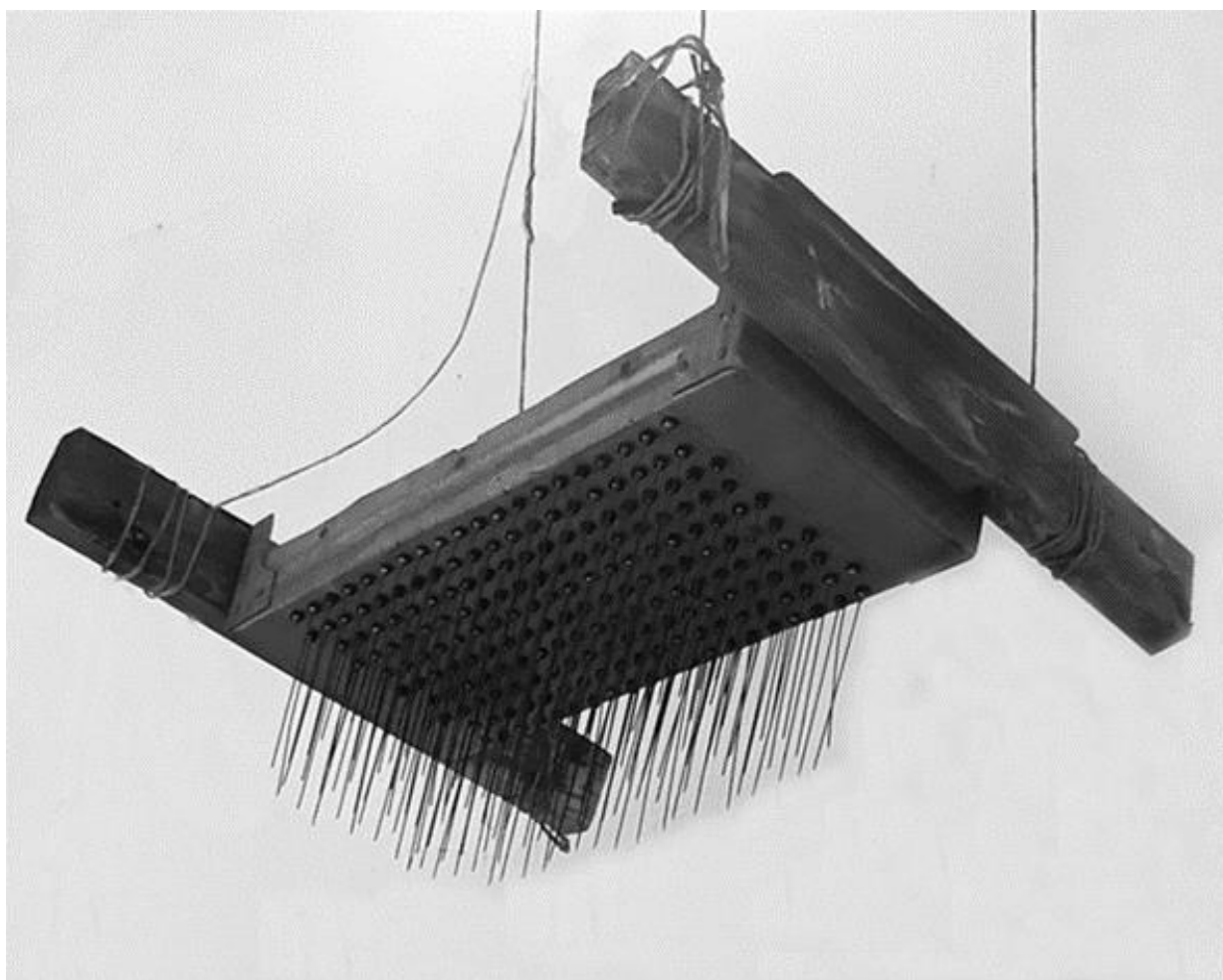


Рисунок 3 – Лабораторная дождевальная установка с каплеобразователями – медицинскими иглами (фото из архива лаборатории моделирования эрозионных процессов)

Дождевальные установки такой конструкции использовали до 2000-х годов. Максимальная площадь орошения – 1 м<sup>2</sup>. Принципиальными отличиями этой конструкции были замена каплеобразователей на медицинские иглы и подвижность дождевого сита. Благодаря подвижной конструкции, капли дождя попадали не в одно и то же место на почве. Эффект от использования разработанной дождевальной установки заключался в упрощении исследований, для которых было достаточно 2-3 исполнителей, повышении их информативности и достоверности полученных результатов. Однако проблема изменения интенсивности дождя во время проведения экспериментов сохранялась.

Для устранения этой проблемы была изменена конструкция дождевальной установки. Подача воды проводилась снизу. Первоначально, сконструированная во Всероссийском научно-исследовательском институте земледелия и защиты почв от эрозии портативная дождевальная установка и почвенные монолиты, имели прямоугольную форму (рис. 4).

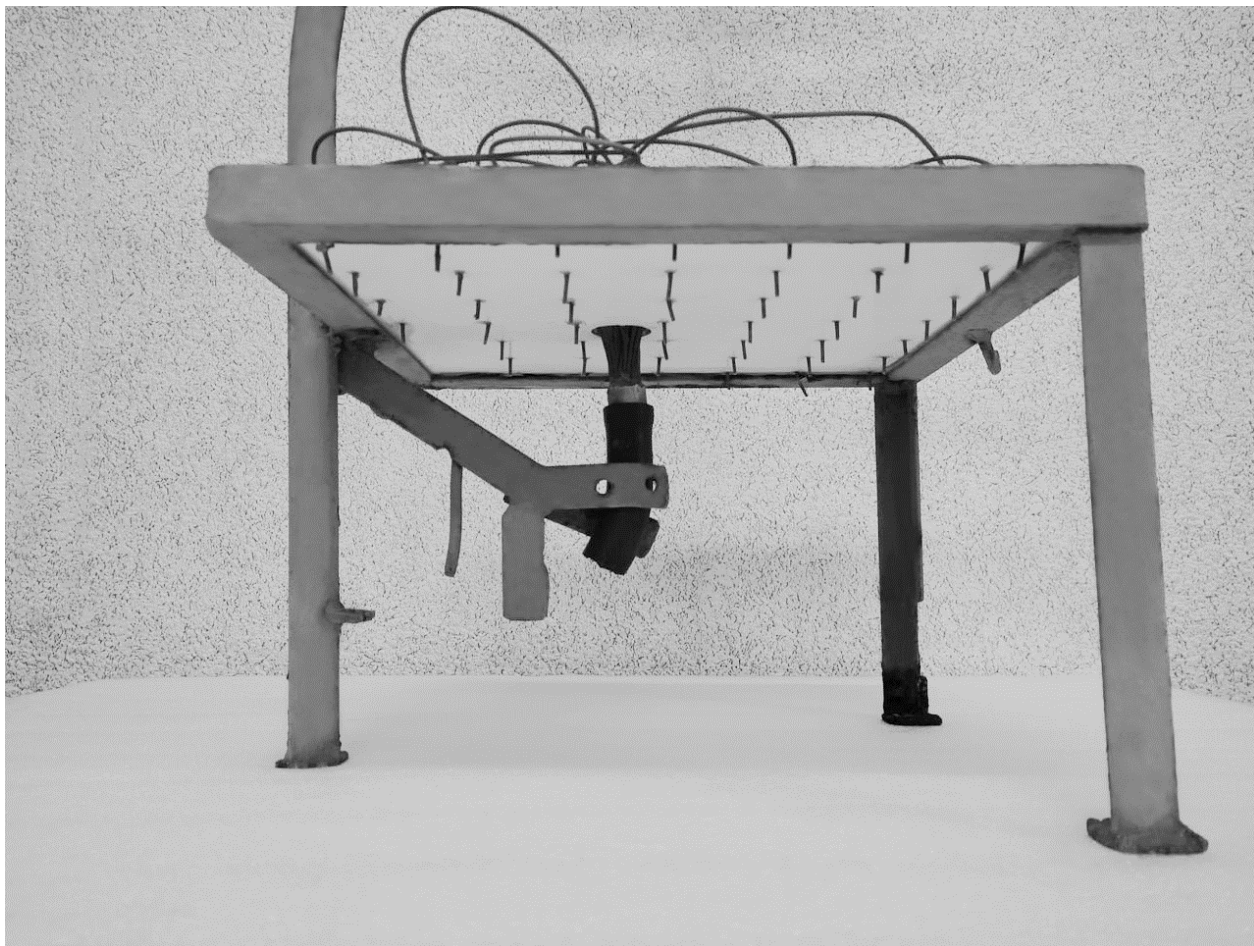


Рисунок 4 – Лабораторная дождевальная установка с каплеобразователями – полыми трубками (фото из архива лаборатории моделирования эрозионных процессов)

Каплеобразователи были расположены на горизонтальной панели с одинаковым заданным интервалом. При работе без раскачивания капли воды, образованные каплеобразователями, выбивали на поверхности почвы углубления. Поэтому при проведении экспериментов дождевальную установку слегка раскачивали. Из-за малых размеров установка, подвешенная над монолитами, при возвратно-поступательных движениях постоянно стремилась к закручиванию, что уменьшало орошаемую площадь и снижало

равномерность орошения поверхности почвы. Для эффективного использования этой особенности был сделан дождеватель в форме круга.

В результате анализа проведенных экспериментов, лучшим способом расположения каплеобразователей на круглой горизонтальной панели, был принят способ закрепления по спирали Архимеда с одинаковым шагом. При таком способе расположения каплеобразователей расстояние между соседними линиями одинаково, а при равном шаге по ней, каждый каплеобразователь орошает примерно одинаковую площадь. Первоначально дождевальную установку вешивали на шнуре, который после закручивания сам раскручивался в обратную сторону.

При использовании дождевальной установки в лабораторных условиях подвесной шнур заменили электроприводом для обеспечения равномерного вращения. При совпадении центра спирали Архимеда с осью вращения дождевальной установки, каждый ее каплеобразователь движется по своей, отличной от других траектории и орошает свое кольцо. При отсутствии центровки над некоторыми кольцами могут выстраиваться по несколько каплеобразователей, в то время как рядом остаются неохваченные участки. Это приводит к образованию углублений на поверхности почвы в форме колец, выбиваемых, идущими по одной траектории каплями [19]. Для устранения этого недостатка было разработано автоматическое раскачивающее устройство. Эксплуатация этого устройства значительно упростила проведение эксперимента и улучшила качество дождевания.

В настоящее время для проведения исследований на малых орошаемых площадях применяется портативная лабораторно-полевая дождевальная установка (рис. 5).

Портативная лабораторно-полевая дождевальная установка предназначена для исследования впитывающей способности почвы и выноса растворенных форм химических веществ с поверхностным стоком.



Рисунок 5 – Дождевальная установка с каплеобразователями – полыми трубками (патент на полезную модель № RU 184625)

Дождь, создаваемый этой установкой, имеет следующие параметры:

диаметр капель –  $3,99 \pm 0,30$  мм,

диапазон регулируемой интенсивности 1,0-2,8 мм/мин при стабильности 3% интенсивности дождя в течение часа,

высота падения капель – 0-1,5 м.

Рабочая площадь орошения равна  $0,07$  м<sup>2</sup>. Портативная лабораторно-полевая дождевальная установка [20] состоит из рамы с вертикальными стойками и подвесной скобой, на которых закреплены емкость для воды с крышкой, подающие и напорные водоводы с фильтром и вентилем, поплавковый механизм с резиновой грушей и дождеватель. Поплавковый механизм состоит из гнезда с иглой, поплавок, направителя в ниппеле и дренажной трубки для резиновой груши с дренажным отверстием, установленных в прозрачном корпусе.

Дождеватель включает последовательно зафиксированные на ниппеле толстую гибкую трубку с хомутами, втулку и пучок тонких гибких трубок, вторым концом, закрепленных на горизонтальной панели, треноги, подъемного механизма с тросиком, пропущенным через неподвижный блок, установленный в верхней ее части. На конце тросика закреплена скоба с горизонтальным упорным рычагом, электродвигателем и редуктором, на вертикальном выходном валу которого установлено раскачивающее устройство со шнурами и струбцинами, на котором вывешен дождеватель, представляющий собой дождеватель от портативной лабораторно-полевой дождевальной установки [RU 2519789 С1, 20.06.2014]. Электропривод, состоящий из электродвигателя и редуктора, принудительно вращает дождеватель с небольшой заданной скоростью. Это существенно улучшило качество создаваемых искусственных дождей. В полевых условиях вместо электропривода используется шнур.



## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика дождевания стоковых площадок основана на методе физического моделирования дождевых осадков [21]. Этот метод включает следующее понятие: разные дождевые осадки (естественные и/или искусственные) являются подобными, если при выпадении их на одинаковую почву, они производят одинаковый эффект (например, одинаковый смыв почвы, одинаковый поверхностный сток воды, одинаковые потери из почвы растворенных веществ). Критерии подобия представляют собой кумулятивные величины, т.е. они оценивают значения для предыдущей части дождя, включая весь дождь.

Разработан критерий подобия для искусственных дождей: все капли одинакового размера падают на почву с одинаковой скоростью, а интенсивность дождя постоянная. Этот критерий назван эрозионной характеристикой искусственных дождей и рассчитывается по формуле (1) [3]:

$$A = \frac{1}{2} \rho V I^2 t, \quad (1)$$

где  $A$  – критерий подобия для искусственных дождей, Дж/м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – скорость падения капель, м/с;

$I$  – интенсивность дождя, м/с;

$t$  – время от начала дождя, с.

Разные искусственные дожди могут иметь одинаковые (или близкие) значения критерия  $A$ , такие дожди подобные.

Если все капли одинакового размера и падают с одинаковой высоты, то скорость их падения при ударе о почву можно рассчитать с погрешностью 4,4 % по формуле (2) [3]:

$$V = \alpha \sqrt{gd(1 - \exp(-\beta H/d))}, \quad (2)$$

где  $V$  = скорость падения, м/с;

$\alpha = 41,5$ ;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$d$  – диаметр капли, м;

$\beta = 1,16 \times 10^{-3}$ ;

$H$  – высота падения капли, м;

$exp$  – экспонента.

Диаметр капли рассчитывали по измеренной массе воды в форме шара. Измерив интенсивность дождя  $I$  и время  $t$ , можно вычислять значения критерия подобия  $A$  через разное время  $t$ .

Во всех, приведенных в главе 3 экспериментах, использована портативная лабораторно-полевая дождевальная установка [20] со следующими характеристиками (если не оговорено иное): диаметр капель  $d = 4,0 \pm 0,3$  мм; высота падения капель  $H = 1,0$  м; скорость их падения  $V = 4,1$  м/с. Для отбора почвенных монолитов использованы металлические цилиндры с внутренним диаметром 25 см, высотой 20 см, водосборная площадь  $S = 0,07 \text{ м}^2$ .

Также разработан критерий подобия для естественных дождей со случайным изменением их структуры и продолжительности. Зарегистрированные дожди представляют парами значений:  $t_i$  – время от начала дождя и  $h_i$  – слой дождя. Порядковый номер измерения  $i$  изменяется от 1 до  $n$ . По этим данным рассчитывают продолжительность интервала  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ , приращение слоя осадков  $\Delta h_i = h_i - h_{i-1}$  и среднюю интенсивность дождя  $I_i = \Delta h_i / \Delta t_i$ . Критерий назван эрозионным индексом естественных дождей и рассчитывается по формулам (3-5) [3]:

$$AI(t_j) = \sum_{i=1}^j \Delta AI_i, \quad (3)$$

$$\Delta AI_i = 10^{-2} \Delta E_i b I_i^a, \quad (4)$$

$$\Delta E_i = 200 I_i^{0,2}, \quad (5)$$

где  $\Delta AI_i$  – приращение значения индекса  $AI_i$  для  $i$ -го интервала времени, тм/га;

$I_i$  – средняя интенсивность дождя, см/час;

$\Delta E_i$  – приращение кинетической энергии дождевых капель для  $i$ -го интервала времени, тм/га.

При  $I_i < 7,6$  см/час  $b = 1$ ,  $a = 0,9$ , при  $I_i \geq 7,6$  см/час  $b = 0,82$ ,  $a = 1$ . При  $j = n$  значение  $AI$  рассчитывается для всего дождя. Для расчета значений кумулятивной величины  $AI(t_j)$  необходимо знать только значения средних интенсивностей дождя  $I_i$ . Для критериев подобия искусственных и естественных дождей выполняется равенство (6):

$$AI = 2,3 \times 10^4 A. \quad (6)$$

*Методика применения метода дождевания для исследования впитывающей способности почвы.*

Под впитывающей способностью почвы понимается максимальная скорость впитывания (инфильтрации) почвы дождевых осадков. При выпадении дождя на ненасыщенную почву ее впитывающая способность со временем уменьшается и стремится к постоянному (предельному) значению. Интенсивность естественных дождей со временем увеличивается и уменьшается. Если она больше впитывающей способности почвы, то формируется поверхностный сток воды. В противоположном случае это не происходит.

Для искусственного дождя с одинаковыми каплями, падающими на почву с одинаковой скоростью, и с постоянной интенсивностью дождя получено уравнение для впитывающей способности почвы (7) [3]:

$$K(t) = K_{\infty} + (K_{cr} - K_{\infty}) \exp \left[ -\alpha \left( \frac{A(t)}{A_{cr}} - 1 \right) \right], \quad (7)$$

где  $K(t)$  – впитывающая способность в момент времени  $t$  после начала дождя, мм/мин;

$K_{cr}$  – критическая скорость впитывания, при которой начинается сток, мм/мин;

$K_{\infty}$  – минимальная (установившаяся) скорость впитывания, мм/мин;

$exp$  – экспоненциальная функция;

$\alpha$  – калибровочный параметр, безразмерный;

$A(t)$  – эрозионная характеристика дождя (критерий подобия) для интервала времени  $(0, t)$ , Дж/м<sup>2</sup>;

$A_{cr}$  – критическое значение  $A$ , при достижении которого начинается сток, Дж/м<sup>2</sup>.

Значение  $K_{cr}$  соответствует значению  $A_{cr}$ . Значение  $\alpha$  определяется из условия наилучшего приближения рассчитанных значений  $K_{рас}$  к измеренным значениям  $K_{изм}$ .

Используя равенство (6), в уравнении для  $K$  можно заменить  $A$  на  $AI$ . В результате получится уравнение (8) для естественных дождей:

$$K(t) = K_{\infty} + (K_{cr} - K_{\infty})exp \left[ -\alpha \left( \frac{AI(t)}{AI_{cr}} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

Получив для искусственного дождя экспериментальные значения  $K_{\infty}$ ,  $\alpha$  и  $A_{cr}$ , их можно использовать в уравнении для любых естественных дождей (значение  $K_{cr}$  определяется из значения  $A_{cr}$ ). Строго говоря, это относится только к образцу почвы, для которого они получены при дождевании. Применение для других условий описано в монографии «Моделирование водной эрозии почв» [3].

Проведение эксперимента с использованием портативной лабораторно-полевой дождевальной установки включает следующее.

1. Отбор монолитов почвы на исследуемых участках в необходимые сроки, или создание насыпных почвенных образцов. Для этого использовали металлические цилиндры, в верхней части которых сделан водоотвод для сбора воды, стекающей с поверхности почвы. При проведении дождевания в полевых условиях металлические цилиндры равномерно погружают в почву, создавая стоковую площадку.

2. При проведении дождевания в полевых условиях необходимо использовать ветрозащитный полог, т.к. порывы ветра могут исказить результаты.

3. Выравнивание поверхности почвы с небольшим уклоном в сторону водослива. Во время дождевания не должно быть напорного впитывания (образования затопленных участков почвы).

4. Проводится измерение интенсивности дождя в 10-кратной повторности (для расчёта среднего значения и стандартного отклонения).

5. Отмечается время выпадения дождя на поверхность почвы (используем секундомер).

6. Фиксируется начало стока.

7. Через заданный интервал времени проводится отбор стекающей воды (происходит замена емкостей с водой на пустые) и их взвешивание. Это продолжается до тех пор, пока не прекратится увеличение веса стекающей воды.

8. Проводится повторное измерение интенсивности дождя.

9. Удаление из воды почвенных частиц происходит в два этапа [22]: первый – осаждение в течение 16 минут крупных почвенных частиц в спокойной воде (столб воды 37 см); второй – использование центрифуги в течение 15 минут при 3500 оборотах в минуту.

*Обработка измеренных значений.* В результате проведенного эксперимента получают: время начала стока  $t_{cr}$  и ряд измеренных значений:  $t_i$  – время окончания  $i$ -го интервала ( $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ ),  $V_i$  – объём стекающей воды. Для  $i$ -го интервала средняя интенсивность стока (9):

$$I_{ст,i} = \frac{V_i}{\Delta t S}, \quad (9)$$

где  $I_{ст,i}$  – интенсивность стока, мм/мин;

$V_i$  – объём стекающей воды, литр;

$\Delta t$  – продолжительность интервала, мин;

$S$  – площадь почвы, с которой стекает вода,  $m^2$ .

Поскольку при постоянной интенсивности дождя сток воды происходит всё время после его начала, то скорость инфильтрации имеет максимальное значение, которое со временем уменьшается. Следовательно, для  $i$ -го интервала измеренная впитывающая способность почвы (10):

$$K_{изм,i} = I_{дож} - I_{ст,i} , \quad (10)$$

где  $I_{дож}$  – интенсивность дождя (постоянная), мм/мин;

$I_{ст,i}$  – средняя интенсивность стока для  $i$ -го интервала, мм/мин.

Слой поверхностного дождевого стока (11) определяется превышением интенсивности дождя  $I$  над впитывающей способностью почвы  $K$ :

$$h = \int_0^T [I(t) - K(t)] dt , \quad (11)$$

где  $T$  – продолжительность дождя.

В (11) при интегрировании учитываются только значения  $I(t) > K(t)$ .

Метод физического моделирования дождей для исследования впитывающей способности почвы [23] был включён в Глобальную базу данных измерения инфильтрации почвы [24].

*Методика применения метода дождевания для исследования потерь из почвы растворенных веществ.* Для таких исследований добавлен третий критерия подобия – концентрация исследуемого растворенного элемента должна быть одинаковой в воде искусственных и естественных дождей.

Подробно методика проведения искусственного дождевания для исследования выноса различных химических веществ со стоком описана в работе [25].

При дождевом стоке происходит массообмен растворенными веществами между почвой и потоком воды. Для любых дождей справедливо уравнение (12) [3]:

$$m = dC \times h, \quad dC = C_{\text{сток}} - C_{\text{дож}}, \quad (12)$$

где  $m$  – потери вещества с поверхности почвы, мг/м<sup>2</sup>;

$h$  – слой стока воды с этой же поверхности почвы, мм;

$dC$  – среднее изменение концентрации в объеме стекающей воды, соответствующей слою стока  $h$ , мг/л;

$C_{\text{сток}}$  – средняя концентрация в стекающей воде, мг/л;

$C_{\text{дож}}$  – концентрация в дождевой воде, мг/л.

При  $dC > 0$  почва теряет растворённое вещество, а при  $dC < 0$  она его приобретает из дождевой воды. В проведённых экспериментах концентрация в дожде исследуемого вещества не изменялась во времени.

Для значения  $dC$  относительная погрешность (в %) (13):

$$\delta = \text{abs} \left( 100 \frac{\Delta C_{\text{сток}} + \Delta C_{\text{дож}}}{dC} \right), \quad (13)$$

где  $\text{abs}()$  – абсолютное значение выражения в скобках;

$\Delta C_{\text{сток}}$ ,  $\Delta C_{\text{дож}}$  – абсолютная погрешность, соответственно, для  $C_{\text{сток}}$  и  $C_{\text{дож}}$ .

Из (13) следует, что при уменьшении значения  $dC$  значение погрешности  $\delta$  возрастает и может превысить 100 %, т.е. значение  $dC$  может быть недостоверным.

При исследовании потерь из почвы растворённых веществ ( $dC > 0$ ) есть три способа уменьшить относительную погрешность.

Первый – уменьшить в дождевой воде концентрацию  $C_{\text{дож}}$  (использовать дистиллированную воду). При  $C_{\text{дож}} = 0$  почва всегда будет терять растворённое вещество (из (12) следует, что  $dC > 0$ ).

Второй – увеличить в стекающей воде концентрацию  $C_{\text{сток}}$  (в почву можно внести исследуемое растворенное вещество).

Третий – уменьшить абсолютные погрешности  $\Delta C_{\text{сток}}$  и  $\Delta C_{\text{дож}}$  (можно использовать более точные методы измерения концентраций  $C_{\text{сток}}$  и  $C_{\text{дож}}$ ).

Для интервала времени  $\Delta t_i$  потери из почвы со стоком исследуемого элемента рассчитывают по формуле (14):

$$\Delta M_i = (c_i - c_d)V_i/S, \quad (14)$$

где  $\Delta M_i$  – потери растворённого элемента за интервал времени  $\Delta t_i$ , мг/м<sup>2</sup>;  
 $c_i, c_d$  – концентрации этого элемента, соответственно, в стоке за  $\Delta t_i$  и в дождевой воде, мг/л;

$V_i$  – объём стекающей воды за тот же интервал времени, л;

$S$  – площадь водосбора, м<sup>2</sup>.

Для каждого интервала  $\Delta t_i$  рассчитывают слой стока  $\Delta h_i = I_{ст,i}\Delta t_i$  и количество потерь растворенного элемента  $\Delta M_i = m_i\Delta t_i$ . Кумулятивные значения этих величин рассчитывают как их суммы за все предыдущие интервалы времени. По этим значениям можно устанавливать экспериментальную зависимость потери из почвы исследуемого элемента от слоя стока.



## ГЛАВА 3. ПРИМЕРЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 3.1. Исследование впитывающей способности почвы

Оценка слоя стока для естественных дождей. Почвенные монолиты были отобраны на многофакторном полевом стационарном опыте ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (Курская область, Медвенский район) в варианте с бессменным паром, без внесения удобрений, основная обработка – вспашка [23]. Почва – чернозем типичный среднемошный малогумусный среднесуглинистый. По результатам дождевания для уравнения естественных дождей получены следующие значения:  $AI_{cr} = 5,1$  т-м/га,  $K_{cr} = 0,88$  мм/мин,  $\alpha = 0,63$  и  $K_{\infty} = 0,20$  мм/мин. На рисунке 6 показана зависимость от времени интенсивности дождя и впитывающей способности почвы, рассчитанной по уравнению (8).

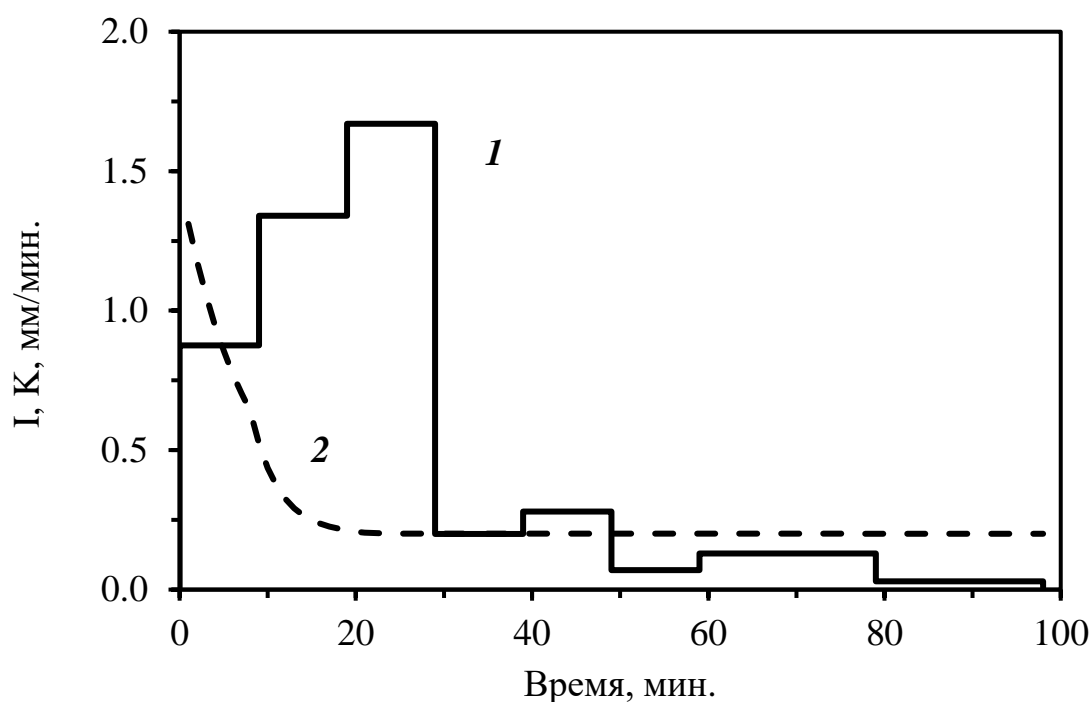


Рисунок 6 – Зависимость от времени: 1 – интенсивности естественного дождя (I); 2 – впитывающей способности почвы для этого дождя (K)

В качестве естественного дождя выбрана часть дождя со слоем 45,8 мм и продолжительностью 98 минут, который зарегистрирован на Нижнедевицкой воднобалансовой станции (Воронежская область). Рассчитанный по формуле (11) слой стока  $h$  равен 26,2 мм.

Оценка изменения впитывающей способности почвы с разной основной обработкой почвы. Почвенные монолиты были отобраны в полевом стационарном опыте ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (Курская область, Курский район) на вариантах со вспашкой на глубину 20-22 см и без обработки почвы (No-Till) после уборки озимой пшеницы [26]. Почва – чернозем типичный среднемошный малогумусный тяжелосуглинистый. Результаты дождевания представлены на рисунке 7.

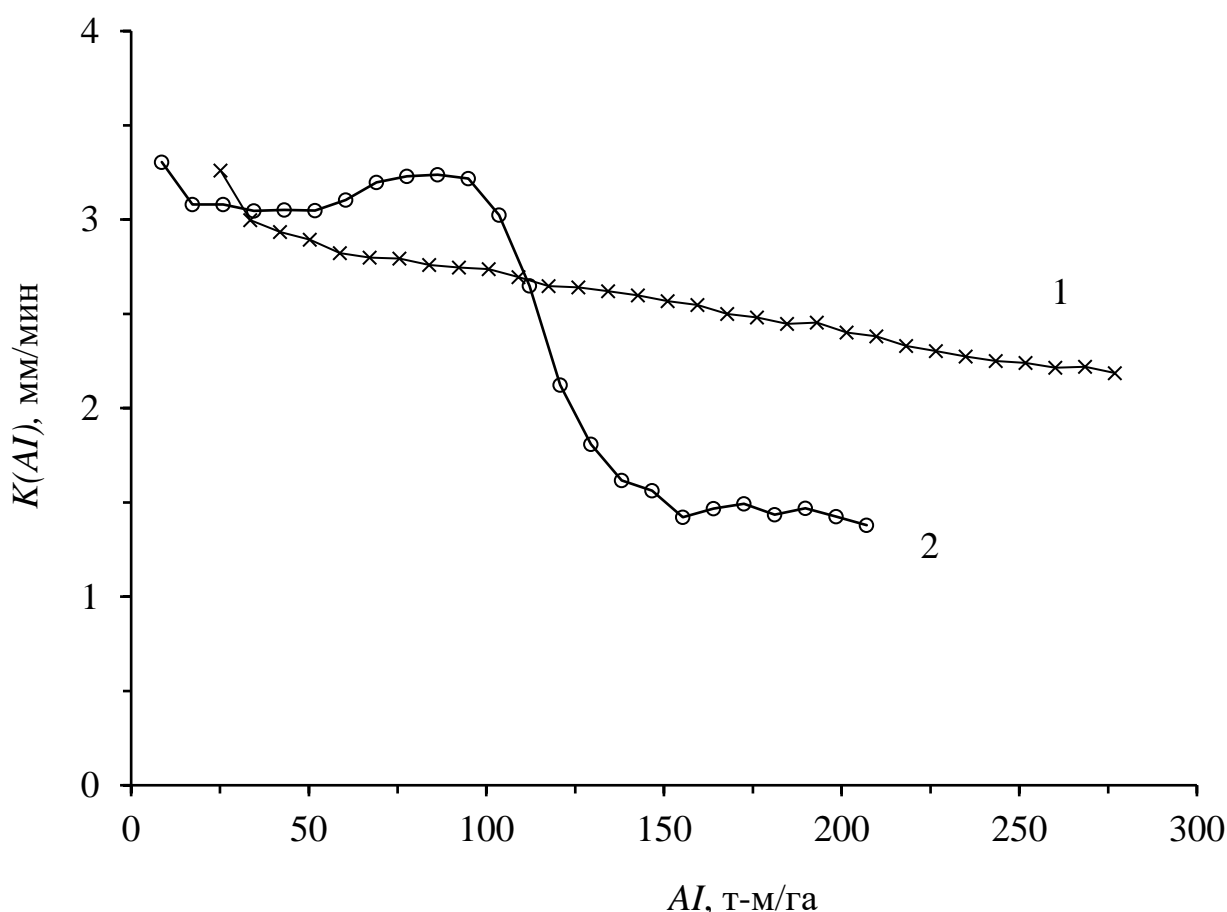


Рисунок 7 – Зависимость впитывающей способности почвы  $K$  от эрозионного индекса естественных дождей  $AI$ :  
1 – вспашка; 2 – No-Till

На Нижнедевицкой воднобалансовой станции (Воронежская область) за 30 лет наблюдений был зафиксирован дождь с максимальным значением  $AI = 87$  т-м/га [3]. Следовательно, на этом графике (рис. 7) для прошедшего времени можно рассматривать дожди с значением эрозионного индекса менее 100 т-м/га. Если в будущем (при изменении климата) значения  $AI$  будут больше, то и для них можно будет использовать зависимости, аналогичные представленным на рисунке 7.

Таким образом, с помощью метода дождевания проведена оценка изменения впитывающей способности почвы при сравнении разных обработок почвы: вспашки и No-Till. При достижении значения эрозионного индекса 112 т-м/га впитывающая способность почвы для двух видов обработок почвы была одинакова. Затем на варианте без обработки почвы впитывающая способность почвы стала резко снижаться. Установившая интенсивность впитывания на варианте со вспашкой была выше в 1,6 раза.

*Исследование впитывающей способности почвы в поле с производственными посевами.* Почвенные монолиты были отобраны в стационарном многолетнем полевом опыте ФГБНУ «Курский ФАНЦ» по контурно-мелиоративному земледелию (Курская область, Медвенский район) для измерения впитывающей способности почвы в посевах озимой пшеницы сорта Безостая-100 в фазе кущения. Отбор проведен в верхней и нижней частях склонов западной экспозиции. На одном склоне контурно расположены водорегулирующие двухрядные лесные полосы, усиленные канавой в междурядье и валом по нижней опушке. Другой склон – контрольный. Агротехника выращивания озимой пшеницы одинакова на двух склонах.

Почва – чернозем типичный среднемошный малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидных суглинках, слабоэродированный в нижних частях склонов.

Интенсивность дождя была одинаковая для всех исследуемых монолитов (в пределах погрешности измерения), и составила в среднем  $1,54 \pm 0,02$  мм/мин (табл. 1). Повторность дождевания четырехкратная.

**Таблица 1 – Исходные параметры при проведении дождевания монолитов**

Точка отбора	Интенсивность, мм/мин	Влажность почвы, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Начало стока, мин	Уклон, градусы
Верх контрольного склона	$1,52 \pm 0,02$	$24,92 \pm 0,69$	$1,08 \pm 0,04$	7,5	3,4
Низ контрольного склона	$1,56 \pm 0,05$	$24,04 \pm 1,28$	$1,05 \pm 0,04$	10,0	3,4
Верх склона с лесными полосами	$1,55 \pm 0,03$	$23,89 \pm 0,53$	$1,07 \pm 0,03$	6,0	3,4
Низ склона с лесными полосами	$1,53 \pm 0,03$	$24,53 \pm 1,28$	$1,09 \pm 0,05$	2,5	3,4

Влажность и плотность почвы в слое 0-20 см не имели достоверных отличий, поэтому было принято, что состояние почвы было одинаково перед проведением дождевания. Уклон стоковых площадок равен в среднем  $3,4^\circ$ .

Несмотря на одинаковые исходные параметры почвы, и дождя при проведении эксперимента время начала стока было различным (рис. 8).

Начало стока при дождевании почвы внизу склона с лесными полосами было зафиксировано через 2,5 минуты. Для стоковых площадок, расположенных внизу склона контроля – 10 минут. Кривые динамики впитывания воды почвой (впитывающей способности почвы) можно охарактеризовать плавным снижением без резких переходов.

Для почвы контрольного водосбора получена более низкая установившаяся интенсивность впитывания: вверху склона –  $0,44$  мм/мин, в

нижней точке склона – 0,66 мм/мин, чем стоковых площадок, расположенных на склоне с лесными полосами.

Установившаяся скорость впитывания воды почвой для стоковых площадок, расположенных на склоне с лесными полосами, больше, чем на контрольном склоне в 2,9 раза в верхней части и в 1,5 раза – в нижней.

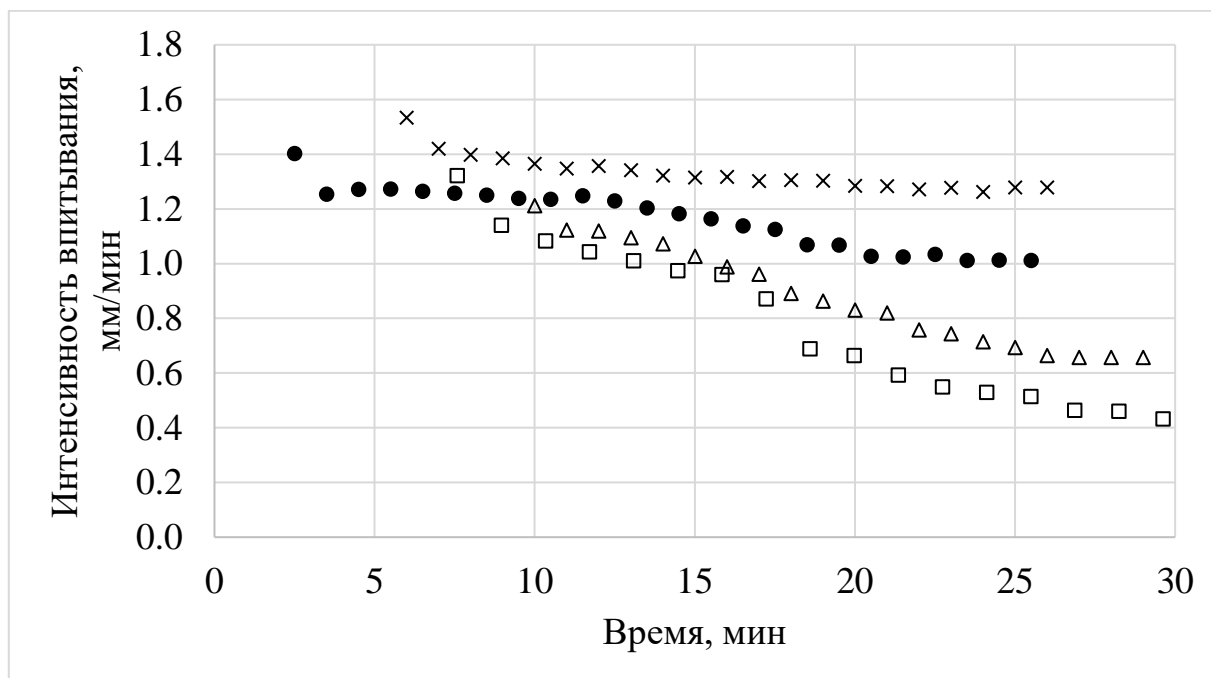


Рисунок 8 – Зависимость интенсивности впитывания от времени выпадения дождя для монолитов, отобранных на ключевых участках: □ – верх склона контроль, △ – низ склона контроль, × – верх склона с лесными полосами, ● – низ склона с лесными полосами

*Сравнение впитывающей способности почвы в лесной полосе и на поле с производственными посевами.* Почвенные монолиты были отобраны в стационарном многолетнем полевом опыте ФГБНУ «Курский ФАНЦ» по контурно-мелиоративному земледелию (Курская область, Медвенский район) для измерения впитывающей способности почвы в поле, расположенном выше и ниже по склону относительно лесной полосы, и в междурядье деревьев лесной полосы на склоне южной экспозиции.

Почва – чернозем типичный среднемошный малогумусный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках, слабоэродированный в нижних частях склонов.

Интенсивность дождя была одинакова (табл. 2) в пределах погрешности измерения для всех изучаемых вариантов.

**Таблица 2 – Влажность, плотность почвы и характеристика дождя при проведении искусственного дождевания**

Характеристика дождевания	Лесная полоса	Поле выше лесной полосы	Поле ниже лесной полосы
Интенсивность дождя, мм/мин	1,54±0,01	1,55±0,02	1,55±0,01
Влажность почвы, %	28,22±0,22	23,10±0,34	23,12±0,38
Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>	0,93±0,02	1,07±0,03	1,08±0,02
Начало стока, мин	2,0	1,5	1,9

Влажность почвы, отобранной в поле, была ниже, чем в лесной полосе на 14,2 %, а плотность почвы выше – на 11,7 %. Увеличение плотности почвы отрицательно действует на впитывание почвой воды. Поэтому, время начала стока в поле зафиксировано раньше, чем в междурядье лесной полосы.

В первые минуты начала стока интенсивность впитывания почвой в поле выше, чем в лесной полосе на 21,9 % (рис. 9). Однако после 10 минут от начала дождя отмечается резкое снижение ее значений до 0,26±0,04 мм/мин.

Интенсивность впитывания почвы, отобранной в междурядье лесной полосы, имеет «двухступенчатую» форму кривой впитывания воды почвой, характеризуется медленным снижением интенсивности впитывания, достигая ее равновесного состояния.

Значение установившейся интенсивности впитывания почвы в лесной полосе, выше, чем в поле в 3,5 раза. Достоверной разницы между значениями установившегося впитывания почвы в поле выше и ниже по склону относительно лесной полосы, не зафиксировано, следовательно, его значение одинаково в пределах погрешности измерения.

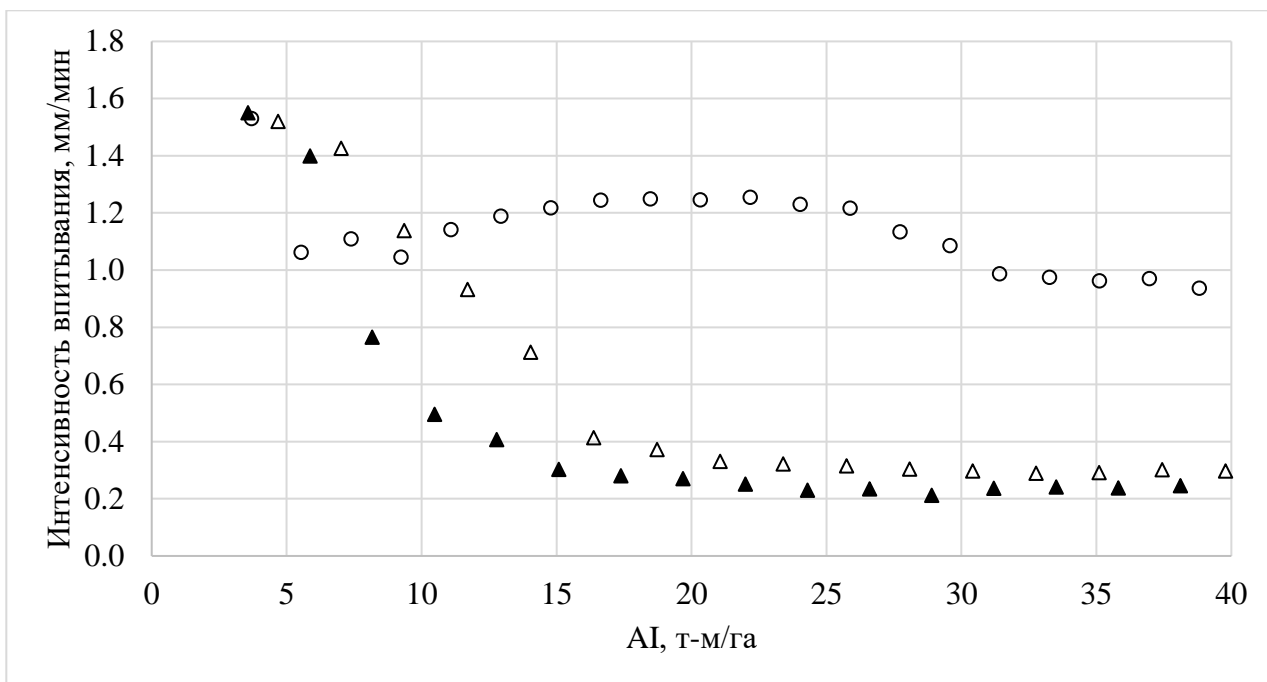


Рисунок 9 – Зависимость интенсивности впитывания на склоне от эрозионного индекса дождя: ○ – в лесной полосе, ▲ – поле, расположенное выше лесной полосы, △ – поле, расположенное ниже лесной полосы

*Сравнение впитывающей способности почвы в депрессивной зоне лесной полосы на поле с разными сельскохозяйственными культурами.* Почвенные монолиты были отобраны в нижней части склонов стационарного многолетнего полевого опыта ФГБНУ «Курский ФАНЦ» по контурно-мелиоративному земледелию (Курская область, Медвенский район). Исследования впитывающей способности почвы проводили в посевах ярового ячменя (*Hordeum distichon* L.) и многолетних трав (*Bromopsis inermis* Holub) 1 года пользования.

Почва – чернозем выщелоченный среднемошный малогумусный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках, слабоэродированный.

Высота падения капель – 1 м. Дождь монодисперсный, диаметр капель –  $3,99 \pm 0,30$  мм. Интенсивность дождевания для всех вариантов –  $1,71 \pm 0,02$  мм/мин. Повторность трехкратная.

Результаты измерений показали, что плотность почвы под посевами ячменя выше, чем под многолетними травами в слое 0-80 см (рис. 10).

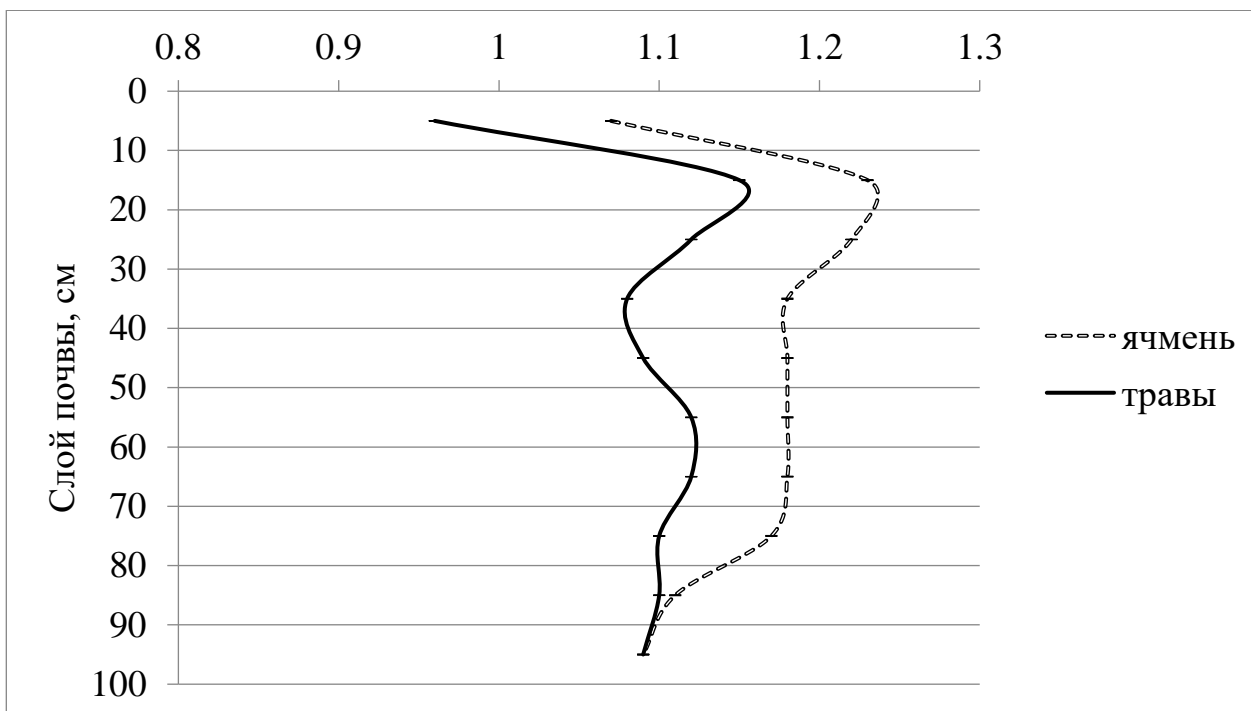


Рисунок 10 – Плотность почвы, г/см<sup>3</sup>

Достоверная разность между плотностью почвы под изучаемыми культурами составила 0,05-0,11 г/см<sup>3</sup>. На построенных графиках продемонстрировано резкое увеличение плотности почвы к 20 см для двух культур, затем снижение к 40 см и стабилизация показателей. Плотность почвы на глубине 90-100 см одинакова в пределах погрешности и составила 1,1 г/см<sup>3</sup>. Увеличение плотности почвы к глубине 20 см связано с плужной подошвой, созданной вследствие длительных поверхностных обработок почвы на опыте по контурно-мелиоративному земледелию. Получена достоверная разность между влажностью почвы в посевах ярового ячменя и многолетних трав, за исключением верхнего слоя 0-10 см. Максимальное снижение влажности почвы под посевами ячменя отмечено на уровне 60 см, затем ее значения стабилизировались и, в среднем, составили 23,32±0,12 %. Значения этого показателя в почве под многолетними травами выше на 3-12 %.

Коэффициент структурности почвы по результатам рассева на ситах воздушно-сухой почвы для двух культур был выше 2,5. В связи с



увеличением плотности почвы к глубине 20 см, измерение водопрочных агрегатов провели для двух слоев: 0-10 см и 10-20 см. Средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов в слое 0-10 см был на 52,3 % меньше под посевами ячменем по сравнению с многолетними травами. В слое 10-20 см получена аналогичная тенденция, и разница составила 49 %.

Начало стока для монолитов, отобранных под многолетними травами, зафиксировано через 6 минут. Кривая интенсивности впитывания более пологая, по сравнению с монолитами, отобранными под ячменем (рис. 11).

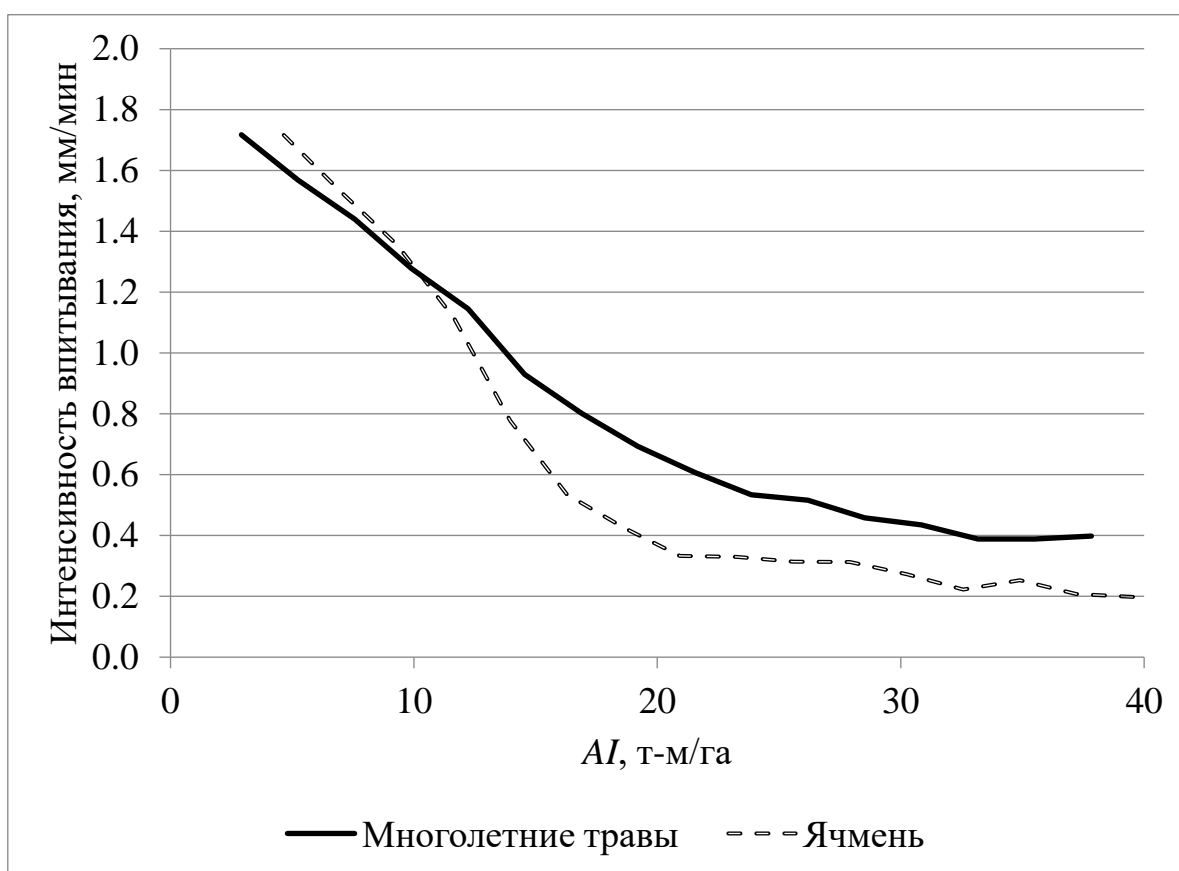


Рисунок 11 – Зависимость интенсивности впитывания (мм/мин) от эрозионного индекса дождя (AI) (т-м/га)

Достижение значения установившегося впитывания почвой  $0,41 \pm 0,01$  мм/мин под многолетними травами зафиксировали к 23 минуте от начала дождя. Для монолитов, отобранных под посевами ячменя, зафиксировано более позднее начало стока с разницей в 40 секунд. Но в течение 4 минут интенсивность впитывания была ниже, чем под многолетними травами.

Значение установившегося впитывания составило  $0,19 \pm 0,02$  мм/мин, что в два раза ниже, чем под многолетними травами.

*Определение влагоемкости лесной подстилки с помощью портативной лабораторно-полевой дождевальной установки по методу Н. Ф. Созыкина.* Для проведения измерений влагоемкости ненарушенную лесную подстилку перенесли на сито, перевезли в лабораторию, высушили до воздушно-сухого состояния, взвесили.

Дождевание воздушно-сухой подстилки проводили в течение 5, 10 и 15 минут с постоянной интенсивностью дождя (предварительно проведен замер). Высота падения капель от края каплеобразователя до поверхности лесной подстилки должна быть одинаковая для всех сравниваемых образцов. В наших исследованиях – 1 м. Повторность измерения десятикратная (рис. 12).



Рисунок 12 – Вид сверху при дождевании лесной подстилки

Рассмотрен пример измерения влагоемкости лесной подстилки, отобранной в березовых лесных полосах, расположенных на склонах северной и южной экспозиций.

Для определения влагоемкости лесной подстилки методом искусственного дождевания измеряли интенсивность дождя перед началом эксперимента в 10-кратной повторности.

Интенсивность дождя в течение всего времени проведения эксперимента составила  $1,55 \pm 0,03$  мм/мин. Существенной разницы между влагоемкостью подстилки, отобранной в березовых лесных полосах, расположенных на склонах южной и северной экспозиций, не зафиксировано, поэтому приведены средние значения влагоемкости характерные для двух изучаемых березовых лесных полос (рис. 13).

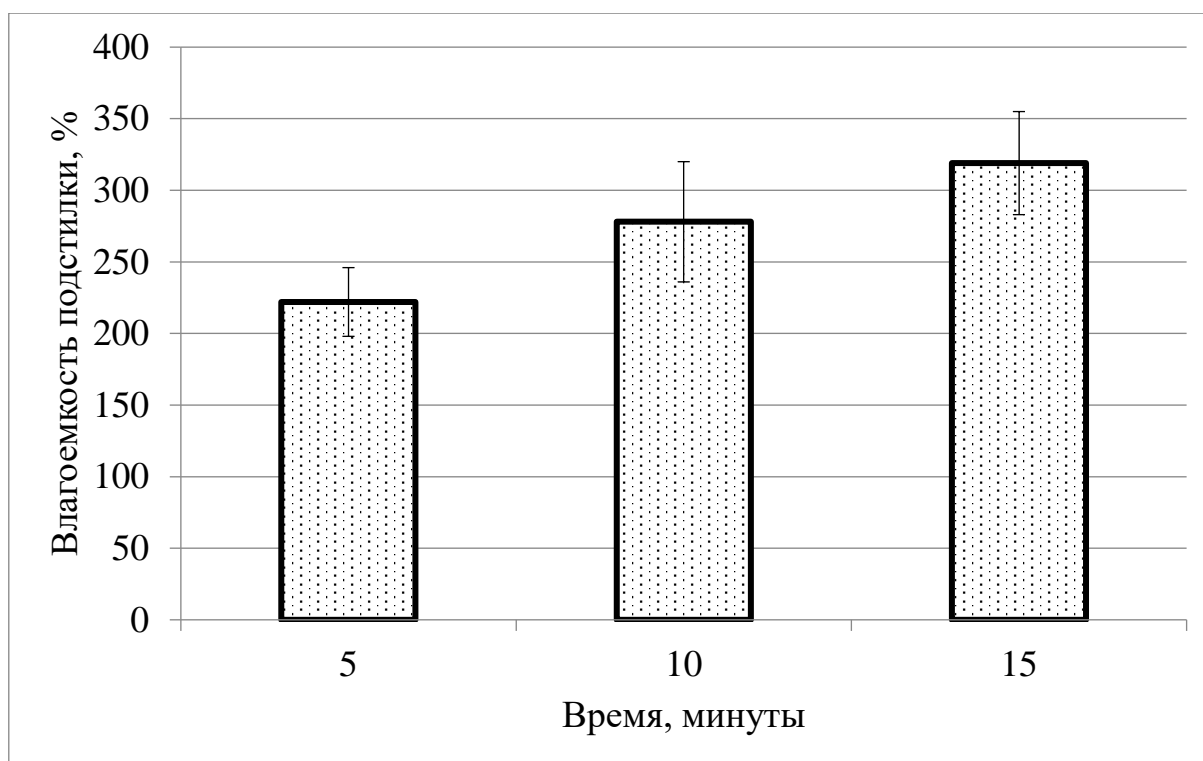


Рисунок 13 – Влагоемкость ненарушенной лесной подстилки

За время выпадения дождя в течение 5 минут фиксировали увеличение веса подстилки в среднем на  $222 \pm 24$  %. Через 10 минут после начала дождя влагоемкость составила  $278 \pm 42$  %. Дождевание подстилки в течение 15 минут привело к увеличению ее веса на  $319 \pm 36$  % по сравнению с воздушно-сухим состоянием.

Таким образом, при дождевании с постоянной интенсивностью дождя получена прямая зависимость влагоёмкости лесной подстилки от продолжительности дождя.

### 3.2. Исследование выноса химических элементов со стоком

*Исследование потерь из почвы химических веществ.* При дождевании того же монолита, для которого на рисунке 6 представлены результаты для впитывающей способности почвы, проводили измерения концентрации в стоке и в дождевой воде следующих веществ:  $P_2O_5$ ,  $NO_3$  и  $NH_4$  [25]. На рисунке 14 представлены полученные результаты.

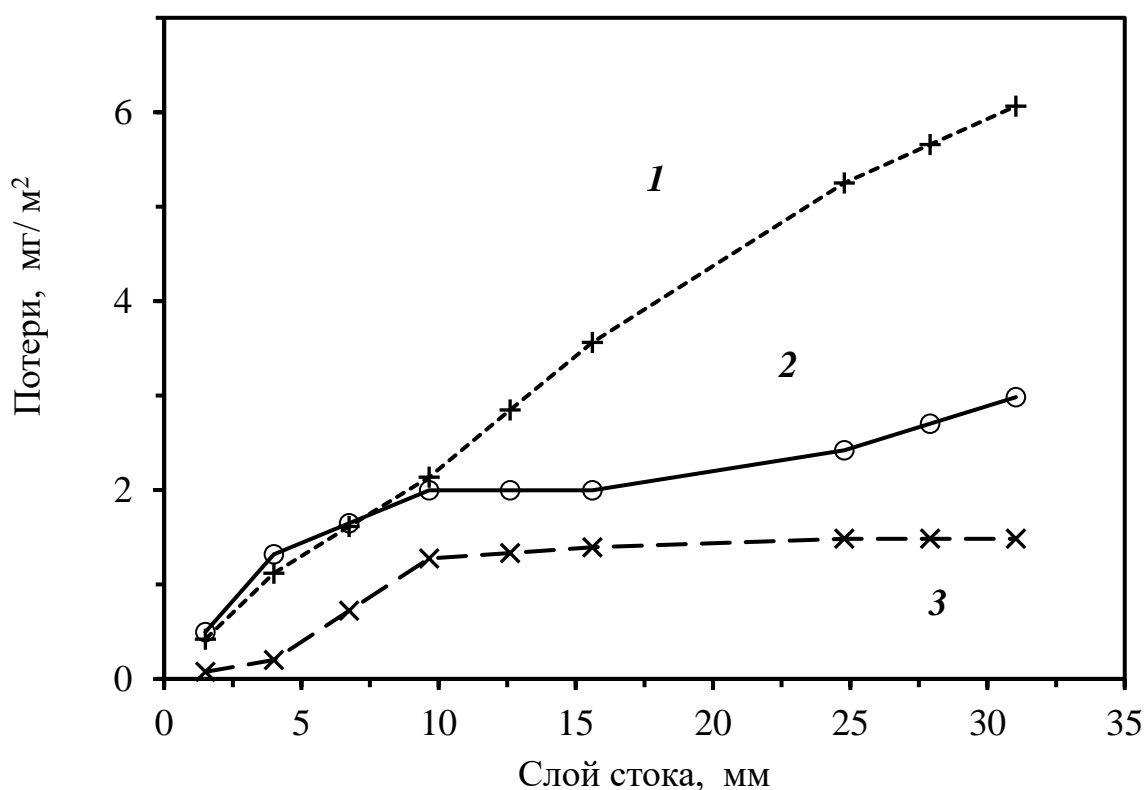


Рисунок 14 – Экспериментальная зависимость потерь биогенных веществ от слоя поверхностного стока: 1 –  $P_2O_5$ ; 2 –  $NO_3$ ; 3 –  $NH_4$

Для естественного дождя на рисунке 6 слой стока ( $h$ ) был равен 26,2 мм. Используя линейную интерполяцию, из данных, представленных на рисунке

14 определено, что этому слою стока соответствуют следующие потери ( $\text{мг/м}^2$ ) биогенных веществ: 5,4 –  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; 2,5 –  $\text{NO}_3$ ; 1,5 –  $\text{NH}_4$ .

*Оценка влияния температуры на концентрацию растворенных веществ в стекающей воде.* Для проведения искусственного дождевания использовали искусственные созданные почвенные образцы в металлических цилиндрах – стоковых площадках. Почва – чернозем типичный, отобранная из пахотного слоя 0-20 см. Высота почвенного образца не превышала 0,20 м, диаметр – 0,25 м.

Для искусственного дождя использовали дистиллированную воду, чтобы исключить дополнительное внесение в почву исследуемых веществ с дождем. Предварительно в почву было внесено 60 г растворенных в дистиллированной воде минеральных удобрений ( $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{KCl})$  нитроаммофоска 16:16:16)) в расчёте на массу почвы 50 кг для трёх почвенных образцов.

Эксперименты проводили при положительной температуре воздуха: 20 $^{\circ}\text{C}$ , 10 $^{\circ}\text{C}$  и 1 $^{\circ}\text{C}$ . До начала дождевания температура почвы и воды были такими же. Продолжительность дождевания была одинаковая для разных температур и составила 15,8 мин. Слой стока был равен  $20,4 \pm 0,6$  мм. Для этого объёма измеряли концентрацию исследуемых химических веществ. Для очистки мутной воды использовали метод осаждения и центрифугирования [22].

Почвенные образцы были сформированы с одинаковой, в пределах погрешности, плотностью  $1,20 \pm 0,02$  г/см $^3$  и влажностью –  $21,0 \pm 0,05$  %, а также с одинаковым содержанием исследуемых веществ в почве (образцы готовили из одинаковой почвы). На рисунке 15 показаны результаты дождевания.

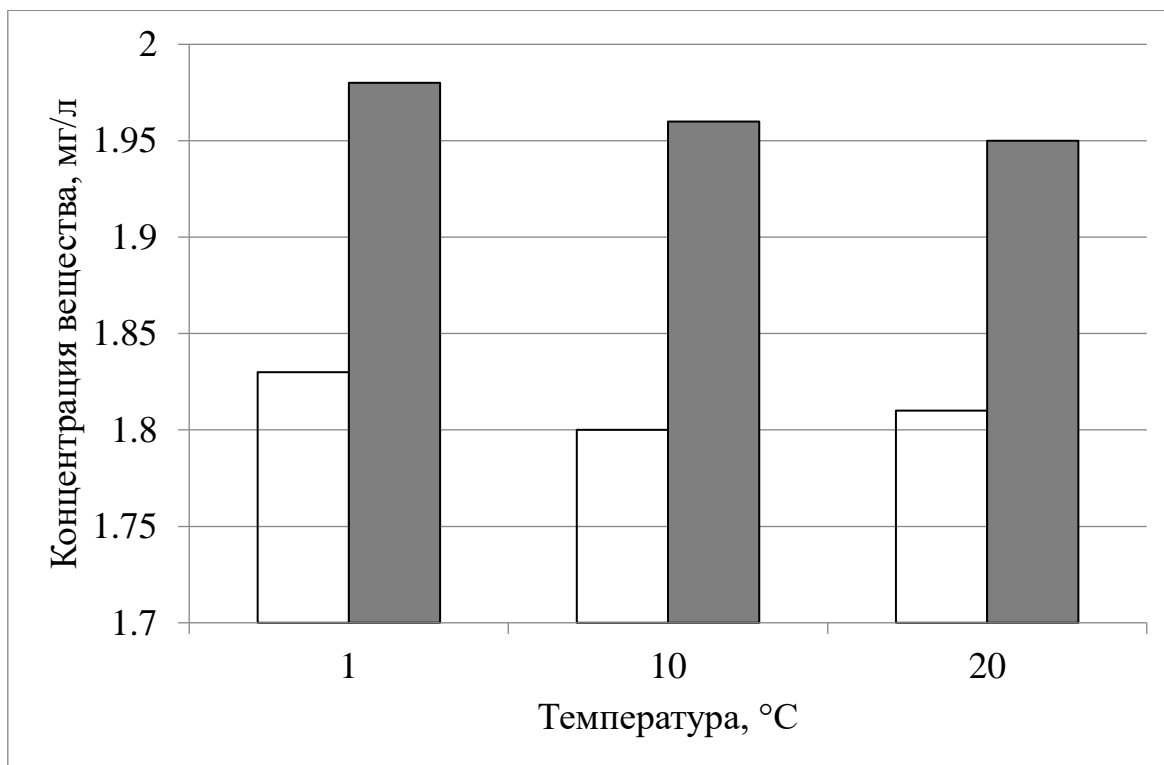


Рисунок 15 – Концентрация химических веществ в стоке при дождевании с разными температурами воды: □ – NO<sub>3</sub>, ■ – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

В пределах погрешности для каждого биогенного вещества значения  $dC$  одинаковые, т.е. можно принять, что в интервале 1 – 20 °C концентрация этих элементов не зависит от температуры дождевой воды и почвы. По данным искусственного дождевания можно для естественного дождя сначала рассчитать слой стока  $h$ , а затем рассчитать потери растворённого биогенного вещества. В качестве примера такие расчёты проведены для естественного дождя (полный слой 46,1 мм, полная продолжительность 138 минут), зарегистрированного 10.08.1977 г. на Нижнедевицкой воднобалансовой станции (Воронежская область). Для расчёта использованы данные дождевания для почвенного образца при температуре 10 °C. Рассчитанный слой стока  $h$  для естественного дождя составил 33,2 мм. Принято, что содержание этих веществ в воде искусственного и естественного дождя одинаковое. Рассчитанные значения потерь этих веществ составили 56 и 65 мг/л для NO<sub>3</sub> и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, соответственно.

*Исследование концентрации тяжёлых металлов в воде, стекающей с почвы при дождевании.* Установлено, что тяжёлые металлы из почвы способны передаваться по экологическим и пищевым цепям в другие среды (грунтовые и поверхностные воды, живые организмы) [27-30]. Источники загрязнения почв могут быть случайными (например, в случае выщелачивания свалок, в результате выпадения кислотных или щелочных дождей) или же осознанно внесенными человеком (например, при внесении в почву минеральных удобрений).

В результате загрязнения меняется химический состав почвы, ухудшается её качество, и, как следствие, почва становится вторичным источником загрязнения соприкасающихся сред.

*Оценка влияния температуры на вынос цинка из дерново-подзолистой почвы.* Для проведения экспериментов были сформированы 3 искусственных почвенных образца.

Почва – дерново-подзолистая супесчаная окультуренная почва, отобранная из пахотного горизонта в Жуковском районе Калужской области. В качестве контроля (1-й вариант) использовали почву без внесения цинка. Во 2-й и 3-й варианты в почву вносили Zn (водный раствор нитрата) в количестве 100 мг/кг. В 3-м варианте в почву добавлены растительные остатки.

Уклон почвы на всех стоковых площадках формировался механически при усилии в 300 кг. Механический способ формирования уклона площадки позволяет исключить погрешности, полученный при формировании вручную. Уклон для всех вариантов составил 5°.

Первую серию дождеваний проводили при температуре воздуха +0,5 °С, воды и почвы – +1 °С. Влажность почвы для 3 вариантов была одинаковая и составила 22±0,5 % при плотности почвы 1,21±0,03 г/см<sup>3</sup>.

Вторую серию дождеваний проводили при температуре воздуха +19 °С, воды и почвы при +20 °С.

Анализируя полученные графики, видим, что на рисунке 16 впитывание быстрее приходит к установившейся величине, что объясняется более высокой влажностью почвы во время проведения второй серии дождевания.

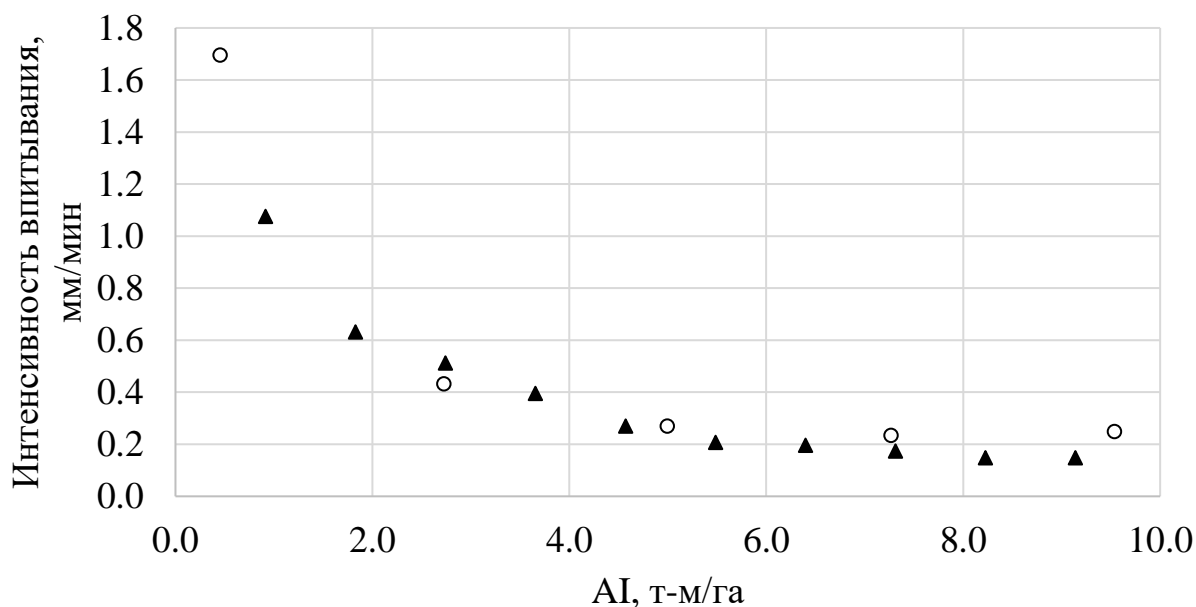


Рисунок 16 – Зависимость интенсивности впитывания от эрозионного индекса дождя  $AI$  на контрольном варианте:  $\circ$  – 1 °C,  $\blacktriangle$  – 20 °C

Содержание цинка в стекающей воде в среднем составило  $0,037 \pm 0,01$  мг/л по всем изучаемым вариантам в двух сериях дождевания. Концентрация изучаемого вещества не изменялась во время проведения дождевания, т.е. она не зависит от интенсивности стока. Полученные данные можно использовать при расчетах выноса для естественных дождей.

*Оценка выноса цинка из дерново-подзолистой почвы с разным содержанием в ней цинка.* Для изучения выноса растворенных веществ были сделаны искусственные почвенные образцы в одинаковых металлических цилиндрах с боковым водосливом для стока воды.

Для каждой серии брали количество почвы на три образца. Из почвы были удалены растительные остатки и разрушены крупные комки. Ее тщательно перемешали и разделили на три одинаковые части. Далее почву послойно засыпали в цилиндр и её уплотняли при одинаковом давлении (механизировано). Почва занимала весь объём цилиндра. Для сохранения



влаги почвенные образцы упаковывали полиэтиленовой плёнкой и помещали в прохладное помещение с постоянной температурой. Перед проведением дождевания цилиндр с почвой взвешивали, формировали одинаковый уклон на поверхности стоковой площадки ( $5 \pm 0,01^\circ$ ).

Использование искусственных почвенных образцов позволило исключить влияние дополнительных факторов (неоднородность структуры почвы, влажности, плотности, уклона) на изучаемые показатели.

Почва – дерново-подзолистая супесчаная окультуренная. 1 вариант с внесением Zn (водный раствор нитрата) в количестве 100 мг/кг, 2 вариант – 500 мг/кг. Контроль – без дополнительного внесения цинка. Плотность почвенных образцов –  $1,21 \pm 0,02$  г/см<sup>3</sup>, влажность –  $22,3 \pm 0,02$  %.

Интенсивность дождевания –  $1,69 \pm 0,03$  мм/мин. Температура воздуха и воды 20 °С. Начало стока зафиксировано через 20 секунд. Продолжительность дождя в среднем 10 мин.

Получена одинаковая зависимость интенсивности впитывания почвы от эрозионного индекса дождя для всех вариантов (рис. 17).

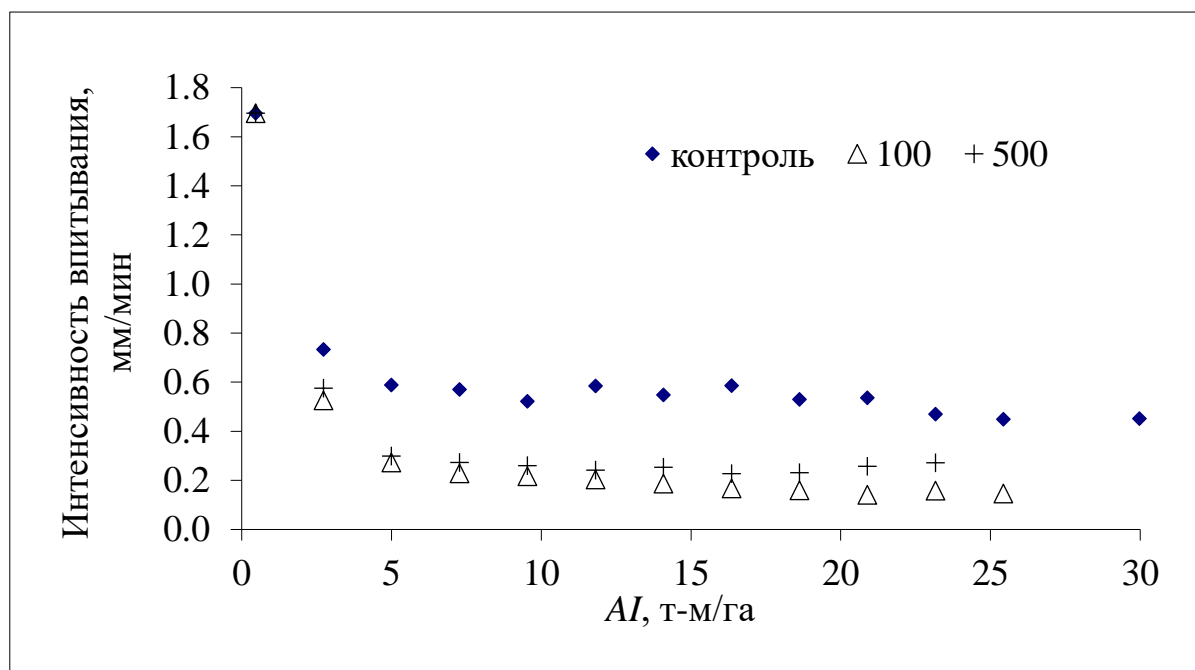


Рисунок 17 – Зависимость интенсивности впитывания от эрозионного индекса дождя

Установившаяся интенсивность впитывания на контрольном варианте была выше в два раза, чем на вариантах с добавлением цинка в почву. Вариант 1 и 2 не имели достоверных различий между собой.

При анализе выноса со стоком растворенного цинка по разным вариантам (рис. 18) получена высокая концентрация этого элемента в первую минуту, затем постепенное снижение его концентрации.

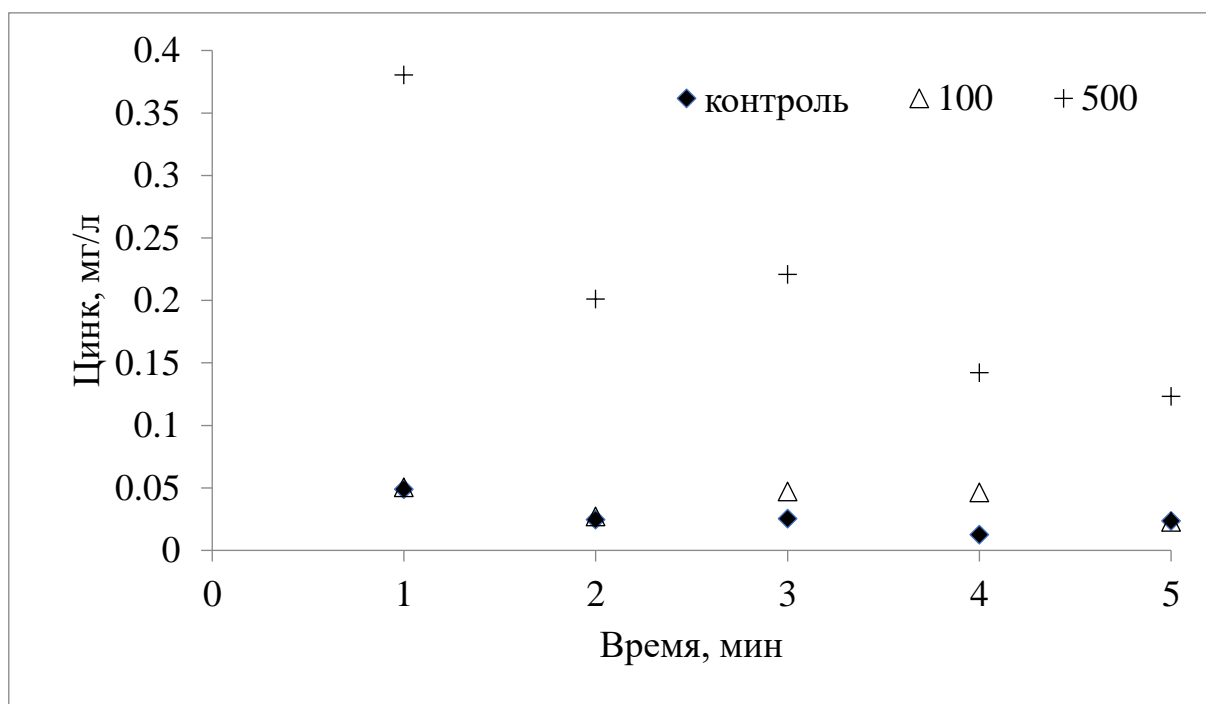


Рисунок 18 – Зависимость выноса цинка (мг/л) от начала стока

Для варианта 2 с внесением цинка в количестве 500 мг/кг концентрация растворенного вещества в первые пять минут падает в несколько раз. Для контроля и варианта 1 достоверной разницы не отмечено, несмотря на то, что установившаяся скорость впитывания для контрольного варианта выше, чем для варианта 1.

Следовательно, при низких концентрациях цинка в почве его вынос будет практически отсутствовать.

Средняя концентрация цинка в стоке была получена в пределах 0,02-0,03 мг/л для контроля и варианта 1 и 0,21 мг/л – для варианта 2.

Оценка выноса из почвы растворенных веществ методом дождевания позволяет определить и количественно оценить потери веществ из почвы под воздействием естественных осадков. Этот метод может быть использован для исследования загрязнения почвы и разработки мероприятий с целью его предотвращения или снижения. Исследования были проведены при одинаковой температуре внешней среды (вода, почва, воздух). Поэтому была поставлена задача оценить изменения концентрация растворенных веществ в стоке при дождевании с разной температурой.

Были заданы контрастные температуры: +1 °С и +20 °С. По вышеописанной технологии проведена подготовка искусственных почвенных образцов. Использовали почву с внесением Zn (водный раствор нитрата) в количестве 500 мг/кг, т.к. предыдущий эксперимент показал, что при низких концентрациях практически невозможно оценить вынос элементов со стоком.

Отличие от предыдущего эксперимента было в том, что перед проведением дождевания образцы почвы и воды двое суток находились при разной температуре окружающей среды. Эксперимент также проведен при разной температуре, для этого дождевальная установка была перенесена к почвенным образцам.

Плотность почвенных образцов –  $1,20 \pm 0,03$  г/см<sup>3</sup>, влажность –  $21,7 \pm 0,04$  %.

Интенсивность дождевания –  $1,63 \pm 0,02$  мм/мин. Начало стока отмечено на 30 с. Продолжительность дождя в среднем 15 мин.

Экспериментально установлено, что средняя концентрация цинка в стоке для почвенных образцов с разной температурой в пределах погрешности одинаковая ( $0,20 \pm 0,03$  мг/л). Следовательно, в температурном интервале 1-20 °С она не зависит (или слабо зависит) от температуры.

Практическое применение результатов оценки выноса растворенных веществ методом дождевания может помочь в поиске эффективных мер для защиты почвы и окружающей среды, а также способствовать устойчивому использованию земельных ресурсов.

Используя результаты оценки выноса растворенных веществ, можно определить потенциальный уровень загрязнения почвы и окружающей среды. Отсутствие зависимости от температуры упрощает разработку методов расчёта потерь из почвы растворённых веществ (включая разработку нормативов).

Зная, какие вещества, и в какое их количество выносятся из почвы при выпадении ливневых дождей, можно разработать конкретные меры для предотвращения или снижения загрязнения. Например, это может включать создание барьеров, фильтров или лесных полос, которые помогут задерживать и удерживать растворенные вещества.

Результаты могут служить основой для планирования использования земель и поддержания их устойчивости. Например, можно определить наиболее подверженные участки загрязнению и принять меры для охраны этих почвенных ресурсов.

Результаты оценки выноса растворенных веществ могут быть использованы как основа для разработки законодательных и нормативных актов, связанных с контролем и снижением загрязнения почвы и окружающей среды. Они могут служить для доказательства необходимости принятия определенных мер и предоставить научное обоснование для политики экологического сохранения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные выше методы физического моделирования дождевых осадков основаны на критериях подобия искусственных и естественных дождей. Эти методы обеспечивают: 1) применение для естественных дождей результатов измерения, которые получены для искусственных дождей; 2) большое сокращение затрат и времени на проведение экспериментальных исследований.

Методические рекомендации могут быть использованы как руководство по применению этих методов на малых стоковых площадках для проведения экспериментальных исследований впитывающей способности почвы и по выносу со стоком из почвы растворённых химических веществ, в том числе и тяжёлых металлов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Лисецкий, Ф. Н.** Современные проблемы эрозиоведения / Ф. Н. Лисецкий, А. А. Светличный, С. Г. Черный. – Белгород : Константа, 2012. – 456 с.
2. **Будник, С. В.** Ливневый сток со склонов: монография / С. В. Будник. – Житомир : ЖГУ им. И. Франко, 2007. – 184 с.
3. **Сухановский, Ю. П.** Моделирование водной эрозии почв : монография / Ю. П. Сухановский, А. В. Прущик. – Курск : ФГБНУ Курский ФАНЦ, 2023. – 175 с.
4. **Соболь, Н. В.** Применение метода дождевания при изучении эрозионных процессов в лабораторных условиях / Н. В. Соболь, А. М. Ахметов // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. – 2015. – № 15. – С. 152-155.
5. **Манжина, С. А.** К вопросу разработки лабораторной установки для модельного исследования деградации почв (на примере водной эрозии) / С. А. Манжина // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12. – № 3. – С. 76-91. – DOI 10.31774/2712-9357-2022-12-3-76-91.
6. **Сухановский, Ю. П.** Методика дождевания стоковых площадок для исследования эрозионных процессов / Ю. П. Сухановский, А. И. Санжаров, О. Г. Чуян, и др. – Курск : ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2005. – 30 с.
7. **Zhao, W.** Degradation debts accounting: A holistic approach towards land degradation neutrality / W. Zhao, T. Hua, M. E. Meadows, P. Pereira // Global Change Biology. – 2021. – Vol. 27. – P. 5411–5413. – DOI 10.1111/gcb.15855.
8. **Егоров, И. Е.** Капельно-дождевая эрозия – рельефообразующее значение и методы изучения / И. Е. Егоров // Биология. Науки о земле. – 2015. – Т. 25. – Вып. 2. – С. 159-166.
9. **Рубаник, Ю. О.** Методические рекомендации по расчету среднемноголетнего смыва почв в открытой геоинформационной системе

QGIS. / Ю. О. Рубаник, А. В. Гостев, А. Н. Золотухин, И. В. Подлесных. – Курск : ФГБНУ Курский ФАНЦ, 2024. – 96 с.

10. **Буковский, М. Е.** Морфометрический анализ рельефа северо-западной части Тамбовской области / М. Е. Буковский, К. А. Кузьмин // Региональные геосистемы. – Vol. 48(2). – P. 236-253. – DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-2-236-253.

11. **Дериглазова, Г. М.** Основы научных исследований в агрономии / Г. М. Дериглазова, А. В. Гостев. – Курск : ФГБНУ Курский ФАНЦ, 2024. – 106 с.

12. **Norton, L. D.** Evolution of a linear variable intensity rainfall simulator for surface hydrology and erosion studies / L. D. Norton, R. Savabi // Applied Engineering in Agriculture. – 2010. – Vol. 26. – No 2. – P. 239-245.

13. **Mahmoodabadi, M.** Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion / M. Mahmoodabadi, S. A. Sajjadi // Geomorphology. – 2016. – Vol. 253. – No 1. – P. 159-167. – DOI 10.1016/j.geomorph.2015.10.010.

14. **Sobol, N. V.** Effect of rainfall intensity and slope steepness on the development of soil erosion in the Southern Cis-Ural Region (a model experiment) / N. V. Sobol, I. M. Gabbasova, M. A. Komissarov // Eurasian soil science. – 2017. – Vol. 50. – No 9. – P. 1098-1104. – DOI 10.1134/S106422931709006X.

15. **Saber, A. N.** Rainfall-Runoff Simulation of Radioactive Cesium Transport by Using a Small-Scale Portable Rainfall Simulator / A. N. Saber, P. Somjunyakul, J. Ok, et al. // Water Air Soil Pollution. – 2019. – Vol. 226. – P. 230-245. – DOI 10.1007/s11270-019-4268-9.

16. **Нуруллаев, А. К.** Определение влияния крутизны склона и интенсивности осадков на развитие эрозии почвы в условиях модели искусственного дождевания / А. К. Нуруллаев, Г. Т. Джалилова // Научное обозрение. Биологические науки. – 2024. – № 1. – С. 51-56. – DOI 10.17513/srbs.1354.

17. **Апажев, А. К.** Анализ факторов, влияющих на возникновение и развитие эрозионных процессов на склоновых землях / А. К. Апажев, Ю. А. Шекихачев, А. Г. Фиапшев // Инновационная наука. – 2016. – № 3-3. – С. 21-23.

18. **Демидов, В. В.** Лабораторная дождевальная установка / В. В. Демидов, П. С. Шульга, Е. Н. Есафова, и др. // Патент на изобретение RU 171157 U1. Заявитель и патентообладатель ФГБНУ МГУ им. М.В. Ломоносова. Заявка № 2016110105, 21.03.2016, опубл. 23.05.2017, Бюл. № 15.

19. **Вытовтов, В. А.** Изучение равномерности распределения капель дождя по площади дождевания ПДУ / В. А. Вытовтов // Рациональное землепользование: оптимизация земледелия и растениеводства: сборник докладов V Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения академика РАСХН А. П. Щербакова, Курск, 28-30 сентября 2021 г. – Курск : ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», 2021. – С. 65-70.

20. **Вытовтов, В. А.** Портативная лабораторно-полевая дождевальная установка / В. А. Вытовтов, Ю. П. Сухановский, А. В. Прущик // Патент на полезную модель РФ № 184625. Патентообладатель ФГБНУ «Курский научно-исследовательский институт агропромышленного производства». Заявка № 2018112099, 03.04.2018, опубл. 01.11.2018, Бюл. № 31.

21. **Sukhanovskii, Yu. P.** A new index for rainfall erosivity on a physical basis / Yu. P. Sukhanovski, G. Ollesh, K. Y. Khan, et al. // Plant Nutrition Soil Science. – 2002. – Vol. 165. – P. 51-57.

22. **Титов, А. Г.** Проблема очистки водных растворов в методе дождевания при исследовании потерь из почвы биогенных веществ / А. Г. Титов // Агроэкологические проблемы почвоведения и земледелия: международная научно-практическая конференция Курского отделения МОО «Общество почвоведов им. В.В. Докучаева». – Курск : ФГБНУ Курский ФАНЦ, 2019. – С. 360-363.



23. **Sukhanovskii, Yu. P.** Assessment of soil infiltration capacity by using portable rainfall simulator / Y. P. Sukhanovskii, V. A. Vitovtov, A. V. Prushchik, et al. // Dokuchaev Soil Bulletin. – 2015. – Vol. 78. – P. 26-35.

24. **Rahmati, M.** Development and analysis of the Soil Water Infiltration Global database / M. Rahmati, L. Weihermuller, J. Vanderborght, et al. // Earth System Science Data. – 2018. – Vol.10. – P. 1237-1263. – DOI 10.5194/essd-10-1237-2018.

25. **Сухановский, Ю. П.** Методика определения потерь из почвы биогенных веществ с использованием портативной дождевальной установки / Ю. П. Сухановский, В. А. Вытовтов, Ю. А. Соловьёва и др. // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – Т. 30. – № 6. – С. 68-71.

26. **Sukhanovskii, Yu. P.** Application of rainfall simulator methods for the study of soil processes / Yu. P. Sukhanovskii, A. V. Prushchik, E. V. Dubovik // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. VIII Congress of the Dokuchaev Soil Science Society. – 2021. – No. 862. – 012111 – DOI 10.1088/1755-1315/862/1/012111.

27. **Rodriguez-Eugenio, N.** Soil Pollution: a hidden reality / N. Rodriguez-Eugenio, M. McLaughlin, D. Pennock. – Italy : Rome, 2018 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.fao.org/3/I9183EN/i9183en.pdf> (Дата обращения: 14.09.2024).

28. **Клюев, Н. Н.** Качество атмосферного воздуха Российских городов в 1991-2016 гг. / Н. Н. Клюев // Известия РАН. Серия географическая. – 2019. – № 1. – С. 14–23. – DOI 10.31857/s2587-55662019114-23.

29. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование / под редакцией чл.-кор. РАН Н. И. Санжаровой, к.б.н. П. Н. Цынгвинцева. – Обнинск : ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. – 398 с.

30. **Дубовик, Д.В.** Тяжелые металлы в склоновом агроландшафте / Д. В. Дубовик, Е. В. Дубовик. – Курск : ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2016. – 170 с.

**Methodological recommendations for the use of a portable laboratory field sprinkler**  
[Text] : brochure / A. V. Pruschik, Yu. P. Sukhanovsky, V. A. Vytovtov, Yu. O. Rubanik, S. A. Tarasov. – Kursk : Kursk FARC, 2024. – 49 p. – ISBN 978-5-6052912-5-1

The methodological recommendations were developed on the basis of experimental studies conducted in 2019-2024, using the author's device – a portable laboratory and field sprinkler system based on the Federal Agricultural Kursk Research Center. The design of the sprinkler system is described, recommendations for conducting experiments to measure the absorbency of soils, the removal of chemical elements, including heavy metals, from the runoff.

The brochure is intended for scientists and specialists in the field of soil erosion, agro-soil science, ecology, and other related agricultural and biological disciplines, as a guide to conducting experimental studies using the method of physical modeling of rainfall on small runoff sites.

Field of application – agriculture, agro-soil science, ecology.

Reviewer:

*V. K. Kuznetsov – Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»*

The brochure was reviewed and approved by the Academic Council of the Kursk FARC (Protocol No.14 of November 22, 2024).

The work was carried out in accordance with the topics of the state task No. 0632-2019-0017 and FGUW-2022-0002 of Kursk FARC for 2019-2024.

© A. V. Prushchik, Yu.P. Sukhanovskii, V. A. Vitovtov,  
Yu. O. Rubanik, S. A. Tarasov, 2024  
© Federal Agricultural Kursk Research Center, 2024

ISBN 978-5-6052912-5-1

## **Научное издание**

Прущик Анастасия Викторовна

**Методические рекомендации по применению портативной лабораторно-полевой дождевальнoй установки** [Текст]: брошюра / А. В. Прущик, Ю. П. Сухановский, В. А. Вытовтов, Ю. О. Рубаник, С. А. Тарасов. – Курск : ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2024. – 49 с. – ISBN 978-5-6052912-5-1.

Сдано в набор 10.12.24 г. Подписано в печать 12.12.24 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 2.85. Тираж 500 экз. Заказ № 460.

Отпечатано: «Деловая полиграфия»

ИП Бескровный Александр Васильевич

г. Курск, ул. К. Маркса, 61 Б.

E-mail: zakaz-zachetka@mail.ru



**ФГБНУ  
«КУРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»**

305021, Россия, г. Курск, ул. Карла Маркса, д. 706  
Телефон: (4712) 53-42-56, факс: 53-67-29  
E-mail: kurskfarc@mail.ru

ISBN 978-5-6052912-5-1

