

К. Н. Кулик, А. Р. Зубов, И. Г. Зыков, А. А. Зубов

**МЕТОДОЛОГИЯ ИЗУЧЕНИЯ
ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЛЕСОАГРАРНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ
ЛАНДШАФТАХ**

Монография

Волгоград*ФНЦ агроэкологии РАН*2018

Кулик, К. Н. Методология изучения эрозионных процессов в лесоаграрных и техногенных ландшафтах / К. Н. Кулик, А. Р. Зубов, И. Г. Зыков, А. А. Зубов; ФНЦ агроэкологии РАН. – Волгоград, 2018. – 252 с.

В монографии описаны основные методы и методические подходы к изучению эрозионно-гидрологических и дефляционных процессов, приборы для учета стока и смыва почвы, для ветроэрозионного мониторинга – как общеизвестные, так и разработанные в ходе исследований, осуществлявшихся авторами в Институте охраны почв УААН и ВНУ им. В.Даля, в отделе борьбы с эрозией почвы ВНИАЛМИ. Сделан их анализ, даны примеры использования и полученные результаты.

Монография предназначена для аспирантов и студентов агрономических и экологических специальностей, может быть полезна специалистам в области сельского хозяйства, агроэкологии и охраны почв.

Kulik, K. N. Methodology of study of erosive processes in the agroforestry and technogenic landscapes / K. N. Kulik, A. R. Zubov, I. G. Zykov, A. A. Zubov; FSC of agrarian ecology of RAS. - Volgograd, 2018. – 252 p.

The monograph describes the basic methods and methodical approaches to the study of erosive-hydrological and deflation processes, devices for the registration of flow and soil losses, for wind-erosion monitoring – both well-known ones and developed during researches, carried out by authors in the Institute of soil conservation of UAAS and Volodymyr Dahl East Ukrainian national university, in the Department of soil conservation of VNIALMI. Their analysis is done, the examples of the use and got results are given.

The monograph is intended for graduate students and students of agronomical and ecological specialties, it can be useful for the specialists in area of agriculture, ecology and soil conservation.

Рецензент: В. М. Ивонин, доктор с.-х. наук, профессор.

© Кулик К.Н., 2018
© Зубов А. Р., 2018
© Зыков И. Г., 2018
© Зубов А. А., 2018
© ФНЦ агроэкологии РАН, 2018

ISBN 978-5-9909842-1-9

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССАХ	
1.1. Классификация видов эрозии.....	8
1.2. Физические основы эрозии.....	9
1.2.1. Поверхностный сток талых и дождевых вод.....	9
1.2.2. Механика водной эрозии.....	22
1.3. Развитие представлений о эрозии и мероприятиях по борьбе с ней...	35
1.3.1. Научные основы почвозащитных систем земледелия.....	37
1.3.2. Принципы противоэрозионной организации территории.....	37
1.3.3. Управление эрозионно-гидрологическими процессами с помощью мероприятий постоянного действия.....	39
1.4. Моделирование как метод прогнозирования эрозионной опасности земель и оценки эффективности почвозащитных мероприятий.....	45
1.5. Классификация методов изучения эрозионно-гидрологического и дефляционного процессов	51
РАЗДЕЛ 2. ПАССИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ПРИРОДЕ	
2.1. Учет эрозии по замеру объема водоросин.....	53
2.2. Метод шпилек	60
2.3. Изучение дефляционных процессов путем замера нанорельефа.....	63
2.4. Метод микронивелирования.....	64
2.5. Фотографические методы.....	65
2.6. Радиоизотопный метод определения потерь почвы.....	65
2.7. Методы и устройства для измерения потоков почвы в процессе водной и ветровой эрозии.....	66
2.8. Определение потерь почвы по отложению наносов.....	73
2.9. Методы учета выносимой ветром почвы.....	83
2.10. Оценка интенсивности эрозионных процессов на водосборах по речному стоку взвешенных наносов.....	90
РАЗДЕЛ 3. АКТИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ПРИРОДЕ	
3.1. Изучение эрозии на стоковых площадках и малых водосборных бассейнах.....	95
3.2. Приборы и оборудование для измерения стока воды со стоковых площадок и малых водосборов.....	100
3.3. Метод искусственного дождевания.....	120
3.3.1. Энергетические характеристики осадков.....	120
3.3.2. Конструкции дождевальных установок, разработанных в СНГ и за рубежом.....	123
3.3.3. Дождевальная установка, разработанная в УНИИЗПЭ.....	127
3.3.4. Дождевальная установка конструкции ЛИАПП.....	132
3.3.5. Методика определения параметров противоэрозионной стойкости почв на основе модели водной эрозии WEPP.....	136

3.3.6. Моделирование дождевого стока как фактора эрозионных и оползневых явлений на поверхности породных отвалов угольных шахт Донбасса.....	139
3.4. Метод активного полевого эксперимента в изучении эрозионно-гидрологического процесса.....	143
3.4.1. Метод напуска (привлеченного стока), разработанный Е.А.Гаршиневым и соавт.	143
3.4.2. Использование метода привлеченного стока в исследованиях УНИИЗПЭ.....	149
3.5. Методика вероятностной оценки слоя ливневых осадков.....	152
3.6. Моделирование ветровой эрозии в натурных условиях.....	154

РАЗДЕЛ 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

4.1. Определение противоэрозионной стойкости почв методом размыва струей воды.....	156
4.2. Принцип действия и устройство эрозионного лотка.....	157
4.3. Искусственное дождевание в лабораторных условиях.....	158
4.4. Лабораторная установка для изучения миграции веществ в почвенном профиле при эрозионно-гидрологических процессах.....	159
4.5. Устройство и принцип работы аэродинамической установки, используемой в исследованиях МГУ им. М.В. Ломоносова.....	163
4.6. Аэродинамическая установка, разработанная в ВНУ им. В.Даля.....	164
4.7. Новые методические подходы, разработанные авторами.....	173
4.7.1. Методика перехода от показателей дефляции породы, полученных в лаборатории, к естественным условиям.....	173
4.7.2. Методика расчета продолжительности ветров различной силы за различные расчетные периоды времени.....	175
4.7.3. Теоретическая модель дефляционного выноса породы с отвалов и ее отложения на прилегающей к ним территории.....	179
4.7.4. Новый метод оценки степени загрязненности почвенного покрова прилегающей к отвалам территории продуктами ветровой и водной эрозии их поверхности.....	184

РАЗДЕЛ 5. СОПУТСТВУЮЩИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И ПОЧВЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

5.1. Общие методы исследований.....	187
5.2. Водопроницаемость почвы и методы ее изучения.....	188
5.3. Определение влажности почвы.....	190
5.4. Мониторинг выпадения атмосферных осадков.....	191
5.5. Наблюдения за снежным покровом.....	193
5.6. Учет промерзания почвы.....	193
5.6.1. Усовершенствование методики изучения температурного режима почвы и результаты ее применения.....	195
5.6.2. Измерение температуры воздуха, почвы и снега.....	198

5.6.3. Математическая модель динамики промерзания почвы.....	199
5.7. Методы измерения скорости ветра.....	201
5.8. Оценка влияния лесных полос на ветровой режим и факторы водообразования в агроландшафтах.....	206
5.8.1. Влияние на ветровой режим.....	206
5.8.2. Влияние лесных полос на снегоотложение и запасы воды в снежном покрове.....	207
5.8.3. Влияние лесных полос на испарение влаги из снега.....	209
5.8.4. Влияние лесных полос на промерзание почвы и поверхностный сток талых вод.....	212
5.8.5. Влияние лесных полос и противоэрозионных гидротехнических сооружений на накопление влаги в почве.....	215
РАЗДЕЛ 6. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	
6.1. Усовершенствование методов изучения последствий эрозии на поверхности породных отвалов и оценка ее среднесуточной интенсивности.....	216
6.2. Разработка методики оценки защищенности территории агроландшафта лесными насаждениями по космическим фотоснимкам и получения картограмм ее состояния.....	220
РАЗДЕЛ 7. НЕКОТОРЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ХОДЕ ИССЛЕДОВАНИЙ	
7.1. Ливневые осадки и поверхностный сток. Особенности проявления эрозии при осадках различной обеспеченности.....	225
7.2. Математические модели потерь почвы на ложбинном водосборе при талом и ливневом стоке (рельефный блок).....	227
7.3. Комплексное влияние зимних осадков и температурного режима воздуха на формирование предпосылок, определяющих величину склонового и речного стока в период весеннего снеготаяния.....	231
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	237
ЛИТЕРАТУРА.....	240

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших народнохозяйственных задач для любой страны является защита почвенного покрова ее сельскохозяйственных угодий от эрозии. От решения этой задачи в большой степени зависит продовольственная безопасность страны, играющая такую же большую роль в ее стабильном развитии, как военная и гидрометеорологическая безопасность.

Как известно, эрозия почв - это процесс удаления их верхних - наиболее плодородных слоев под воздействием стекающих талых и дождевых вод или ветра. Следствием этого является постепенное превращение нормальных плодородных почв в слабо-, средне- и сильноэродированные их разности, характеризующиеся в различной степени сниженным плодородием и различающиеся поэтому своей ценностью для выращивания сельскохозяйственных культур – вплоть до полностью непригодных - «бедлендов».

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), приведенным в монографии [105], ежегодные потери продуктивных земель из-за эрозии в настоящее время в мире составляют 5–7 млн га. В Российской Федерации водной эрозии подвержено 17,8 % площади сельскохозяйственных угодий или 39,3 млн га. Вследствие эрозии площадь пашни ежегодно сокращается на десятки тысяч гектаров. Ежегодный ущерб от эрозии оценивают примерно в 10% дохода, произведенного сельским хозяйством. Схожая ситуация и в других государствах - бывших республиках Советского Союза. На территории Украины площадь эродированных сельскохозяйственных земель составляет 13,9 млн га (33,2 % их общей площади), а ежегодный прирост эродированных земель – 80–100 тыс. га [105]. Среднегодовые потери почвы на эродированных территориях страны достигают 15 т/га [197], ежегодные потери почв составляют около 600 млн т, в т. ч. свыше 20 млн т гумуса. Глубина гумусового горизонта даже на слабоэродированных почвах меньше до 1,5-2 раз, а содержание гумуса в черноземах обыкновенных среднесмытых не превышает 2-3% по сравнению с 5,7% несмытых аналогов.

Явно выраженный вследствие активного развития эрозионных процессов отрицательный баланс энергии и питательных веществ почвы приводит к уменьшению урожаев на 15-20% на слабоэродированных почвах, 30-40% на среднеэродированных, в 2-2,5 раза на сильноэродированных разностях. Потери продукции растениеводства от эрозии в Украине превышают 9-12 млн т зерновых единиц, а общий ущерб достигает 10 млрд долл. [135].

Поскольку эрозия почв – водная и ветровая происходит под действием временных водных и воздушных потоков (ветра), одним из основных принципов защиты почв от эрозии является регулирование этих потоков мероприятиями постоянного действия (МПД): противозэрозионными гидротехническими сооружениями, стокорегулирующими и ветроломными полезащитными лесными полосами, другими линейными рубежами. Способствуя снегозадержанию, переводу вод поверхностного стока в почву, уменьшению потерь влаги на испарение, они выполняют важные

мелиоративные функции. Они же необходимы для жесткой фиксации на местности контурных границ эколого-технологических групп земель, севооборотов, полей и рабочих участков.

Создание системы МПД должно базироваться на математических расчетах их размеров, расстояния между ними и других параметров. Для этого требуется расчет как потенциального стока и смыва почвы, так и реальной стокорегулирующей и почвозащитной эффективности МПД, а также агротехники. В основе существующих инструкций по их расчету лежат математические модели – уравнения и алгоритмы, связывающие сток и смыв почвы с целым рядом факторов, от которых они зависят – метеорологическими, почвенными, характеристиками рельефа, агротехники и т. д. Их разработка является результатом больших трудозатрат многочисленных исследователей как в странах СНГ, так и всего мира.

Однако хотя, казалось бы, потребности проектировщиков удовлетворены официально утвержденными методиками, уверенности в их полной оправдываемости и адекватности нет. Приходится констатировать и то, что существующие модели не позволяют в полной мере учитывать все особенности протекания эрозионно-гидрологического процесса в условиях каждого конкретного водосбора и особенно в условиях сложного рельефа.

Поэтому говорить о том, что необходимость в продолжении эрозионных исследований отпала, не приходится. Очень актуальна и подготовка кадров, способных осуществлять эрозионный мониторинг, решать почвоохранные проблемы – лесомелиораторов, почвоведов, агрономов, геоморфологов, гидрометеорологов и экологов (ведь эрозия - это не только сельскохозяйственная, но и большая экологическая проблема). Подтверждением широкого признания этого факта является то, что во многих университетах России, Украины и других стран читаются теперь курсы эрозиоведения.

Ввиду того, что в последние годы выпущен ряд учебников и пособий по эрозии и охране почв, очень детально рассматривающих все аспекты эрозии и охраны почв, в нашей монографии сделан акцент на методологии эрозионно-гидрологических исследований как основы, с которой начинается сбор информации для развития научных основ и методически-инструктивной базы формирования экологически устойчивых и высокопродуктивных агроландшафтов.

В монографии описаны основные методы и приборы для учета стока и смыва почвы, ветроэрозионного мониторинга – как общеизвестные, так и разработанные в ходе исследований, осуществлявшихся авторами в отделе противоэрозионных комплексов УНИИЗПЭ, а затем в Институте охраны почв УААН и ВНУ им. В. Даля МОН Украины, в отделе борьбы с эрозией почвы ВНИАЛМИ РАН. Даны примеры их использования и полученные результаты.

Опыт работы в Высшей школе и желание принести как можно больше пользы молодым читателям наложили свой отпечаток на характер изложения материала монографии, сделав его, как может показаться профессионалам эрозиоведения, излишне детализированным. Но авторы уверены, что и их коллеги найдут для себя в книге немало интересного и полезного.

РАЗДЕЛ 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССАХ

1.1 Классификация видов эрозии

Под эрозией почв понимают процесс отделения от поверхности почвы ее частиц и последующего их переноса поверхностным стоком временных водных потоков и ветром. Перенос частиц не бесконечен во времени и имеет неизбежное завершение в виде их отложения (аккумуляции) в том или ином месте ландшафта, поэтому эрозию рассматривают в совокупности с аккумуляцией – как единый процесс, называемый эрозионно-аккумулятивным процессом (ЭАП).

В зависимости от действующего агента эрозии ее, как известно, подразделяют на водную и ветровую. Водная эрозия происходит под влиянием стока дождевых, талых и поливных вод и, соответственно, подразделяется на дождевую (ливневую), эрозию при снеготаянии, ирригационную [95, 199]. Ветровая эрозия, называемая еще *дефляцией* (русский синоним – *выдувание*), связана с воздействием высокоскоростных воздушных потоков на оголенные от растительности участки с разрыхленной или малосвязной почвой. Оба процесса – ветровая и водная эрозия, рассматриваемые в широком смысле, когда они затрагивают не только поверхностный - плодородный слой горных пород, но и сами эти породы, являются одним из естественных геоморфологических процессов, в результате которых сформировался и продолжает формироваться современный рельеф. В совокупности с другими разрушающими процессами, сопровождающимися переносом масс горных пород, водную эрозию и дефляцию называют *денудацией*, которая рассматривается уже не почвоведением, а другой наукой - геоморфологией.

В зависимости от характера временных водных потоков на поверхности почвы водная эрозия подразделяется на *поверхностную* (неточно называемую иногда *плоскостной*) или *смыв* почвы и *линейную* (талвежную, овражную, русловую) эрозию или *размыв* почвы. Смыв почв осуществляется сравнительно небольшими, но многочисленными струйками талых и ливневых вод, стекающих со склонов. При этом образуется более или менее густая сеть струйчатых *размывов (водороин)* — русел временных ручейков. Глубина этих русел не превышает, как правило, глубины пахотного слоя, поэтому при вспашке поля все водороины заполняются почвой и «бесследно» исчезают. В зарубежной литературе этот вид эрозии делится на два подвида – «*rill erosion*» (ручейковая, хорошо заметная в виде русел глубиной, измеряемой сантиметрами) и «*interrill erosion*» (межручейковая эрозия). Под последней понимают смыв почвы самыми мелкими, но относительно широкими потоками, имеющими глубину, соизмеримую с размером агрегатов почвы, и оставляющими на выровненной ее поверхности следы, не воспринимаемые как размывы, а скорее как полосы сглаженной поверхности, из-за чего, видимо, и произошло слово «плоскостная» эрозия или «пеленной» сток. Линейная эрозия почвы вызывается более концентрированными струями талых и дождевых

вод, приуроченными обычно к тальвегу более или менее выраженных вытянутых углублений рельефа. Ее следствием являются формы размыва, называемые *промоинами*. Промоины в ложбинах обычно широкие, достигают глубины 10 см и более, но еще могут быть сглажены обычной обработкой почвы. В зарубежной литературе им присвоено название «*ephemeral gully erosion*», подразумевая их *эфемерное* (временное) проявление и исчезновение после обработки поля (рис. 2.2). Наиболее заметным проявлением линейной эрозии являются овраги (*gully erosion*), которые уже не могут быть выровнены обработкой – для этого требуется применение специальной техники – бульдозеров и др. Обычно овраги растут своей вершиной – вверх по склону.

Эрозия почв бывает *нормальная* и *ускоренная*. Нормальная (не очень удачно, на наш взгляд, называемая еще *геологической* за ее независимое от человеческой деятельности проявление) эрозия протекает медленно, не снижая плодородия почв, благодаря относительно устойчивому соотношению взаимодействующих компонентов ландшафта [39], и, по мнению М. Дж. Киркби [209], является нормальным условием его развития. При проявлении нормальной эрозии потеря верхних слоев почвы ежегодно компенсируется восстановлением за счет почвообразовательного процесса.

Ускоренная эрозия проявляется чаще всего при нарушении естественного растительного покрова в результате деятельности человека, и поэтому ее еще называют *антропогенной*. Потери почвы при проявлении ускоренной эрозии намного превышают их восстановление.

Процессы денудации (от лат. *denudatio* — обнажение), вызванные мощными гидрологическими явлениями в послеледниковые периоды, сформировали современный макро- и мезорельеф в почти неизменившемся к настоящему времени виде. А интенсивное формирование растительного и связанного с ним почвенного покрова в конце последнего позднечетвертичного эрозионно-аккумулятивного цикла, как отмечает Г.П.Сурмач [184], прервало его при незавершенном расчленении территории и тем самым "законсервировало" тогдашний рельеф в виде современной лощинно-балочной сети. Это, в свою очередь, создало предпосылки для интенсивного проявления антропогенной эрозии в результате хозяйственной деятельности человека.

1.2 Физические основы эрозии

1.2.1 Поверхностный сток талых и дождевых вод

Рассмотрим сток как причину водной эрозии. Поверхностный сток талых и дождевых вод возникает на участках местности, имеющих наклон (на склонах), как результат *водообразования*.

Водообразованием называется разность между *водоотдачей* или жидкими осадками и всеми видами потерь воды на склоновых землях [20].

Водоотдача, в свою очередь, - это количество воды, поступающей на поверхность почвы из тающего снежного покрова.

Процесс стока проходит следующие стадии: вначале воды, появившиеся на поверхности почвы вследствие водообразования, стекают по поверхности

элементарных склонов в виде большого числа мелких струй (глубиной, измеряемой миллиметрами и сантиметрами). Элементарными склонами считаются наклонные участки местности, лишенные каких-либо естественных условий для концентрации струй стока в единый поток. Ими могут быть не длинные, но широкие участки склона, примыкающие к водораздельной линии речного или балочного водосбора, а также левая и правая части *элементарных водосборов* - водосборных участков ложбин - представителей самого верхнего звена гидрографической сети. По мере своего протекания разобщенные струи сливаются и укрупняются, между ними зарождаются новые, но их расположение на элементарных склонах пока еще носит случайный характер. Преодолев путь, не превышающий нескольких десятков или первых сотен метров, струи достигают, наконец, *элементарного русла* - линии тальвега ложбины (рис. 1.1).

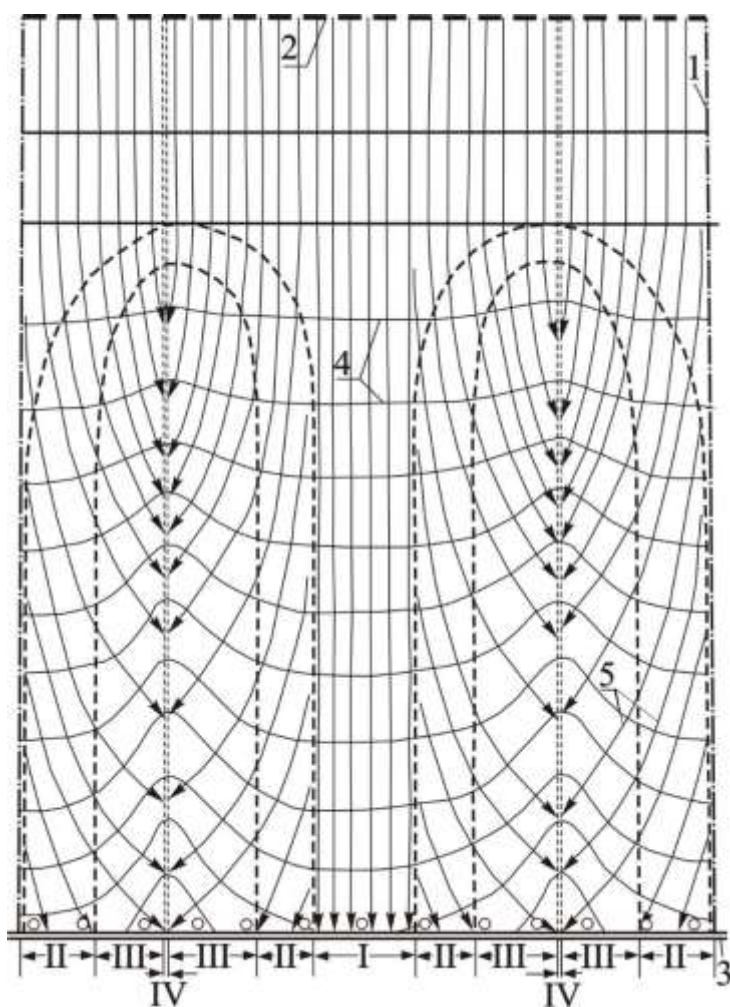


Рис. 1.1. Форма линий стока на склонах с ложбинами и зонирование склонов в поперечном направлении:
 1 – границы фрагмента склона,
 2 – верхний водораздел,
 3 – линейный рубеж (лесная полоса), 4 – горизонтالي,
 5 – линии стока; пунктир – границы поперечно-склоновых зон;
 I - IV – номера зон, различающихся условиями стекания воды и условиями функционирования линейного рубежа:
 I – межложбинная водораздельная зона с прямолинейным стеканием воды вдоль всего склона,
 II – пологая часть водосбора ложбины (без ее склонов),
 III – склоны ложбин,
 IV – притальвежная зона (днище ложбины) с концентрированным стеканием воды.

На этом завершается фаза т. н. *склонового* стока, от струй которого на склонах ложбин и их водосборов остается множество не крупных русел – *водороин*, а возникающая эрозия почвы классифицируется, как уже отмечалось выше, как *поверхностная* или *смыв*. На дне ложбин - вдоль их тальвега из множества струй склонового стока формируются концентрированные потоки воды, достигающие по глубине от нескольких до первых десятков сантиметров, а по ширине – нескольких метров и сопровождающиеся *линейной эрозией* –

формированием на дне ложбин более крупных русел - *промоин*, т.е. *размывом*. А сам сток классифицируется как *русловой*. Мелкие ложбины сливаются в более крупные, впадающие в лощины, а последние впадают в балки. Сток при этом вплоть до впадения в реки остается *руслowym*, а после впадения в них классифицируется как *речной*.

Как показали наши исследования [57, 58, 59, 65, 66, 72], ложбины – это неотъемлемый элемент склоновых земель. Их истоки появляются, начиная с уклона $0,5-1^\circ$ и с расстояния 100-200 м от водораздела, т.е. там, где собственно и начинает заметно проявляться эрозия (рис. 1.2). Поэтому очень скоро условия рельефа, судя по линиям стока на рис. 1.1, приводят к окончанию струйчатого характера эрозии и переходу ее в линейное состояние.

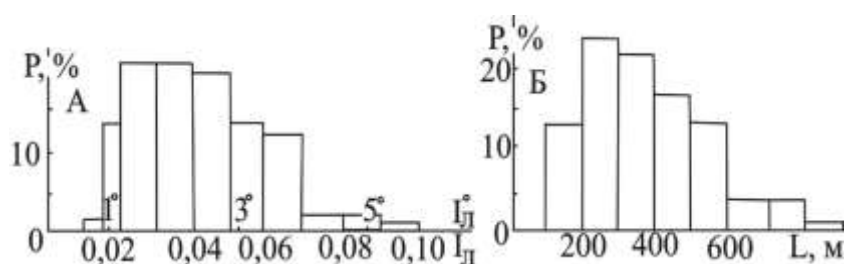


Рис. 1.2. Относительная частота появления первых ложбин Р (%) на склоновых землях прямой поперечной формы при различных интервалах их крутизны $I_{\text{л}}$ (А) и длины L (Б)

Струйчатый вдольсклоновый характер стекания воды сохраняется лишь вдоль узких полос, приуроченных к общему водоразделу и к водоразделам между ложбинными водосборами (зона I, рис. 1.1, 1.3).

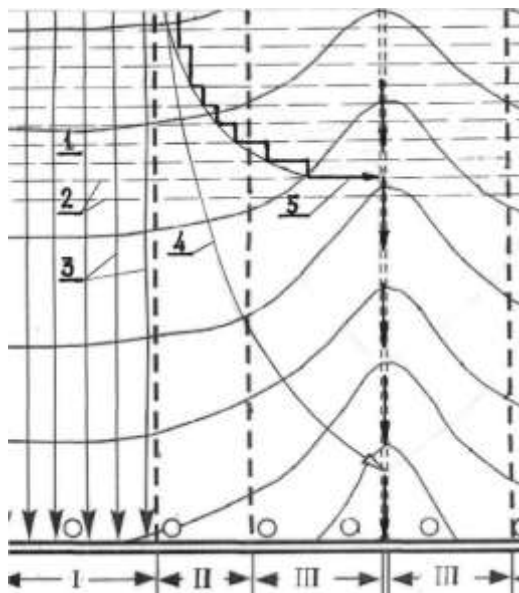


Рис. 1.3. Фрагмент склона с различными условиями стекания воды:

1 – горизонталы; 2 – бороздки нанорельефа (линии обработки поля); 3 – линии стока вне водосбора ложбины; 4 – теоретическое направление линии стока в пределах ложбинного водосбора; 5 – фактическое направление стекания воды с образованием водоройны

Но если обработка поля выполняется не поперек склона, а под некоторым углом к линии направления горизонталей, то под влиянием искусственного *нанорельефа*, формируемого сельскохозяйственными орудиями (микробороздки и валики почвы между ними) и особенно колесами тракторов (колеи), струйки воды могут отклониться в сторону водосбора ложбины. На водосборах ложбин (зона II) струи еще более отклоняются от направления склона, на склонах же ложбин (зона III) они имеют преимущественно поперечносклоновый характер,

если обработка поля сделана примерно так же. На водосборах ложбин, имеющих малый поперечный уклон, движение струй тоже тяготеет к направлению обработки, но вследствие малого уклона бороздок происходит их переполнение и перелив воды через валики и прорыв последних, а траектория движения струй приобретает ломанный вид (рис. 1.3) – вдоль линии обработки, потом поперек – с переливом через валик и снова по обработке.

В результате общее движение воды стока имеет направленность промежуточную между основным направлением склона и направлением обработки. И лишь на склонах ложбин сток происходит по кратчайшему направлению к тальвегу, т.е. по линиям обработки.

Таким образом, движение струй имеет сложный характер. В нем можно выделить несколько зон (рис. 1.3). Поэтому роль емкости искусственного нанорельефа (поверхностное задержание, шероховатость и др.) в разных частях склона различна. Различается и противоэрозионная устойчивость почвы в бороздках и валиках между ними, размываемых при переливах воды через них.

Это приводит к сложностям в прогнозировании эрозии с помощью той или иной ее модели, поскольку ни одна из существующих многочисленных моделей в мире, судя по их перечню в монографии [105] и сделанному ее авторами детальному их анализу, не учитывает факт наличия ложбин на склоновых землях, несмотря на то, что многие исследователи еще в прошлом веке обращали внимание на существование ложбин (Волощук [36], Шикула [207], Константинов И.С. [92], Лидов и др. [104], Полупан Н.И. [154], Сурмач [182] и др. [163, 108]) и связанные с ними пестроту направления движения воды по отношению к направлению обработки и разнообразие форм проявления эрозии и условий ее развития (Шелякин, Зубов, Белолипский, 1985 [5]; Зубов, 1988 [57], 1991 [58]; Зыков, Зубов, 1996 [81]; Зубов, 1998 [60], 1999 [62], 2000 [64]).

Связь параметров ложбин и их сети с длиной склона, его поперечной формой и крутизной, установленная в ходе наших исследований (Зубов А.Р., 1998 [60]; 2001 [66]) показана в табл. 1.1.

И лишь развитие и более активное внедрение ГИС-технологий, как отмечают авторы монографий [173, 105] сделало возможными попытки учитывать это. Как пример Светличным А.А. в [105] приводится работа Пятковой А.В. (2008), в которой сделана попытка учесть концентрацию потоков в «частных водосборах» путем разработки модели расчета коэффициента развития формы водосбора и ее компьютерной реализации с использованием языка программирования Delphi и ГИС-пакета PCRaster. При этом получены карты пространственно-распределенной эрозионной опасности. Но, как можно видеть, пока без попытки оценить влияние на работу ПЭГТС и эффективность последних.

Более просто эти вопросы решаются нами с помощью методов, освещенных в работах [57, 58, 60, 62, 64, 66, 72] и отчасти в разделе 7.2 данной книги, которые можно взять на вооружение разработчикам ГИС-технологий.

Таблица 1.1

**Наиболее вероятные параметры ложбинной сети в пределах
разных эколого-технологических групп земель (ЭТГ)**

Номер ЭТГ, крутизна склона	Длина склона, м	Попереч- ная форма склона	Параметры ложбинной сети, м				Доля водосборов от площади склона, %
			глубина ложбин	крутизна склонов	расстояние между тальвегами	ширина водосборов ложбин	
I (1-3°)	100-500	1-3*	0,30-0,55				
	500-1000		0,50-0,65				
	1000-1500		0,60-0,75				
	100-1500	1		0,007-0,018	100-200	85-170	85
		2		0,005-0,012	150-260	110-185	72
		3		0,004-0,010	190-320	110-190	59
II (3-5°)	100-500	1-3	0,30-0,65				
	500-1000		0,55-0,85				
	1000-1500		0,70-1,00				
	100-1500	1		0,012-0,023	70-150	60-125	85
		2		0,010-0,018	110-180	75-130	70
		3		0,008-0,014	130-225	80-135	61
III (5-7°)	500-1000	1-3	0,70-1,20				
		1		0,018-0,030	60-90	50-75	83
		2		0,014-0,020	90-130	65-90	70
		3		0,011-0,018	115-150	75-95	64

Примечание к табл. 1.1: 1 – поперечно-вогнутые склоны, радиус кривизны горизонталей $R = 250 \dots 1000$ м; 2 – прямые склоны, $R > 1000$ м, $R < -1000$ м; 3 – поперечно-выпуклые склоны, $R = -250 \dots -1000$ м. ($R > 0$, если центр кривизны - центр дуги, вписанной в горизонталь, находится ниже горизонтали по склону; $R < 0$, если центр кривизны находится выше горизонтали по склону).

Кроме названных трех категорий стока (склоновый, русловой, речной) существует еще *почвенный* и *грунтовый* сток. Грунтовый имеет значение для питания рек, в формировании эрозии почвы участия практически не принимает, если только не выклинивается на ее поверхность. Почвенный сток может подпитывать потоки в ложбинах на стадии добегания и усиливать их размывающую способность. Русловой ложинный и балочный сток размыва днища чаще всего не вызывает вследствие наличия здесь растительного покрова. Напротив, здесь часто даже происходит аккумуляция вынесенной с полей почвы.

Виды склонового стока.

По характеру стекания талых и ливневых вод склоновый сток делится на *поверхностный* и *подповерхностный* [23].

Поверхностный сток делят на две группы:

первая - сток *подвешенного типа*; вторая – *подпертого типа* (по А.Н. Бефани).

Если обозначить интенсивность выпадения осадков как a_t , а интенсивность впитывания – k_t , то условием формирования стока подвешенного типа согласно источника [23] является соотношение $a_t > k_t$.

Условия водообразования подпертого склонового стока следующие [23]:

1. Наличие на некоторой глубине относительного водоупора;
2. Интенсивность выпадения осадков $a_t < k_t$, (условие отсутствия поверхностного водообразования);

3. Интенсивность впитывания через водоупор $i_t < k_t$ (условие существования водоносного горизонта на водоупоре);

4. Уклон водоупора $I \approx 0$ (условие отсутствия подповерхностного оттока);

5. $X_{\text{уд}} > H\delta$ (условие выхода воды на дневную поверхность), где δ – пористость слоя почвогрунта высотой H до водоупора, $H\delta$ – количество воды, необходимое для заполнения пор в этом слое; $X_{\text{уд}}$ – количество осадков за дождь продолжительностью t_d .

Слой водообразования подпертого склонового стока $S_{\text{под}} = X_{\text{уд}} - H\delta$.

Подпертый сток распространён на территории низинных болот и на равнинах с неглубоким залеганием грунтовых вод.

После времени t_n заполнения слоя почвогрунта высотой H коэффициент стока будет равен 1, поэтому паводки подпертого типа, как отмечается в [23] могут быть очень высокими, но они менее динамичны, чем поверхностные. Они растянуты во времени и характеризуются большими объёмами.

Интенсивность водообразования подпертого стока $h_t = a_t - i_t$.

К подповерхностным видам стока, согласно [23], относятся *контактный склоновый сток* и *почвенный*.

Условия образования контактного склонового стока:

1. Наличие крупнообломочного материала в составе верхнего рыхлого слоя мощностью H ;

2. Интенсивность выпадения осадков меньше их впитывания: $a_t < k_t$;

3. Водовмещающая ёмкость больше количества осадков, то есть $\delta H > X_{\text{уд}}$;

4. Интенсивность просачивания через относительный водоупор меньше интенсивности впитывания: $i_t < k_t$;

5. Скорость движения воды по водоупору больше скорости движения воды в капиллярах почвы в сторону уклона.

Скорость контактного стока сопоставима со скоростью поверхностного движения воды.

Интенсивность водообразования контактного стока $h_t = a_t - i_t$.

Контактный вид стока распространён в горных районах.

Условия возникновения почвенного стока:

1. Интенсивность осадков меньше впитывания: $a_t < k_t$;

2. Интенсивность впитывания больше интенсивности просачивания сквозь относительный водоупор: $k_t > i_t$;

3. Отсутствие подпертого стока: $\delta H > X_{\text{уд}}$.

4. Скорость движения воды в почве, равная KI , намного меньше $V_{\text{пов}}$, то есть $KI \ll V_{\text{пов}}$.

Почвенный сток не играет самостоятельной роли в формировании потерь почвы от эрозии, а также максимума стока половодья реки, обнаруживая себя только на его спаде и образуя т. н. шлейф половодья [23].

После рассмотрения форм стока легче характеризовать другие его свойства.

При формировании стока на водосборе его величина $Y_{\text{пов}}$ может быть выражена уравнением баланса склоновой воды [23]:

$$Y_{\text{пов}} = S_0 - P = S_0 - (R + E + \Delta V) \quad (1.1)$$

где S_0 – количество выпавших на поверхность склона жидких осадков или водоотдача из снега; P – потери стока, в том числе: R – впитывание; E – испарение с почвы или тающего снега; ΔV – накопление воды на склоне в различном состоянии; размерность всех элементов баланса – объем на единице площади участка ($\text{м}^3/\text{га}$) или слой воды (мм).

Из уравнения (1.1) следует, что *потерями* стока являются элементы R , E и ΔV . Элемент ΔV еще называют *задержанием*. В него входят две составляющие: безвозвратные потери стока D_3 и потери на временное задержание $D_{\text{вр}}$ [23, 35]. Безвозвратные потери складываются из потерь на заполнение бессточных емкостей на поверхности склона (*поверхностное задержание*) и потерь на смачивание растительности (*перехват осадков*).

Временное задержание $D_{\text{вр}}$ включает в себя объем воды, находящейся в ручейковой сети и полузамкнутых понижениях на склоне. Эта влага принимает участие в стоке на его спаде, т.е. после прекращения водообразования, связанного с окончанием ливня или почти полным сходом снежного покрова.

Для отрезка времени, превышающего продолжительность склонового добегания, временное задержание из уравнения баланса исключается, а испарением можно пренебречь, т.е. сток равен:

$$Y_{\text{пов}} = S_0 - R - D_3 \quad (1.2)$$

Для речного водосбора, если рассматривается достаточно большой отрезок времени (декада или более), согласно [23] можно пренебречь и величиной D_3 , поскольку все впитается и войдет в R .

Потери на впитывание рассчитываются так:

$$R = R_T + R_\tau = Tk_T + \tau k_\tau \lambda_{\text{ср}} \quad (1.3)$$

В этом выражении первое слагаемое представляет собой величину впитывания за время дождя или таяния снега (T), второе – впитывание после их окончания - за период склонового добегания (τ) по русловой сети; $\lambda_{\text{ср}}$ – коэффициент затопления поверхности [23].

Следует отметить, что коэффициент затопления $\lambda_{\text{ср}}$ фактически можно рассматривать как отношение площади дна русловой сети к общей площади, и он невелик, поскольку добегание на водосборе ложбины осуществляется по сравнительно редкой сети наиболее крупных водороев и ее тальвегу, на водосборе балки к этой сети добавляются русла лощин и дно балки, на речном водосборе – русла балок, рек-притоков и главной реки. Поэтому потери R_τ в сравнении с R_T относительно невелики, и сток в фазе спада иссякает не сразу.

Время τ тоже существенно различается в зависимости от того, что рассматривается - водосбор ложбины, балки или реки. В первом случае длина русловой сети измеряется десятками и сотнями метров, во втором – сотнями метров и километрами, в третьем – единицами, десятками и сотнями километров.

Таким образом, в водообразовании выделяют две составляющие: *активное водообразование* – часть влаги, которая формирует склоновый сток и находится в движении; *пассивное водообразование* – влага, которая расходуется на

заполнение русловых и полупроточных емкостей и стекает после окончания осадков.

Поверхностный склоновый сток с водосбора в его замыкающем створе определяется разностью между водообразованием и потерями на впитывание на спаде склонового стока [23]:

$$Y_{\text{пов}} = S - R_{\tau} \quad (1.4)$$

Суммарная потеря стекающей воды на поглощение ее почвой характеризуется *коэффициентом поверхностного стока* η , который определяется отношением высоты слоя стока воды к высоте слоя влагозапасов снега (слоя выпавших на площадь водосбора осадков): $\eta = Y_{\text{пов}}/S_0$.

Существует и понятие *коэффициент водообразования* – это отношение слоя водообразования к слою влагозапасов снега (выпавших на площадь водосбора осадков): $\eta_0 = S/S_0$. Поскольку $Y_{\text{пов}}$ меньше S на величину R_{τ} , коэффициент стока всегда меньше, чем коэффициент водообразования [23].

Величина поверхностного стока и связанной с ним эрозии определяются сложным сочетанием природно-хозяйственных факторов.

Сток воды со склонов зависит от длины, крутизны и экспозиции склонов, типа и размера водосборов, особенностей почвенного и растительного покрова. Значительное влияние на сток воды и смыв почвы оказывает состояние поверхности почвы, применяемая на полях агротехника, организация территории и размещение границ полей, угодий, лесополос и дорог относительно рельефа местности.

Но главная причина стока имеет гидрометеорологическую природу – это влагозапас в снеге, количество и характер выпадающих жидких осадков. Как отметил Е.А. Гаршинев [39], они являются первоисточником влаги на границе раздела атмосфера-почва. В уравнении 1.1. они определяют *потенциальный*, т. е. предельно большой размер стока, корректируемый коэффициентом стока.

Играет роль не только размер, но и скорость водообразования, а при жидких осадках – интенсивность дождя.

При пренебрежении величиной испарения в период таяния снега и перехватом, решающая роль в реализации потенциального стокообразования принадлежит инфильтрации. Инфильтрация определяется таким свойством почвы, как *водопроницаемость*. По Н.А. Качинскому «водопроницаемость - это способность почвы воспринимать воду, подаваемую с поверхности, проводить эту воду от слоя к слою в ненасыщенных водой почвенных горизонтах и, наконец, фильтровать воду сквозь толщу горизонтов, насыщенных водой».

Процесс восприятия воды сухой или ненасыщенной водой почвой называется *впитыванием* (инфильтрацией) и измеряется *коэффициентом впитывания*. Он измеряется в тех же единицах, что и *интенсивность* (скорость) впитывания (см/сут, мм/час, м/сут, мм/мин), но отличается от нее тем, что (как и *коэффициент фильтрации*, характеризующий интенсивность прохождения воды сквозь горизонты, полностью насыщенные водой) определяется при *градиенте напора*, равном 1, т. е. при равенстве напора и длины пути, проходимого в почве впитывающейся в нее водой.

Различают *максимальную* и *реальную* водопроницаемость. Под реальной Г.П. Сурмач понимал водопроницаемость, обнаруживаемую почвой при естественном поступлении на ее поверхность дождевых и талых вод и несплошном затоплении водой поверхности. Максимальная наступает после сплошного затопления. Реальная зависит от интенсивности осадков – с ее увеличением она возрастает, стабилизируясь каждый раз на более высоком уровне [39].

Водопроницаемость зависит от свойств почвы. Огромную роль играет состояние почвы - талое или мерзлое [39, 101, 87].

Инфильтрационная способность мерзлых почв зависит от их влажности, т.к. при замерзании влаги в порах почвы происходит суживание просветов между агрегатами и даже их закупорка. А если поры вначале и не были закупорены, при впитывании воды может произойти ее замерзание и прекращение дальнейшего впитывания. Играет роль и пониженная вязкость воды при ее температуре около 0°C.

В общем виде уравнение стока согласно [39] определяется выражением:

$$y = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (1.5)$$

где x_1 - снегозапасы, x_2 – запасы влаги в верхнем (обычно 0-50 см) слое почвы или какой-либо их эквивалент, x_3 – глубина промерзания или какой-либо эквивалент температуры почвы.

Исследования А.Т. Барабанова и А.В. Кулик [15, 17] выявили, что глубина промерзания как фактор инфильтрации (и стока) действует так: до некоторой критической (лимитирующей) глубины (около 30-50 см) мерзлая почва инфильтрует воду без образования стока, при замерзании свыше критической глубины слой стока не зависит от глубины промерзания, а определяется лишь влажностью почвы и снегозапасами, возрастая с их увеличением. Вторым критическим фактором А.Т.Барабанов считает влажность почвы, так как при некотором малом влагосодержании сток также не формируется.

Принципиально важным является рассмотрение процесса инфильтрации в мерзлую почву с позиций теплообмена между талой водой и почвой. Как отмечается в [39], основным результатом исследований, осуществлявшихся многими авторами в этом направлении, явилась выработка концепции формирования в мерзлой почве при ее взаимодействии с инфильтрующейся влагой т. н. «запирающего слоя». Критерием формирования такого - водонепроницаемого слоя почвы является «равенство запаса холода в единице объема замерзшей почвы и количества тепла, приносимого в единицу объема почвы просачивающейся водой и выделяемого при ее замерзании» [87].

Развивая вышеназванную концепцию, Е.А. Гаршинев сформулировал собственную – *концепцию ледяного экрана* как лимитирующего фактора усвоения влаги мерзлой почвы, приводящего к формированию талого стока, детально изложенную им в монографии [39].

Аналогичное с (1.5) по факторам стока уравнение лежит и в основе прогнозов стока половодья на реках, и это не удивительно, ведь половодье – это результат поверхностного стока талых вод с разноудаленных от замыкающего

створа участков речного водосбора, трансформированного русловой сетью в результирующий гидрограф стока.

Отсюда вытекает важность эрозионно-гидрологических исследований на различных участках речного водосбора с позиций разработки региональных прогнозных моделей стока половодья, называемых в гидрологии *методиками*, поскольку универсальной модели, общей для всех рек не существует, и в каждом отдельном случае требуется разработка методики прогнозирования, руководствуясь накопленными многолетними данными по стоку половодья, глубине промерзания, влагозапасу снега, влажности (льдистости) почвы и т. д.

При краткосрочном прогнозировании стока половодья рек руководствуются следующей методической последовательностью:

- расчет интенсивности снеготаяния;
- расчет водоотдачи снежного покрова;
- расчет потерь талых вод;
- расчет трансформации склоновых вод в русловой сети.

Расчет интенсивности снеготаяния. Теоретической основой расчета является тепловой баланс снеговой поверхности, по которому определяется количество образовавшейся в результате таяния воды за единицу времени [106]:

$$h_T = S/L,$$

где h_T – слой талой воды; S – результирующая теплового баланса для снеговой поверхности, определяющая количество тепла, получаемого снегом и вызывающего его таяние; L – удельная теплота плавления льда.

Преследуя цель определиться с параметрами, которые важно изучать при эрозионно-гидрологических исследованиях для достижения другой очень важной цели – усовершенствовать эмпирические и теоретические уравнения, используемые при гидрологическом прогнозировании (разработанные в большинстве в середине 20-го века, т.е. в климатических условиях отличных от современных), рассмотрим методики определения факторов, определяющих сток.

Уравнение теплового баланса снегового покрова можно представить так:

$$S = S_P + S_{и,к} + S_{П} + S_T + S_X,$$

где S_P – результирующая радиационного баланса поверхности снега; $S_{и,к}$ – теплообмен поверхности снега с воздухом при испарении снега или конденсации влаги на его поверхности или в порах; $S_{П}$ – теплообмен между снегом и почвой; S_T – приток или потери тепла за счет турбулентного теплообмена поверхности снега с атмосферой; S_X – приток тепла с атмосферными осадками [106].

На практике величинами $S_{П}$ и S_X пренебрегают, тогда $S = S_P + S_{и,к} + S_T$.

При определении составляющих теплового баланса в качестве расчетной единицы времени принимают 12 часов или сутки, разделяемые на *дневную* и *ночную* части (с 7 утра до 19 вечера и с 19 вечера до 7 утра).

Радиационный баланс состоит из притока тепла за счет прямой $S_{ПР}$ и рассеянной $S_{РС}$ радиации и потерь тепла на *эффективное излучение* $I_{ЭФ}$ снегового покрова и *отражение* солнечной энергии снегом S_B .

$$S_P = (S_{PP} + S_{PC}) - (I_{ЭФ} + S_B).$$

Определение составляющих радиационного баланса осуществляется для дневной части суток, для ночной оно принимается равным нулю.

Приток прямой и рассеянной радиации рассчитывается по формуле:

$$(S_{PP} + S_{PC}) = (S_{PP} + S_{PC})_0 [1 - 0,20(N_0 - N_H) - 0,67N_H],$$

где $(S_{PP} + S_{PC})_0$ – сумма прямой и рассеянной радиации при безоблачном небе;
 N_0 и N_H – соответственно средняя за день общая и нижняя облачность.

Отраженная радиация рассчитывается по формуле:

$$S_B = r_B(S_{PP} + S_{PC}),$$

где r_B – коэффициент отражения (альбедо), который в первые дни таяния имеет значение 0,7-0,6, в основном 0,5, а в последние дни таяния – 0,3, т. е. отражательная способность снега со временем уменьшается соответственно повышению его плотности, загрязненности и увлажненности.

Эффективное излучение $I_{ЭФ}$ – это разность между длинноволновым (тепловым) излучением поверхности снега S_{CH} и *встречным излучением атмосферы* S_A .

По закону Стефана-Больцмана характеристики излучения определяются по формулам [106]:

$$S_{CH} = \beta\sigma(273 + T_{CH})^4; \quad S_A = \sigma(273 + T_2)^4 A\mu;$$

$$A = 0,61 + 0,0245\sqrt{e_2}; \quad \mu = 1 + 0,24N_H + 0,12(N_0 - N_H);$$

где β – излучательная способность снега, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_{CH} , T_2 – абсолютная температура поверхности снега и воздуха на высоте 2 м; e_2 – влажность воздуха на высоте 2 м.

Для расчета турбулентного теплообмена и теплообмена поверхности снега с атмосферой П.П. Кузьминым предложена эмпирическая формула:

$$S_{и,к} + S_T = 19,4[(\Theta_{CH} - \Theta_2) + 1,75(e - e_2)](0,18 + 0,98w_{10}),$$

где Θ_{CH} , e – температура поверхности снега и максимальная упругость водяного пара при этой температуре; Θ_2 , e_2 – температура и упругость пара на высоте 2 м; w_{10} – скорость ветра на высоте 10 м («высоте флюгера»).

Алгебраическая сумма рассчитанных элементов является величиной теплообмена снежного покрова с окружающим пространством за сутки.

Средние значения метеорологических элементов, необходимых для прогноза, определяются по данным стандартных наблюдений на метеостанциях, на 01, 07, 13, 19 часов, при этом расчеты выполняются отдельно для дневной и ночной частей суток:

$$x_D = (x_{07} + 2x_{13} + x_{19})/4; \quad x_H = (x_{19} + 2x_{01} + x_{07})/4;$$

где x – значение осредняемой характеристики, D и H – время ее определения.

При отсутствии наблюдений за температурой поверхности снега $\Theta_{CH} = 0$, если $\Theta_2 > 0$ и $\Theta_{CH} = \Theta_2$, если $\Theta_2 < 0$.

Упрощенный способ расчета теплового баланса основан на допущениях:

1. $\Theta_{CH} = 0$;
2. $S_{и,к}$ и $(S_{PP} + S_{PC})$ рассматриваются как функция разности

максимальной и среднесуточной температур воздуха за сутки $\Theta_{MAX} - \Theta_C$.

3. Эффективное излучение рассматривается как функция разности среднесуточной и минимальной температур за сутки $\Theta_C - \Theta_{MIN}$.

4. Упрощенная зависимость $e_2 = 0,350\Theta_2 + 4,11$.

5. Турбулентный теплообмен представляется в зависимости от скорости ветра и температуры воздуха.

Упрощенные формулы для расчета стока талой воды h_T , предложенные Е.Г.Поповым, имеют вид:

для дневной части суток:

$$h_D = 6,2[(1-r_v)(\Theta_{MAX} - \Theta_C) - 0,23(\Theta_C - \Theta_{MIN}) + 0,1\omega_D(\Theta_D - 0,5)];$$

для ночной части суток:

$$h_N = 6,2[-0,23(\Theta_C - \Theta_{MIN}) + 0,1\omega_N(\Theta_H - 0,5)];$$

где Θ_C – среднесуточная температура воздуха; Θ_{MAX} и Θ_{MIN} – максимальная и минимальная за сутки температура воздуха; Θ_D и Θ_H – средняя температура воздуха за дневную и ночную части суток; ω_D и ω_N – средняя скорость ветра за дневную и ночную часть суток;

В.Д.Комаров показал, что приближенные расчеты интенсивности таяния можно вести по эмпирической зависимости, учитывающей только среднюю суточную температуру воздуха [20]:

$$h_T = k_T \Sigma \Theta^+,$$

где h_T – слой талой воды, мм; k_T – коэффициент стаивания (мм/сут* 1°C) – слой талой воды, приходящийся на 1° положительной среднесуточной температуры воздуха; $\Sigma \Theta^+$ – сумма положительных средних суточных температур воздуха.

Согласно [20, 106] $\Theta^+ = (\Theta_{07} + \Theta_{13} + \Theta_{19})/3$.

Как отмечается в [20], коэффициент стаивания снега в открытом поле для районов, лежащих к северу от 55°с.ш. может быть принят равным в среднем 5,0-5,2 мм/град*сут. Южнее 50°с.ш. расчеты по формуле приводят к значительным погрешностям.

Для хвойного леса k_T равен 1,5-1,6, для лиственного – 3-4 мм/град*сут [106].

Расчет водоотдачи снега. Водоотдачей называют количество воды, которое поступает из тающего снега на поверхность почвы. Имея поры, снег обладает способностью удерживать в них некоторое количество воды. Отношение максимального количества талой воды, которое снег в состоянии удерживать во взвешенном состоянии, к общему весу снега называется *водоудерживающей способностью снега* (α). Она также носит название *влагоемкости* снега. Ее величина зависит от структуры снега и в период его таяния изменяется обычно от 1,10 до 1,14 и более. В практических расчетах принимается равной 0,13.

Средняя интенсивность водоотдачи снега при сплошном его покрове с неизменной структурой снега равна:

$$h_v = h_T / (1 - \alpha) = 1,15 h_T,$$

где h_T – интенсивность таяния снега.

Как видим, интенсивность водоотдачи выше, чем интенсивность таяния. Это объясняется тем, водоотдача начинается позже таяния, а завершается

одновременно с ним.

При выпадении жидких осадков и неполном покрытии водосбора снегом водоотдача равна:

$$h_b = [h_T / (1 - \alpha) + x] S_{ст},$$

где x – количество осадков за единицу времени; $S_{ст}$ – площадь снеготаяния в долях от всей площади водосбора.

Расчет потерь талых вод. Потери талых вод в гидрологических прогнозах рассчитываются в зависимости от природной зоны по *емкостной*, *инфильтрационной* или *инфильтрационно-емкостной* моделям без учета испарения, но с учетом потерь соответственно только на поверхностное задержание, только на инфильтрацию или на инфильтрацию и поверхностное задержание.

В общем виде модель потерь талых вод имеет вид [20, 106]:

$$П = П_0 * th(P/П_0),$$

где $П$ – общие потери; $П_0$ – максимально возможные потери; P – влагозапас в снеге; th – гиперболический тангенс, показывающий, что при увеличении запаса влаги в снежном покрове потери талого стока возрастают, достигая предельно возможного значения.

Эту закономерность также описывают следующими выражениями:

$$П = П_0 [1 - \exp(-P/П_0)]; \quad П = P_0 [1 - \exp(-П/P)]$$

Величина $П_0$ не является постоянной год от года, поскольку зависит от увлажненности почвы и температурного режима.

Аккумуляция талых вод, задержанных под снегом. Для понимания природы стока талых вод и его расчета важно учитывать, что при водообразовании на почве талая вода не сразу приходит в движение по направлению уклона поверхности поля – по причине затрудненных условий для этого. Находясь в поле, любой исследователь наверняка обращал внимание на наличие на почве под снегом, внешне, казалось бы, не затронутым таянием, слоя талой воды, иногда высотой в несколько сантиметров. В начале водообразования большая часть воды расходуется на ее аккумуляцию под снегом и меньшая – на сток в гидрографическую сеть. Со временем первая часть уменьшается, а вторая увеличивается. Максимальный слой талой воды, накапливающейся под снегом, определяется по эмпирической формуле:

$$h_{ак\ max} = 0,2Y - 4,$$

где Y – слой стока за половодье, мм.

После появления проталин на площади, составляющей 0,1 – 0,15 от общей площади водосбора, аккумуляция воды прекращается и начинается сброс воды, ранее удерживавшейся под снегом. Проталины – узкие полоски склона, свободные от снега, выступают в данном случае как дренажная сеть и часто бывают приурочены к местам концентрированного стекания воды – к ложбинам.

Подводя итог сказанному, можно выбрать перечень факторов стока, определяющих его, и требующих измерения – как для того, чтобы

прогнозировать сток, так и для проверки существующих моделей стока и их совершенствования (исходя из сказанного и выводов в [39, 116, 25 и др.]).

Это высота снежного покрова и запас воды в нем с учетом неравномерности залегания по площади водосбора; наличие притертой ледяной корки на поверхности почвы и ее высота; льдистость почвы; глубина промерзания и оттаивания почвы, а еще лучше – характер распределения температуры по глубине почвенного профиля в совокупности с данными о влажности почвы; облачность реальная или прогнозируемая; температура воздуха: в различные часы суток, максимальная, минимальная и средняя за дневную и ночную части суток, на высоте 2 м и у поверхности снега; температура снега; влажность воздуха или упругость водяного пара на высоте 2 м; показатели солнечной радиации; альбеда снега; жидкие осадки и др.

Льдистость почвы – это количество льда в почве. Отношение объема льда к объему мерзлого почвогрунта называется объемной льдистостью. Льдистость можно характеризовать содержанием влаги в почве перед замерзанием. Неполнота данных об осенней влажности почвы, связанная с трудоемкостью ее детального определения на большой территории, заставляет в расчетах использовать различные индексы осеннего увлажнения почвы, определяемые косвенными методами, например, по речному стоку за холодное время года.

Особенности формирования стока при выпадении жидких осадков.

Главное отличие ливневого стока от талого состоит в том, что, если предельная интенсивность водоотдачи из снега не превышает 5 мм/час (около 0,08 мм/мин), то интенсивность стокообразующей части ливня превышает 0,5 мм/мин. Но впитывание в мерзлые почвы на порядки ниже чем в немерзлые, и это обуславливает появление талого стока даже при интенсивности водоотдачи намного меньше предельной. Как же образуется ливневый сток при интенсивности инфильтрации в немерзлую почву, равной, например, 2-3 мм/мин и превышающей интенсивность выпадения жидких осадков? Причина в воздействии капель, приводящем к разрушению почвенных комков - агрегатов и коагуляции (заиливанию) почвенных пор, как будет показано на рис. 1.4, в результате чего инфильтрационная способность почвы падает до 10 раз и более [173], и возникает поверхностное стекание влаги выпадающих осадков.

Мы рассмотрели общие процессы формирования поверхностного стока. Детальные методики его расчета и прогнозирования изложены в инструктивных и методических материалах [29, 38, 48, 85, 112, 116, 127, 163, 166, 171]. Остановимся теперь на аспектах, определяющих эродирующее действие стока.

1.2.2 Механика водной эрозии

Режимы течения склоновых потоков. Как известно, в природе существует два режима движения жидкости - *ламинарный и турбулентный*. Ламинарный режим характеризуется упорядоченным параллельноструйным движением без образования вихрей, а турбулентный — хаотичным беспорядочным движением, когда струи внутри потока постоянно отклоняются и пересекаются друг с другом. Скорость в заданной точке турбулентного потока непрерывно

пульсирует, изменяясь как по величине, так и по направлению, и для каждого момента времени называется *мгновенной*. Она колеблется около некоторого постоянного по величине и направлению значения — усредненной скорости, которая тоже меняется во времени, но не так быстро.

Показателем степени турбулентности является безразмерное число Рейнольдса, определяемое по формуле:

$$Re = VH/\nu,$$

где H и V — глубина потока (м) и его скорость (м/с); ν — кинематическая вязкость (для воды при $t = 20^\circ\text{C}$ $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$);

$\nu = \mu/\rho_0$, где μ — динамическая вязкость жидкости (коэффициент внутреннего трения), ρ_0 — плотность воды ($\text{кг}/\text{м}^3$), $\mu = \nu\rho_0$, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Вязкость воды уменьшается при повышении температуры. Именно вязкости принадлежит значительная роль в ламинарном движении. Благодаря ей происходит поглощение части механической энергии потока с ее переходом в тепловую, т.е. *диссипация энергии* - причина гидродинамического сопротивления.

Ламинарный режим наблюдается при $Re < 300$, а турбулентный — при $Re > 600$. При $300 < Re < 600$ поток может быть как турбулентным, так и ламинарным в зависимости от шероховатости русла.

Турбулентность потока играет большую роль в развитии эрозионных процессов. Частицы почвы отрываются от поверхности в результате воздействия струй воды с высокими мгновенными значениями скорости, соответствующими максимальным пульсациям скорости потока. Кроме того, под действием длительной пульсирующей нагрузки со стороны потока на почву происходит постепенное ослабление межагрегатного сцепления ее частиц.

Как отмечается в [95, 138], в природе ламинарные потоки могут встречаться лишь на хорошо задернованных склонах, где вода течет ровным слоем малой глубины с небольшими скоростями, а также в начальной фазе снеготаяния, когда талая вода испытывает на своем пути сопротивление снега. В процессах водной и ветровой эрозии преобладает турбулентное движение.

Характер эрозии при ливнях и стоке талых вод.

В общем случае процесс водной эрозии почвы складывается из:

а) разрушения почвенных агрегатов каплями дождя и струями воды, которые формируются на поверхности склона при выпадении дождя или при таянии снега; б) отрыва и транспортирования почвенных частиц — наносов; в) их отложения (седиментации) на некотором расстоянии от места *начала наносообразования* (места отрыва частиц и начала их транспортирования).

При весеннем стоке в эрозионном разрушении почвы принимает участие только водный поток. При ливневой же эрозии разрушение почвенных агрегатов и их отделение от основной массы почвы начинается еще до возникновения стока - в результате действия капель.

На первых стадиях выпадения интенсивного дождя даже большие капли всасываются в почву, их влияние проявляется в оплывании почвенных комков, в уплотнении верхнего слоя почвы и ее кольматации («запечатывании»)

продуктами разрушения почвенных агрегатов. Это приводит к образованию почвенной корки со сниженной до 10 и более раз водопоглощающей способностью, как иллюстрирует схема из очень информативного источника - сайта нидерландского ученого Франса Кваада (рис. 1.4, [222]).

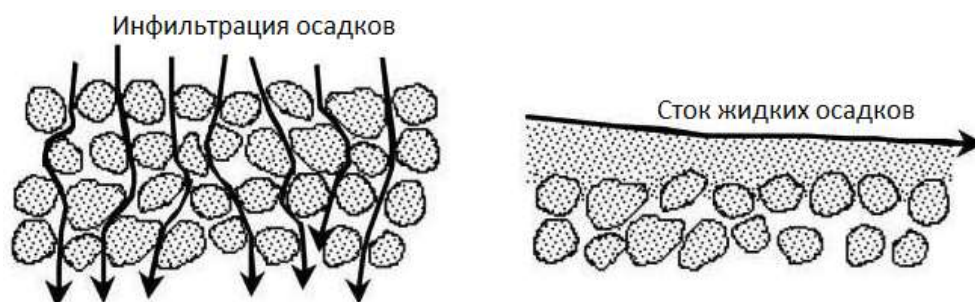


Рис. 1.4. Различия инфильтрации осадков при отсутствии ударного воздействия капель (слева) и при его наличии - после диспергации агрегатов почвы [222]

После появления на поверхности почвы пленки невпитавшейся воды капли дождя при ударе «разбрызгиваются» (рис. 1.5), захватывая при этом частицы почвы. Разбрызгивание частиц прекращается при высоте слоя воды более 5-6 диаметров капель. Вследствие разной длины траекторий разброса частиц вверх и вниз по склону, как показано на рис. 1.5, идет постепенное сползание почвы вниз по склону, называемое «эрозия разбрызгивания» [172].

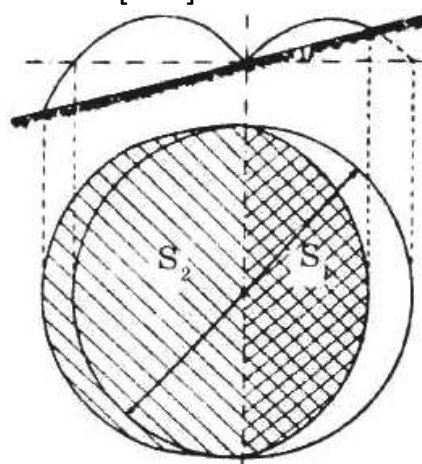


Рис. 1.5. Разбрызгивание капли [172]: слева – фото; справа – схема разлета частиц почвы при вертикальном падении капли на склон (по В.В.Сластихину, 1964): S_1 и S_2 - площади верхнего и нижнего полуэллипсов разбрызгивания.

В Нидерландах для изучения перемещения почвы по склону вследствие разбрызгивания («splash erosion») применяют специальные щитки с лотками в нижней части для сбора стекающих капель и частиц почвы (рис. 1.6, [222]).

Классическим приемом изучения воздействия капель дождя на почву являются чашки Эллисона, о которых будет рассказано в разделе 3.2.

Известно, что в результате разбрызгивания капель дождя на каждом гектаре поля в воздух поднимаются десятки и сотни тонн почвы [172]. Но даже на крутых склонах количество перемещаемой по склону почвы, как отмечают авторы упомянутого учебника, относительно невелико.

Гораздо более существенным влиянием капель дождя на процесс эрозии является то, что при ударе они взмучивают склоновые потоки, возбуждают в них дополнительную турбулентность, увеличивая тем самым их транспортирующую способность. А за счет возникающей пульсирующей «ударной волны» капли способны отрывать и сдвигать с места даже крупные частицы почвы, причем сдвиг частиц «вверх» - против течения струи и касательной составляющей силы тяжести происходит на меньшее расстояние, а сдвиг «вниз» - по направлению течения и этой составляющей силы тяжести – на большее расстояние. Таким образом капли помогают текущей воды промывать в почве свое русло.



Рис. 1.6. Оборудование для изучения эрозии разбрызгивания (фрагменты фотографий с сайта Dr. F.J.P.M. Kwaad [222])

Экспериментальными исследованиями установлено, что, если устранить влияние дождевых капель на склоновый поток малой глубины (до 1-2 см) его транспортирующая способность уменьшается в десятки раз. Согласно [172] в исследованиях Н. Гудзона [45] смыв почвы с участка с натянутой над ним сеткой, о которую разбивались большие капли и в виде мелких брызг падали на почву, был в 100 раз меньше чем с участка без такой сетки.

Отрыв частиц от дна потока и их перенос происходят, когда силы, способствующие эрозии, доминируют над силами, противодействующими ей.

Способствуют эрозии (отрыву и переносу частиц) такие силы, действующие на каждую из частиц поверхности почвы (на дне потока) [138]:

а) динамическое давление потока (лобовая сила) P_L ;

б) подъемная сила P_n ;

в) тангенциальная (направленная параллельно поверхности склона) составляющая силы тяжести $P_g' = P_g \sin \alpha$, где P_g - сила тяжести, α - угол наклона поверхности склона.

Лобовой силой называют алгебраическую сумму сил положительного давления потока на переднюю грань частицы почвы и отрицательного давления на заднюю, возникающего в результате образования за частицей зоны

завихрений. Величина лобовой силы пропорциональна площади наибольшего вертикального сечения частицы поперек потока и квадрату донной скорости.

Подъемная сила возникает вследствие различия скоростей обтекания водой нижней и верхней граней неподвижной частицы (подобно крылу самолета). Поскольку под лежащей на дне потока частицей скорость равна нулю, подъемная сила полностью определяется придонной скоростью потока и пропорциональна ее квадрату. Такие же силы действуют на почвенные частицы при воздействии воздушного потока – ветра.

Препятствуют отрыву частиц почвы и их переносу потоком такие силы:

- а) нормальная к плоскости склона составляющая силы тяжести $P_g'' = P_g \cos \alpha$;
- б) силы механического удержания частиц почвы корнями растений;
- в) межагрегатные силы сцепления недиспергированной связной почвы;
- г) сила трения уже отделившихся частиц связной или частиц несвязной почвы о ложе потока, обусловленная силой тяжести, действующей на частицы, и механическим «зацеплением» выступов шероховатости частицы и почвы.

Скорость потока, при которой имеет место неустойчивое равновесие между силами, удерживающими частицу и силами, стремящимися оторвать ее и перемещать, называют **неразмывающей** (или несдвигающей) скоростью V_n .

Как отмечают многие авторы, понятие неразмывающей скорости весьма условно, поскольку на дне потока всегда имеются диспергированные, отделившиеся от почвы частицы, наименьшие из которых могут прийти в движение уже при самых малых скоростях потока, еще не достигших V_n . Но этот процесс еще не считают эрозией. Начинается эрозия при достижении скоростью потока некоторого значения V_p , называемого **«размывающая скорость»**. Это наименьшая скорость, при которой наступает непрерывный отрыв и перенос частиц, приводящий к заметной эрозии почв.

Согласно [95], V_p определяют визуальным методом – путем наблюдения за поведением частиц на дне потока при постепенном увеличении его скорости в естественных ручьях и по результатам размыва образца почвы ненарушенного или нарушенного строения в гидравлических лотках, а также по специальным формулам. Обе скорости связаны таким соотношением: $V_p = 1,41 V_n$.

Наиболее полно учитывает особенности размыва почв в настоящее время, по мнению М.С. Кузнецова [95], модифицированная им формула размывающей скорости, разработанная Ц.Е. Мирцхулавой.

$$V_{\Delta p \omega} = 1,55 \sqrt{\frac{g m_1 m_2}{\rho_o n'} \left[\left(1 - \frac{P}{100} \right) d_w (\rho - \rho_o) (\cos \alpha - \sin \alpha) + 1,25 C_y^H K \right]}, \quad (1.6)$$

где $V_{\Delta p \omega}$ – донная размывающая скорость потока (для почвы исходной влажности w), м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; m_1 – коэффициент, зависящий от типа наносов в потоке (0,85 – донные корродирующие наносы, 1 – поток без наносов, 1,4 – взвешенные наносы при мутности > 1 г/л); m_2 – коэффициент, учитывающий связывающее влияние корневых систем растений; ρ и ρ_o – соответственно плотность твердой фазы почвы и воды, т/м³; n' – коэффициент

пульсации скоростей в потоке, принимаемый равным 2,3; P – порозность почвенных агрегатов, %; d_w – средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов после мокрого просеивания почвы на ситах по методу Савинова при ее исходной влажности w , м; α – угол наклона русла потока, град; K – коэффициент однородности почвы по сцеплению; C_y^H – нормативная усталостная прочность почвы на разрыв, характеризующая межагрегатное сцепление, т/м²: $C_y^H = IC_w$, где I – табличный коэффициент, зависящий от плотности почвы; C_w – сцепление почвы (по методу Цитовича) исходной влажности после быстрого затопления ее поверхности и насыщения до влагоемкости, т/м².

В упрощенном виде – для рыхлых пахотных горизонтов с плотностью не более 1,2 т/м³ ($l = 0$), не связанных корнями растений ($m_2 = 1$), при отсутствии в воде наносов ($m_1 = 0$), при сравнительно малых уклонах формула (1.6) имеет вид:

$$V_{\Delta\rho\omega} = 1,55 \sqrt{\frac{g}{\rho_o n'} \left[\left(1 - \frac{P}{100} \right) d_w (\rho - \rho_o) \right]}, \quad (1.7)$$

С размывающей скоростью связано понятие «наносообразование», под которым понимают процесс насыщения потока частицами – наносами, отрываемыми им от своего ложа и приводимыми в движение.

В ориентировочных расчетах максимально допустимую среднюю скорость в земляных руслах можно найти при $h/d \leq 600$ по формуле Б.И.Студеничникова:

$V_{\text{доп}} = 3,6(hd)^{1/4}$; а при $h/d > 600$ по формуле А.М.Латышенкова: $V_{\text{доп}} = 5d^{0,3}h^{0,2}$, где d – средний диаметр частиц грунта, м; h – глубина потока, м [180].

По Ц.Е. Мирцхулаве согласно [172] размыв почвы турбулентным потоком условно можно разделить на несколько этапов.

На начальном этапе смываются элементарные частицы и агрегаты, связь которых с основным массивом почвы по разным причинам нарушена. При постоянной скорости потока этот процесс прекращается после образования шершавой поверхности, обусловленной формой больших и водостойких почвенных частиц. При росте скоростей течения начинается подмывание выступающих над поверхностью почвы агрегатов, а это вызывает увеличение лобовой и подъемной сил. Увеличивается вибрация сил и динамическое влияние на агрегаты. В результате связи между поверхностными агрегатами и основной массой почвы постепенно разрушаются, агрегаты отрываются и выносятся потоком. Этот период размыва почвы поверхностным стоком характеризуется максимальными потерями почвы.

После вынесения всех или почти всех слабо связанных отдельностей с поверхности почвы, образуется шершавая поверхность, и при прочих равных условиях смыв уменьшается, проявляется тенденция к стабилизации интенсивности эрозии. Но дальнейший рост скорости потока может активизировать ее.

Склоновые потоки имеют неравномерную глубину и сложный продольный профиль с уступами и быстротоками, что увеличивает эродирующую способность потоков. При средних скоростях потока, недостаточных для отрыва

частиц, согласно [25] все-таки происходит локальный размыв почвы вследствие эродирующего действия струй воды, падающих с уступов.

Транспорт и аккумуляция наносов. Для правильной оценки и прогнозирования процесса эрозии важно учитывать не только размывающую, но и *транспортирующую способность потока*, т.е. способность нести *взвешенные* (илистые) и перемещать *донные* (песчаные) наносы.

Так, в легкоразмываемых несвязных грунтах интенсивность эрозии может сдерживаться неспособностью потока перемещать весь срывааемый им материал вследствие малой транспортирующей способности. И наоборот, поток, способный нести большое количество материала, может быть ненасыщенным наносами вследствие высокой эрозионной устойчивости русла.

Согласно одному из определений, под транспортирующей способностью потока понимают наибольший возможный при данном его режиме *расход наносов* на единицу ширины потока ($\text{кг/с}\cdot\text{м}$). Численно транспортирующая способность характеризуется также *предельной мутностью* $\rho_{\text{пр}}$ – наибольшим значением мутности, т.е. массы наносов в единице объема воды (кг/м^3), которую может иметь поток в данных условиях.

Транспортирующая способность потока зависит от его скорости и гранулометрического состава переносимого материала.

При сравнительно малом превышении скорости потока над V_p он переносит частицы перекачиванием и волочением по дну (*донные наносы*). Это происходит преимущественно под действием лобовой силы. Движение донных наносов имеет характер гряд. При дальнейшем росте скорости начинается и такая форма движения частиц, как *сальтация* – перемещение скачками. Это связано с ростом подъемной силы, которая начинает преобладать над лобовой. Под действием подъемной силы частица получает вертикальный импульс и подскакивает. При этом она продолжает испытывать лобовое давление, и к вертикальной составляющей скорости ее подъема добавляется горизонтальная. В результате частица поднимается не вертикально, а по наклонной, но очень крутой траектории. Вследствие подъема начинается обтекание частицы водой снизу, и поэтому подъемная сила прекращает свое действие, чему способствует также снижение скорости движения воды относительно частицы, теперь уже не неподвижной. Частица начинает падать, но по пологой траектории, испытывая действие силы тяжести и лобового давления. Упав на дно, частица вновь начинает испытывать действие подъемной силы, происходят новые и новые ее скачки. Скорость потока, при которой начинается такое движение частиц называется скоростью *начала скачка* V_2 .

При еще более высоких скоростях потока и растущей его турбулентности поднявшиеся частицы (вначале самые мелкие, а по мере роста скорости все более крупные) уже не возвращаются на дно, а подхватываются вихрями, возникающими в придонной области, и выносятся в толщу потока (*взвешенные наносы*). Чем крупнее частица, тем труднее ей подняться к поверхности потока. Поэтому крупные частицы концентрируются преимущественно в придонной области, а мелкие относительно равномерно распределяются в толще потока. Это

приводит к увеличению мутности от поверхности потока к его дну.

Скорость потока, при которой в нем начинается появление взвешенных частиц называется *скоростью начала взвешивания*.

Если скорость потока вдруг начнет уменьшаться, может начаться оседание частиц. Минимальное ее значение, при котором оседание еще не происходит, называется *незаиляющей скоростью* $V_{нез}$. Она несколько меньше скорости начала взвешивания. Знание этой скорости очень важно для правильной эксплуатации оросительных каналов и избежания их заиления. Начало заиления в склоновых потоках способствует аккумуляции наносов, т.е. снижению отчуждения уже смытых частиц за пределы полей.

Минимально допустимые при эксплуатации гидротехнических сооружений (незаиляющие) скорости протекания воды V_{min} зависят от количества и размеров взвешенных частиц. Для их определения существуют зависимости и таблицы [178], составленные на основе натурных наблюдений и опытных данных. Некоторые из них приведены ниже.

Если насыщенность потока наносами с диаметром частиц более 0,25 мм не превышает 0,1 г/л, то $V_{min} = a_1 \sqrt{R}$, где R – гидравлический радиус, м; множитель a_1 берется из таблицы в зависимости от среднего диаметра преобладающей массы взвешенных наносов.

Для расчета незаиляющей скорости потоков, несущих частицы диаметром менее 0,25 мм и текущих в руслах с коэффициентом шероховатости 0,0225, И.И. Леви предложил эмпирическую формулу: $V_{нез} = 0,5 \sqrt{R}$ [95].

Более развернутая формула расчета незаиляющей скорости потока, предложенная им же, имеет вид:

$$V_{нез} = 0,01 w \left(\frac{R}{d} \right)^{0,5} \left(\frac{G}{0,01} \right)^{0,25} \left(\frac{0,0225}{n_{II}} \right), \quad (1.8)$$

где d – средний диаметр преобладающей массы взвешенных наносов, мм;

w – гидравлическая крупность частиц диаметром d , мм/с; G – степень насыщенности потока наносами, % по массе; n_{II} – коэффициент шероховатости по Павловскому.

Формулу (1.8) можно интерпретировать двояко. Во-первых, конечно же она показывает, что незаиляющая скорость увеличивается с увеличением гидравлической крупности части, мутности потока, гидравлического радиуса и при уменьшении шероховатости русла. Но более ценным является ее анализ с точки зрения того, какую предельную мутность может иметь поток при известных его параметрах R и n_{II} , диаметре преобладающей массы взвешенных наносов, зависящей и от фракционного состава почвогрунта. Иначе говоря, формулы незаиляющей скорости в комплексе с формулами транспортирующей способности позволяют лучше оценить эродирующую способность потоков.

Поскольку увеличение скорости потока сопровождается увеличением его транспортирующей способности, это приводит к увеличению размера и веса переносимых им частиц. Данная зависимость выражается формулой Эри [95]:

$$P = AV^6$$

где P — вес переносимой частицы; A — коэффициент, зависящий от уклона дна, формы и плотности частицы, глубины потока; V — средняя скорость потока.

При уменьшении скорости потока его транспортирующая способность снижается, поэтому он начинает освобождаться от наносов, причем частицы разных размеров будут выпадать последовательно от крупных к мелким.

Следует отметить, что разделение наносов на донные и взвешенные оправдано только для рек — постоянных водотоков с относительно большими глубинами. Для временных русловых потоков оно достаточно условно, а для склоновых потоков, глубина которых сравнима с размерами перемещаемых частиц, разделить наносы на донные и взвешенные практически невозможно.

Разработано много формул транспортирующей способности, приведенных, в частности, в [172, с. 97-98].

Одна из них — формула В.Н.Гончарова, используемая для донных наносов:

$$T_{\mu} = \frac{\rho_{\mu} g (1 + \varphi)}{A} V_n d \left(\frac{V^3}{V_n^3} - 1 \right) \left(\frac{V}{V_n} - 1 \right), \quad (1.9)$$

где T_{μ} — расход наносов на единицу ширины потока, кг/(с*м);

ρ_{μ} — плотность частиц наносов, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²;

φ — параметр турбулентного поведения наносов, равный отношению гидравлической крупности частиц наносов при турбулентном и ином режиме их падения; A — постоянная, равная 880 для потоков плоского режима, 500 — для пространственного; V и V_n — скорость и неразмывающая скорость потока соответственно, м/с; d — диаметр наносов, мм.

В упрощенном виде формула представлена Барышниковым и Поповым:

$$T_{\mu} = 1,2(1 + \varphi) V_n d \left(\frac{V}{V_n} \right)^{4,33}, \quad (1.10)$$

Е.А.Замарин разработал следующую формулу ее расчета:

$$\rho_{\text{пр}} = 0,022(V/W_0) \sqrt[3]{(RIV/W)} \quad (1.11)$$

где R — гидравлический радиус, м; I — уклон свободной поверхности потока;

V — скорость, м/с; W — средневзвешенная гидравлическая крупность наносов, м/с; W_0 — приведенная гидравлическая крупность.

Как видим, $\rho_{\text{пр}}$ пропорциональна скорости течения воды V в степени 1,5 и обратно пропорциональна гидравлической крупности наносов в этой же степени.

Известна и такая формула транспортирующей способности рек [112]:

$$S_{\text{пр}} = \frac{24}{u} \times \frac{V_{cp}^3}{h_{cp}}, \quad (1.12)$$

где u — гидравлическая крупность, м/с; V_{cp} и h_{cp} — соответственно средние скорость и глубина потока.

В формуле (1.12) зависимость от скорости потока имеет еще более выраженный — кубический вид, а роль гидравлической крупности имеет обратно пропорциональный характер.

Как видим, кроме скорости потока большую роль играет такая

характеристика наносов, как их гидравлическая крупность.

Гидравлическая крупность – это скорость равномерного падения частиц наносов в стоячей воде. Зависит она от диаметра частиц, их плотности и формы, от температуры воды и определяется в лабораторных условиях, но может быть вычислена по формулам.

Критические скорости потока для почвы.

Все вышеназванные скорости потока - размывающая, скорость начала прыжка, скорость начала взвешивания частиц, а также незаиливающая скорость носят общее название *критических* скоростей.

Закономерности, присущие водным потокам в полной мере характерны и воздушным, производящим ветровую эрозию почв.

В каждом явлении ветровой эрозии почв, согласно М.С.Кузнецову и Г.П.Глазунову [95, 96, 41], всегда обнаруживаются четыре стадии: дефляции, трансформации, аккумуляции и стабилизации.

Согласно [96] на стадии *дефляции* под силовым воздействием на почву со стороны воздушного потока происходит ослабление и нарушение связей между отдельными частицами поверхностного слоя, сопровождающееся их отрывом и переносом. Начинается формирование двухфазного потока «воздух-почва». Твердая фаза этого потока представлена катящимися по поверхности, скачущими или взвешенными в потоке почвенными частицами. Тип движения каждой частицы определяется ее размерами и скоростью ветра. Размер почвенных частиц в процессе дефляции уменьшается в результате их соударений, приводящих к раскалыванию и истиранию частиц. Уменьшение размера сопровождается увеличением длины их скачка. Характерной особенностью стадии дефляции является то, что число отрывающихся от поверхности частиц превышает число возвращающихся на поверхность за то же время. В результате этого часть почвы теряется. Транспортирующая способность воздушного потока на этой стадии полностью не реализуется.

Стадия дефляции сменяется стадией *стабилизации*. Наступление этой стадии может быть обусловлено двумя причинами: явлением *самоотмоктки* или падением скорости ветра. Явление самоотмоктки обусловлено селективностью выдувания - ветром уносятся наиболее мелкие частицы, а наиболее крупные и устойчивые к дефляции накапливаются на поверхности. На стадии стабилизации сдувание почвенных частиц ветром прекращается, транспортирующая способность потока не реализуется.

Стадия *трансформации* сопутствует стадии дефляции. Существенной ее особенностью является насыщенность двухфазного потока твердой фазой. Двухфазный поток и почва находятся в состоянии, близком к динамическому равновесию: число скачущих частиц в потоке остается примерно постоянным, соответствующим транспортирующей способности потока. Для этой стадии характерно образование *рифелей* (микродюн) на поверхности почвы, которые перемещаются со скоростью на несколько порядков меньшей скорости самого двухфазного потока. На этой стадии потеря почвы происходит за счет мелких частиц, переходящих во взвешенное состояние. Потеря почвы за счет крупных,

катящихся по поверхности, частиц невелика вследствие малой скорости движения рифелей, сложенных, в основном, частицами с такими размерами, которые позволяют им лишь перекатываться. Пополнение числа мелких, способных витать в воздухе, частиц происходит за счет абразии (разрушения) скачущих частиц, а пополнение числа скачущих частиц происходит за счет разрушения крупных покоящихся или перекатывающихся частиц [96].

Если снижается транспортирующая способность двухфазного потока, стадия трансформации сменяется стадией *аккумуляции*. Основной причиной снижения транспортирующей способности потока является снижение его скорости. Оно происходит либо в результате встречи потока с каким-либо препятствием (лесополосой, сооружением и т.п.), либо в результате резкого увеличения живого сечения потока (при пересечении долины реки, балки, и т.п.). Для стадии аккумуляции характерно образование *эоловых отложений*.

Для единичного явления ветровой эрозии почвы характерно одновременное существование всех указанных стадий.

Начало первой стадии ветроэрозионного процесса - дефляции почв обусловлено превышением скорости ветра ее критического для данной почвы значения. Вопрос о критических скоростях ветра является одним из основных при изучении ветровой эрозии почв. Многочисленные наблюдения свидетельствуют о том, что ветровая эрозия почв начинается при разных скоростях ветра, а противодефляционную стойкость почв следует определять величиной скорости начала массового движения частиц, которая по физическому смыслу аналогична размывающей скорости водного потока [96].

Для расчета критических скоростей ветра для почв, характеризующихся широким диапазоном размеров частиц, также предложено много зависимостей, представленных в работах В.В. Звонкова, А.В. Гвоздиков, М.И. Долгилевича, М.И. Долгилевича и Ю.И. Васильева, А.П. Иванова, А.Л. Андрейчука и др. Большинство авторов моделей насыщенного переноса песка ветром считают, что расход твердой фазы пропорционален кубу скорости потока [96].

Проблема математического моделирования ветроэрозионного процесса на стадии дефляции, по мнению авторов пособия [96], разработана значительно слабее. Объясняется это в первую очередь трудностью получения экспериментального материала. В наименьшей степени разработана проблема математического моделирования ветроэрозионного процесса на стадии аккумуляции, хотя работы в этом направлении также ведутся.

Мы выяснили различные моменты, связанные со скоростью водного потока, но как же определить саму скорость?

Как это сделать в поле, будет показано во втором разделе, а пока познакомимся с расчетными формулами скорости водного потока.

Основное уравнение теории вязкого потока жидкости, установленное Ньютоном, показывает, что при стационарном движении сила F , действующая на некоторое водное тело, имеющее высоту, равную глубине потока h и площадь основания S , равную, например, 1 м^2 , уравнивается силами внутреннего

трения жидкости. В их основе лежит сила трения воды о дно потока, обусловленная его шероховатостью.

Слой воды высотой, равной высоте выступов шероховатости, имеет условно нулевую скорость течения и оказывает тормозящее воздействие на весь поток. Следствием этого воздействия, ослабевающего по высоте потока, будет увеличение скорости воды по мере удаления от дна с максимумом скорости на поверхности потока. Рост скорости по высоте потока можно в дифференциальной форме представить выражением du/dh , где du – приращение скорости u , происходящее на отрезке dh , равном приращению высоты.

Если представить себе весь поток состоящим из отдельных горизонтальных слоев высотой dh , в пределах которых скорость потока u_i будем считать постоянной, но изменяющейся скачкообразно от слоя к слою, то силу трения между ними можно выразить уравнением:

$$F = \mu S(du/dh),$$

где S — площадь поверхности сдвига (площадь поверхности слоев, сдвигающихся один относительно другого вследствие различия их скоростей, равная 1 м^2), μ — коэффициент внутреннего трения, u — скорость потока, h — расстояние каждого слоя от дна.

Разделив обе части уравнения на S и обозначив отношение F/S , называемое *касательным напряжением трения*, как « τ », получаем:

$$\tau = \mu(du/dh) \quad (1.13)$$

Превышение напряжения трения τ (Н/м^2) над его критическим значением τ_c , наряду с параметром эродируемости K_r (с/м), в модели эрозии WEPP считают величиной, определяющей интенсивность эрозии D ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$): $D = K_r(\tau - \tau_c)$ [95]. Этот же показатель лежит в основе формул размывающей скорости потока.

При ламинарном движении жидкости сила внутреннего трения пропорциональна динамической вязкости и отношению средней скорости потока V к его глубине: $\tau = 3\mu V/H = 3\nu_0 V/H$.

Скорость потока в этом случае рассчитывают по формуле Пуазейля :

$$V = \frac{gIH^2}{3\nu}, \quad (1.14)$$

При турбулентном режиме течения жидкости сопротивление прямо пропорционально ее плотности и средней скорости в квадрате, а для расчета скорости потока выведена формула Шези:

$$V = C\sqrt{HI}, \quad (1.15)$$

где V — средняя скорость потока, м/с ; C — коэффициент Шези; H — глубина потока, м ; $I = \sin\alpha$, где α — угол наклона водной поверхности, равный при равномерном движении углу наклона склона.

Как можно видеть, роль глубины потока в формулах очень различается: при ламинарном характере течения воды скорость потока пропорциональна ее квадрату, а при турбулентном - квадратному корню из нее, то есть роль глубины существенно снижается. Различается и роль уклона - в первом случае она

существенно выше.

Для расчета коэффициента Шези при расчете скорости воды в каналах, временных оросителях, выводных и поливных бороздах (т.е. в условиях, условно сходных с потоками в крупных потоках, например, в эфемерной овражной эрозии) применяют чаще всего формулу Павловского [95]:

$$C = \frac{R^{1,5} \sqrt{n_{\Pi}}}{n_{\Pi}}, \quad \text{при } R < 0,1 \text{ м;} \quad (1.16)$$

где R – гидравлический радиус (отношение площади живого сечения ω потока к смоченному периметру χ); n_{Π} — коэффициент шероховатости по Павловскому.

Для расчета коэффициента Шези при расчете скорости склоновых потоков преимущественно применяется формула Базена [95]:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{n_B}{\sqrt{R}}} = \frac{87}{1 + \frac{n_B}{\sqrt{H}}}, \quad (1.17)$$

где n_B — коэффициент шероховатости по Базену.

Замена гидравлического радиуса потока R на его глубину H в формуле сделана для упрощения пользования формулой и не ведет к существенной ошибке, если ширина потока намного больше его глубины. А при $R \ll n_B$ формулу (1.17) можно представить следующим образом:

$$C = \frac{87\sqrt{R}}{n_B} = \frac{87\sqrt{H}}{n_B}, \quad (1.18)$$

Методические подходы к определению коэффициентов шероховатости изложены в учебниках [95, с. 42-44] и [172, с.91-93]. В наиболее простом виде коэффициент шероховатости однозначно связан с высотой выступов шероховатости в ложе потока следующим выражением [172]:

$n = \alpha_1 \Delta^{m_1}$, где Δ – высота выступов шероховатости, м; α_1 и m_1 – параметры.

Значения коэффициентов n_{Π} и n_B приведены в табл. 2.2 учебника [95].

Подставляя в формулу (1.15) выражение (1.18) для C , получаем уравнение скорости потока:

$$V = \frac{87H\sqrt{I}}{n_B}, \quad (1.19)$$

Как отмечают авторы [95], формулы (1.15) и (1.19) отражают чисто гидравлическую сущность процесса, требуют знания только глубины потока и его уклона, но никак не связаны с реальными или прогнозными условиями склонового водообразования.

В результате преобразований, приведенных в [95], была выведена формула скорости воды на склоне при стекании ее тонким слоем, но с учетом расчленения потока на отдельные ручьи. Для этого использован коэффициент микрорасчлененности склона, равный $m' = F/F_b$, где F , F_b – соответственно

общая площадь и площадь склона, занятая водой.

Средняя скорость потока на расстоянии x от водораздела равна:

$$V_x = \frac{9,3(r\sigma x m')^{0,5} I^{0,25}}{n_B^{0,25}}, \quad (1.20)$$

Учитывая, что средняя скорость связана с донной выражением:

$$V_x = V_{\Delta x} \left(\frac{H}{\Delta} \right)^{0,17}, \quad \text{можно найти донную скорость по формуле:}$$

$$V_{\Delta x} = \frac{13,3(r\sigma x m')^{0,42} I^{0,29} \Delta^{0,17}}{n_B^{0,58}}, \quad (1.21)$$

где r – интенсивность поступления осадков, мм/мин; σ – коэффициент стока; x – расстояние от водораздела, м; m' – коэффициент микрорасчлененности склона; I – уклон потока; n_B – коэффициент шероховатости Базена; Δ – высота выступов шероховатости поверхности склона.

Значения m' выбирают в интервале 2,5 – 13,5 в зависимости от выровненности склона и направления обработки согласно [95, с. 63].

Примером одной из формул, используемых для целей противоэрозионного проектирования, является формула И.К. Срибного, вошедшая в широко известный нормативный документ ВСН 10.15 УССР 1-87 [38].

$$V = 0,0254 m_c \sqrt[3]{(r_{\tau, P\%} \phi b_c L)}, \quad (1.22)$$

где m_c – коэффициент, учитывающий шероховатость и форму водотоков ручейковой сети; $r_{\tau, P\%}$ – наибольшая средняя за время наносообразования τ (мин) интенсивность дождя (мм/мин) расчетной обеспеченности $P\%$, ϕ – коэффициент стока; b_c – средняя ширина водосборов временной ручейковой сети, м; L – средний уклон склона; L – длина склона, м.

Методику определения параметров формулы можно найти в оригинале [38], но проще в учебнике [95].

1.3 Развитие представлений об эрозии и мероприятиях по борьбе с ней

Первые практические шаги по предотвращению эрозионных процессов в России связаны с именами ученых XVIII в. М.И. Афонина, С. Друковцева, А.Т. Болотова, которые использовали для этого гидротехнические и лесомелиоративные мероприятия. В XIX в. работы в области степного лесоразведения с целью борьбы с ветровой эрозией и засухами выполнялись И.М. Данилевским, В.Я. Ломиковским, И.М. и Н. И. Шатиловыми, В. Е. фон Граффом, К. Е. Генко [21]. В конце XIX столетия П. Тихобразов впервые в России предложил и применил для задержания на полях талых вод земляные валы с широким основанием [174]. Одновременно с ним П. Х. Мангумом в США были использованы гребневидные террасы [19]. В. М. Борткевич разработал способ борьбы с овражной эрозией путем создания системы водозадерживающих валов-

каналов [177], свой вклад в их совершенствование внес М. Д. Голов [183].

До революции 1917 г. противоэрозионные мероприятия были направлены исключительно на борьбу с линейной эрозией почв, но подходы изменились после создания Новосильской опытной овражной станции. Ее директором А.С. Козменко был сделан важный вывод о необходимости проведения водорегулирующих и противоэрозионных мероприятий на всей водосборной площади. А в 30-40-е годы им были сформулированы положения *комплекса противоэрозионных мероприятий*, который включал организационно-хозяйственные, агротехнические, лесомелиоративные и гидротехнические приемы [90].

В дальнейшем идея противоэрозионного комплекса для полной защиты почв была детально разработана в работах Всероссийского НИИ земледелия и защиты почв от эрозии (ВНИИЗиЗПЭ) [123], Всероссийского НИИ виноградарства и виноделия (ВНИИВиВ) [133], Всероссийского НИИ агролесомелиорации (ВНИАЛМИ) [16, 79, 80, 117] РАСХН, Института лесного хозяйства и агролесомелиорации (УкрНИИЛХА) [28, 191], Харьковского государственного агроуниверситета (ХГАУ) [139] и многих других. В отделе противоэрозионных комплексов бывшего Украинского НИИ защиты почв от эрозии (УНИИЗПЭ, г. Луганск, прежде Ворошиловград) был разработан комплекс противоэрозионных мероприятий с контурно-параллельной организацией территории [204] и методика построения его для территории УССР [122], которая включает контурно-параллельную организацию территории, почвозащитные технологии выращивания сельскохозяйственных культур на склонах, двухрядные лесные полосы с валом-канавой в междурядье, противоэрозионные валы-каналы с земляными перемычками и органическим наполнителем.

В 70-е годы закономерным этапом развития идеи противоэрозионного комплекса стала разработка научных основ создания почвозащитных систем земледелия. Под этим понятием понимают такую систему земледелия, которая обеспечивает получение высоких и устойчивых урожаев с минимальными затратами труда и средств при обязательном условии обеспечения защиты почв от эрозионной и иной деградации и неуклонного наращивания плодородия почв для получения возрастающих урожаев сельскохозяйственных культур [52].

В конце 80-х годов Институтом земледелия УААН была внедрена и испытана на практике почвозащитная контурно-мелиоративная система земледелия (КМЗ), разработана методически-нормативная база ее проектирования и внедрения [119, 124, 125, 185, 186, 187]. Термин "контурная" означает, во-первых, контурную (от слова «contour» - горизонталь) ориентацию границ полей и рабочих участков, т.е. с максимальным приближением к горизонталям местности; а во-вторых, дифференцированное использование земельных ресурсов путем выделения контуров (участков) с различными особенностями. Термин "мелиоративная" означает, что контурная организация территории фиксируется на местности мероприятиями постоянного действия (МПД) - лесными полосами, земляными валами различных типов, способными оказывать значительное мелиоративное влияния на сельхозугодья.

Ландшафтно-экологическая направленность контурно-мелиоративного

земледелия, позволяющего не только снижать проявление эрозионных процессов, но и решать ряд экологических проблем, нашла отображение в названии "ландшафтное земледелие" [103]. Во ВНИИЗиЗПЭ создана методика разработки этой системы земледелия [123] и оценки эффективности почвозащитных мероприятий [120].

Значительный вклад в развитие теоретической и нормативной базы КМЗ внесли ученые бывшего Института охраны почв (до 1992 г. УНИИЗПЭ) [179, 206], ГИЗР [128], Укрземпроекта [3, 37, 196], Института почвоведения и агрохимии им. А.Н.Соколовского УААН [26, 28, 78, 103, 131, 137, 159], Воронежского СХИ [109], ВНИАЛМИ [162], МГУ [89] и др.

1.3.1 Научные основы почвозащитных систем земледелия

Поскольку эрозия почвы вызвана поверхностным стоком талых и ливневых вод, основой защиты почв от эрозии в системе земледелия являются мероприятия, направленные на предотвращение или уменьшение стока.

Все противоэрозионные мероприятия А. Т. Барабанов делит на три основные группы: приемы, влияющие на водопоглощение и сток рассредоточенно по территории, - это преимущественно агротехнические мероприятия; приемы сосредоточенного - локального действия – линейные рубежи (валы разных типов, канавы с валами, валы-террасы); приемы, обладающие как локальным (задержание и регулирование стока на рубежах), так и пространственным действием, - это лесомелиоративные приемы. Ученым сделан вывод, что наиболее высокий эффект может быть получен лишь от совместного использования противоэрозионных мероприятий всех групп на основе правильной организации территории [15].

1.3.2 Принципы противоэрозионной организации территории

Она предусматривает выделение севооборотных массивов с учетом крутизны склона, эродированности почв, интенсивности процессов эрозии; разработку схем севооборотов; определение размеров полей и размещения их на территории; правильное размещение лесных полос, гидротехнических сооружений и других линейных рубежей, участков залужения.

Задаче усовершенствования структуры угодий в наибольшей мере отвечает дифференциация земель, разработанная А. Г. Тарарико [185], согласно которой все обрабатываемые земли разделяются на три эколого-технологические группы (ЭТГ). В первую ЭТГ включают земли, расположенные на склонах до 3° с полнопрофильными и слабоэродированными почвами, качественное состояние которых позволяет выращивать все культуры по интенсивным технологиям, включая пропашные. Вторая ЭТГ включает земли, расположенные на склонах от 3 до 7° с преобладанием среднесмытых почв. Здесь проектируют почвозащитные зернотравяные или травяно-зерновые севообороты. Размещение пропашных исключается. Земли третьей ЭТГ включают склоны крутизной свыше 7° (иногда 5-7°) со средне- и сильноэродированными почвами. Их выводят из пашни, залужают или залесяют.

Известно, что на слабо-, средне- и сильноэродированных склоновых землях степи урожайность озимой пшеницы снижается соответственно на 10, 25 и 40%,

ячменя на 12-15, 30-36 и 50%, подсолнечника на 22, 42 и 65%, кукурузы (зерно) на 25, 48 и 68%, а многолетних трав (эспарцет) только на 3, 10 и 12% [135]. Поэтому правильное размещение культур – наиболее дешевый способ повышения их урожайности.

Принцип контурности при противоэрозионной организации территории состоит в том, что границы между севооборотами, полями и рабочими участками максимально приближают к горизонталям местности. Существует несколько вариантов реализации этого принципа. Наилучшие условия для задержания стока и уменьшения смыва почв создает размещение границ строго по горизонталям, получившее большое распространение в США; но в условиях сложного рельефа оно вызывает затруднения для механизированного возделывания почв, связанные с появлением серповидных клиньев, которые приходится обрабатывать дополнительно. Это затруднение преодолевается при контурном размещении линейных рубежей с использованием корректирующих полос [109]. Ученые ВНИИВиВ предложили комплекс противоэрозионных мероприятий на контурно-полосной основе [133, 156]. По результатам исследований в Курской обл. Е. А. Гаршинев пришел к выводу о целесообразности контурно-прямолинейного размещения границ [39]. Многолетние исследования и обобщение отечественной и зарубежной практики позволили М. И. Лопыреву сделать вывод, что наиболее надежную основу для повышения эффективности почвозащитного земледелия на сложных склонах создает контурно-параллельный способ организации территории [109]. При этом способе все рубежи размещают с максимальным приближением к горизонталям, но параллельно друг другу.

Структура посевных площадей и севооборота. Оптимизация структуры посевных площадей считается основным, наиболее дешевым и экологичным средством повышения производительности агроэкосистем и противоэрозионной защищенности почв [135]. В системе контурно-мелиоративного земледелия задача оптимизации прежде всего решается определением соотношения площади севооборотов разных типов и площадей ЭТГ. Общим принципом формирования структуры севооборотов любой ЭТГ является оценка возможности сельскохозяйственных культур сдерживать эрозионные процессы, восстанавливать плодородие почвы, в частности поддерживать бездефицитный баланс гумуса, и обеспечивать наиболее высокую биопродуктивность.

При недостаточной почвозащитной способности севооборотов предусматривают полосное размещение посевов, залужение ложбин, промежуточные посевы и прочие мероприятия [121, 179].

Полосное размещение культур осуществляется в двух модификациях: полосы однолетних трав чередуются с полосами из многолетних трав; полосы из густопокровных культур чередуются с эрозионно-неустойчивыми агрофонами или с посевами пропашных культур [121, 135]. Почвозащитные особенности этого приема состоят в создании условий для ослабления лавинного эффекта действия эрозии. Он уменьшает скорость воздушных потоков на 20-25%, увеличивает высоту снежного покрова на 25-35%, а запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы на 10-18 мм. На полосах с разными шероховатостью, проективным

покрытием, агротехническим нанорельефом и водопроницаемостью тормозится сток, активизируется водопоглощение, задерживается смытая почва. Полосы подразделяются на противоэрозионные и противодефляционные.

Лугомелиоративные мероприятия – это вывод из возделывания малопродуктивных эрозионно-опасных почв под естественные кормовые угодья и временную их консервацию [134]. Ученые считают необходимым вывести из пашни под постоянную консервацию сильно- и среднеэродированные земли, а также земли, расположенные на склонах больше 5°, с последующим их залужением или залесением. Дальнейшее уменьшение интенсивности возделывания земель возможно осуществлять без вывода их из пашни за счет увеличения в структуре посевных площадей многолетних трав [135].

Агротехнические противоэрозионные мероприятия характеризуются большим разнообразием. По характеру влияния и назначению их разделяют в четыре группы [15]: приемы, направленные на радикальное улучшение водопоглощения – углубление пахотного пласта (глубокая пахота и безотвальное рыхление), щелевание, кротование и др.; приемы, направленные на поверхностное водозадержание, – поперечная и контурная пахота зяби, создание искусственного нанорельефа (лункование, прерывистое бороздование, обвалование, микролиманы и др.); приемы, обеспечивающие высокую противоэрозионную устойчивость почвы, – поверхностные и безотвальные обработки, мульчирование поверхности почвы и пр.; приемы, направленные на регулирование отложения и таяния снега, – снегозадержание, полосное зачернение, уплотнение.

Анализ и обобщение литературных данных и исследований, проведенных А.Т. Барабановым позволили ему сделать вывод, что агротехнические мероприятия не позволяют существенным образом влиять на поглощение почвой влаги зимних осадков. Они малоэффективны и в противоэрозионном отношении [15].

Наиболее надежное влияние на остаточный поверхностный сток оказывают так называемые мероприятия постоянного действия (МПД) – стокорегулирующие лесные полосы, противоэрозионные гидротехнические сооружения (ПЭГТС), называемые также за их вытянутость и ограждающую, разделяющую роль линейными рубежами [28, 198].

1.3.3 Управление эрозионно-гидрологическими процессами с помощью мероприятий постоянного действия

МПД - неотъемлемая часть контурно-мелиоративного земледелия. Они не только способствуют регулированию и рациональному использованию стока талых и ливневых вод, но и служат для жесткой фиксации на местности контурных границ полей, севооборотов и рабочих участков. С ними связана и мелиоративная направленность этой системы земледелия.

Защитные лесные насаждения (ЗЛН) оказывают широкое мелиоративное влияние на прилегающие поля и повышают урожайность сельхозкультур. Сток на полях с лесными полосами на 20-40% ниже, а смыв в 4-6 раз меньше, чем на открытых [54]. Водопроницаемость лесных почв выше степных в 5-10 раз [26].

Стокорегулирующая, почвозащитная роль лесных полос и их влияние на

водный режим полевых почв исследовались А.Т. Барабановым и А.В. Кулик [15, 17], Е.А. Гаршиневым [39], В.Д. Горей [46], А.Н. Джосом [47], В.В. Демидовым [46], К.И. Зайченко [51], А.Р. Зубовым [57], И.Г. Зыковым [79, 80], В.М. Ивоными [84], А.Р. Константиновым [91], К.Н.Куликом и соавт. [100], В.В. Лукишей [110], В.И. Пановым [141], Е.В.Полуэктовым [155], В.И. Тарасовым [189,190] и др. учеными. Методическая база создания систем лесонасаждений изложена в трудах ученых ВНИАЛМИ: [117, 136, 140].

В результате наших исследований в Донбассе [57, 72] установлено, что лесные полосы обеспечивают в зоне мелиоративного влияния большую устойчивость снежного покрова при оттепелях, снижают вероятность появления ледяной корки на почве и ее толщину, уменьшают глубину промерзания почвы на поле на 15-40%, а в прудках ПЭГТС на 21-87%. Благодаря этому водопоглощающая способность почв на поле повышается в 2-2,1 раза, а коэффициент стока 10-15%-ной вероятности превышения снижается на 30-35%. Лесные полосы улучшают условия функционирования ГС, совмещенных с ними, уменьшая глубину промерзания в них на 70-100%. Снижение потерь снеговой влаги на испарение под влиянием лесных полос зимой 1986/87 г. достигло 6,2 мм.

Но одних лесных полос для полного задержания остаточного стока, по данным многих ученых, недостаточно. На склонах с ложбинами ситуация усложняется еще более. По подсчетам А.И. Шабаева [201], объем воды, которая течет по ложбинам, в 30-40 раз превышает водопоглощающие возможности почвы в этих местах. По данным Б.И. Логгинова [107], даже очень широкие лесные полосы здесь малоэффективны.

Поэтому для повышения водопоглощения в лесных полосах предложено совмещать их с простейшими гидротехническими сооружениями путем обвалования по нижней опушке, создания прерывистой канавы в нижнем междурядье (рис. 1.7), водозадерживающих валов в ложбинах по нижней, а в некоторых случаях – и по верхней опушке [182]. Для усиления лесных полос используют также щели в междурядьях, плетневые запруды в ложбинах, поперечные шпоры с водообходами [82, 145], создают микролиманы [94].



Рис. 1.7. Контурная двухрядная лесная полоса с траншеей в междурядье и валом на нижней опушке (фото с сайта ФГБНУ «ВНИИЗиЗПЭ» [224])

Противоэрозионные гидротехнические сооружения являются не только средством усиления стокорегулирующей роли лесных полос, но и самостоятельным структуроформирующим и стокорегулирующим элементом противоэрозионных систем, выполняющим роль рубежей как второго, так и первого порядка [125, 161]. ПЭГТС разделяют на несколько видов [180]: *сооружения на водосборной площади; головные овражные, русловые и донные.*

К сооружениям на водосборной площади относятся: а) земляные водозадерживающие сооружения: *валы-террасы с широким основанием, валы, совмещенные с траншеями* (с органическим или минеральным наполнителем и без него), *валы-каналы*; б) водонаправляющие сооружения, обеспечивающие безопасное отведение с полей избыточного стока, непоглощенного водозадерживающими сооружениями (*водоотводные валы и нагорные каналы*); в) распылители стока, применяемые для рассредоточения концентрированных потоков воды и снижения их эродирующей силы [180, 161].

Головные овражные, русловые и донные сооружения используют для предотвращения развития оврагов и безопасного сброса избыточного стока по овражно-балочной сети в водоемы и реки.

Многочисленные данные [33, 51, 57, 153, 208 и др.] свидетельствуют о высокой противоэрозионной эффективности валов-террас с широким основанием. Другим распространенным видом ПЭГТС являются противоэрозионные валы-каналы, разработанные во ВНИИВиВ и широко применявшиеся УНИИЗПЭ. Валы, создаваемые плантажным плугом объединены с водопоглощающей канавой треугольного сечения и заполнены каким-либо органическим наполнителем, оказывающим утепляющее действие на дно канавы [156, 192].

По способу создания валы-террасы делятся на напашные и насыпные. Первые создаются многокорпусными плугами обычного назначения, вторые – бульдозерами и грейдерами. Высота напашных валов-террас наиболее часто равняется 40-45 см, заложение их откосов 1:8-1:10. Насыпные валы-террасы имеют форму треугольника или трапеции, высота их 0,8-2,0 м, при пересечении ложбин до 3 м. Заложение откосов: «сухого» - 1:2 (вал-терраса с крутым низовым откосом, обычно залужаемым) или 1:8 - 1:7 (вал-терраса с пологим низовым откосом, обычно обрабатываемым); «мокрого» (верхового) - 1:8 - 1:7.

Некоторые типы выемочно-насыпных стокорегулирующих сооружений представлены на рис. 1.8.

Важнейшими критериями выбора типа вала являются ширина полосы склона, который отводится под вал и исключается из севооборота; объем земляных работ, приходящийся на 1 м³ задержанной воды (коэффициент, обозначенный нами как $K_{зв}$); возможность выполнения всех работ по строительству вала машинами; пригодность к применению и эффективность в использовании машинно-тракторных агрегатов для выращивания сельхозкультур на полях с валами.

Установлено, что по коэффициенту $K_{зв}$, площади, которую занимает 1 пог. км вала, и эффективности использования средств механизации наилучшие показатели на склонах крутизной больше 3° имеют валы с крутым сухим и пологим мокрым откосами. На пологом «мокром» откосе можно выращивать сельскохозяйственные

культуры. Крутизна его принимается равной 12° . Это наиболее оптимальная величина, позволяющая использовать технику. Поверхность «сухого» откоса в процессе эксплуатации валов засеивается многолетними травами, поэтому наиболее правильно строить валы с углом наклона $30-35^\circ$, т. е. с углом естественного откоса.

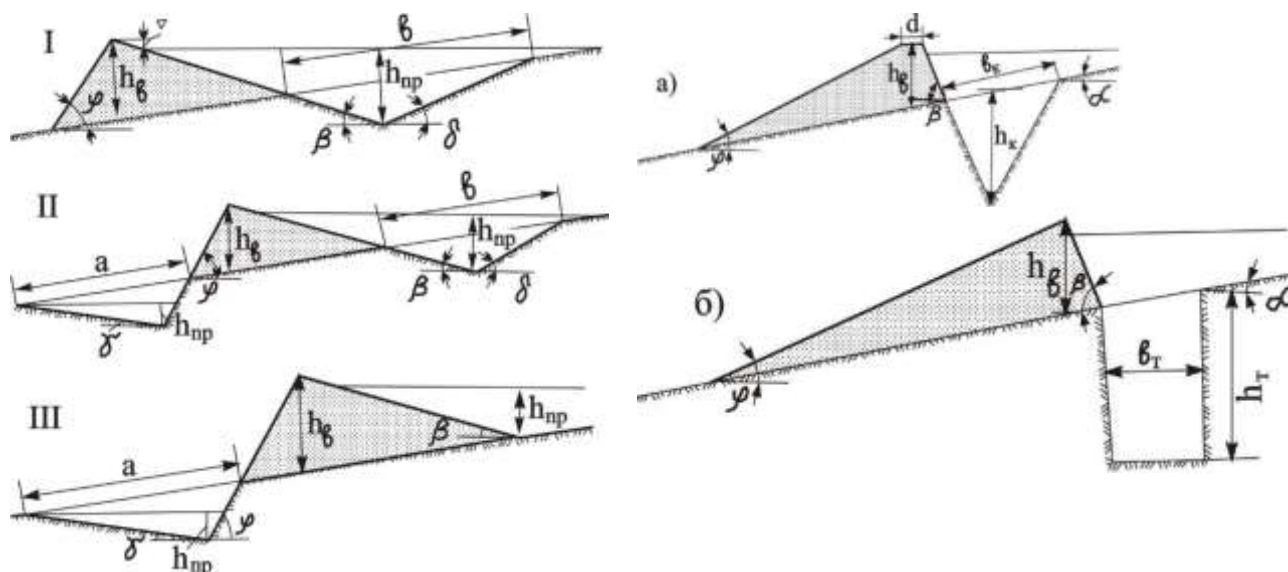


Рис. 1.8. Схемы возможного размещения выемок относительно оси вала-террасы: I – одна выемка выше оси вала, II – две выемки, III – одна выемка ниже вала.

Поперечные сечения валов, сформированных: а) плантажным плугом - (вал-канава); б) экскаватором (вал-траншея)

При создании гидросооружений обеспечивается не только формирование водозадерживающих емкостей на склоновых землях, но и максимальное увеличение площади контакта воды с почвой, напорный характер фильтрации воды.

Принципы расчета параметров системы линейных рубежей.

Основными параметрами системы линейных ПЭГТС является их конструкция и расстояние между осями сооружений. Для систем стокорегулирующих лесных полос определяется еще их ширина, зависящая от количества рядов деревьев. Ширина наиболее часто определяется из условия задержания поверхностного стока заданной вероятности превышения с вышерасположенного участка склона, объем которого зависит от слоя стока, длины склона и других показателей.

Расстояние между водозадерживающими ПЭГТС определяют из условия полного задержания поверхностного стока заданной обеспеченности (обычно 10%), а между водоотводящими ПЭГТС из условия безопасного отведения избыточного поверхностного стока в гидрографическую сеть.

Общим условием размещения всех МПД является сдерживание среднемноголетнего годового смыва почвы в допустимых пределах. Как же достигается эта задача? Для ответа на данный вопрос предлагаем схему (рис. 1.9), иллюстрирующую механизм влияния МПД на сток и смыв (Зубов, 2001 [66], Зубов, Зыков, Тарарико, 2009 [72]).

Как показано на рис. 1.9, при удалении поперечносклонового линейного

участка (створа) шириной 1 м от водораздела на расстояние L объем стока V с полосы поля шириной 1 м увеличивается по линии 1 пропорционально произведению $h \cdot L$, а смыв почвы $V_{\text{п}}$ увеличивается пропорционально выражению $A \cdot \dots \cdot L^m$, где h – слой стока (мм), A – коэффициент влияния всех остальных факторов, определяющих смыв, m – показатель степени.

На некотором расстоянии L_1 смыв достигнет предельно допустимого уровня $V_{\text{доп}}$, но продолжит свой рост, и потери почвы станут выше допустимых. Если в этой точке разместить рубеж, например, вал-канаву, то, в зависимости от его конструкции и способа размещения, сток в нем поглотится – частично или полностью, и нарастание его объема начнется с более низкого уровня (по линии 2) или вообще с нуля, соответственно снизится и смыв. Влияние рубежа на смыв почвы в некоторой точке A можно уподобить сокращению отдаленности этой точки от водораздела на расстояние ΔL , зависящее от слоя стока и водорегулирующей способности рубежа $V_{\text{рб}}$ ($\text{м}^3/\text{м}$ пог. его длины): $\Delta L = V_{\text{рб}}/h$.

Расстояние ΔL будет тем больше, чем больше процент снижения стока. По мере дальнейшего роста длины линии стока смыв вновь начнет расти, но теперь по линии 4 и достигнет допустимого значения на расстоянии $L_{\text{рб}}'$ от первого рубежа, меньшем, чем $L_{\text{рб}}$. Если в этой точке разместить новый рубеж, то его роль будет та же. В результате смыв будет меняться пилообразно от некоторого значения до допустимого. Средний же смыв в пределах полос между рубежами будет меньше допустимого.

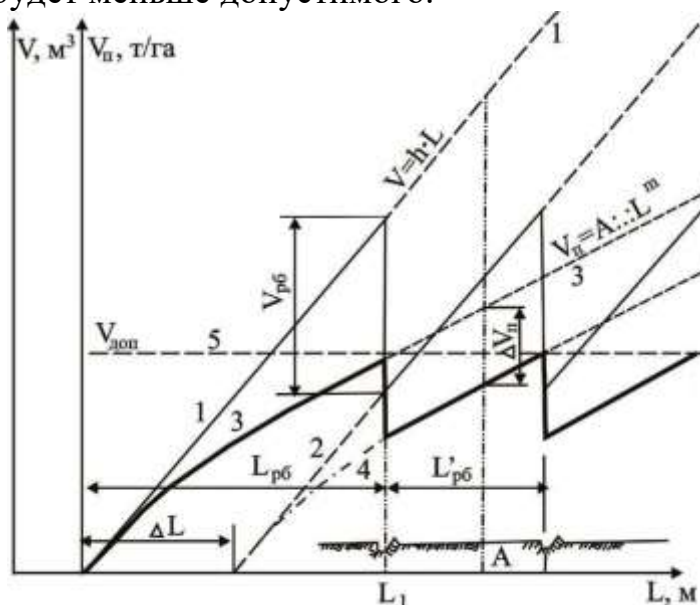


Рис. 1.9 Схема влияния стокорегулирующих рубежей на возрастание объема стока V и текущего смыва почвы $V_{\text{п}}$ по длине склона L :

- 1, 3 – объем стока и смыв при отсутствии рубежей,
- 2, 4 – объем стока и смыв при наличии рубежей;
- 5 – допустимый уровень смыва;
- $V_{\text{рб}}$ – стокорегулирующая способность рубежа (объем зарегулированного стока);
- $\Delta V_{\text{п}}$ – снижение смыва в некоторой точке A на склоне

Влияние системы рубежей подобно сокращению отдаленности точки на расстояние $\Delta L = nV_{\text{рб}}/h$, где n – количество рубежей, т.е. $V_{\text{п}} = A \cdot \dots (L_{\text{п}} - nV_{\text{рб}}/h)^m$, где $L_{\text{п}}$ – отдаленность последнего из рубежей от водораздела.

Если водозадерживающие рубежи не способны поглощать много воды, их придется размещать чаще, если они емкие – реже. Если они водоотводящие и отводят всю воду, то смыв за ними будет снижаться до нуля. Если при большом стоке сооружения не справляются с задержанием или отведением всей поступающей воды, надо позаботиться о ее безопасном переливе. Так можно

сдерживать смыв в допустимых пределах.

Данная схема порождает ряд вопросов. На сток какой обеспеченности $R\%$ и соответственно его слой h (мм) надо рассчитывать сооружения, какая реальная связь смыва почвы с длиной при данном стоке стоит за выражением $V_{\text{п}}$, какой оптимальный характер должно иметь регулирование стока – водозадержание, водоотведение или их комплекс.

Есть и другой вопрос – как будут работать рубежи в условиях сложного рельефа, для которого характерно не только наличие ложбин, но и непараллельность (в отличие от схемы на рис. 1.1) горизонталей, и если учесть влияние поперечной волнистости, обусловленной наличием ложбин. Этой проблеме посвящены наши работы [56, 61, 63, 64 и др.].

Задержание вод поверхностного стока на полях с помощью МПД является средством увеличения урожайности сельскохозяйственных культур в условиях недостаточного увлажнения, однако полноценной реализации гидромелиоративного эффекта МПД препятствует продольный уклон их трасс, связанный с непараллельностью горизонталей и неизбежным поэтому отклонением трасс МПД от них. Вследствие наличия уклона трасс начинается движение воды вдоль рубежа, а его водоудерживающая емкость резко падает. Чтобы компенсировать это снижение под пологом лесных полос рекомендуют создавать поперечные перемычки [86].

Кроме продольного наклона линейных рубежей, нормальное функционирование не только водозадерживающих, но и водонаправляющих рубежей осложняется наличием ложбин (Зубов А.Р., 1988) [57]. Места, где линейные рубежи пересекаются с ними, очень уязвимы. Стоковая нагрузка в ложбинах многократно усиливается, создавая угрозу разрушения сооружений и потери влаги (Зубов А.Р., 1991) [58].

Для повышения надежности сооружений увеличивают их высоту [156], а на участках с наклоном трасс рубежей предлагают строительство ступенчатых валов [111]. В США разработаны широкоступенчатые горизонтальные террасы [218, 219]. Во ВНИАЛМИ предложен способ создания стокорегулирующих лесных полос на склонах, допускающий отклонение их от горизонталей (И. Г. Зыков, В. М. Ивонин и Ю. В. Бондаренко [14]).

Для повышения равномерности распределения влаги между водозадерживающими гидросооружениями нами разработаны способы, основанные на использовании кротования и щелевания [6, 81, 83], разработана система внутripочвенного орошения для склоновых земель (Шелякин, Зубов, 1986 [4]) и способ борьбы с водной эрозией почв [5], сущность которого состоит в том, что валы-каналы в местах пересечения с ложбинами дополняют сериями радиальных водоотводящих кротовых дрен. Кротовины используются для отвода воды под пахотный слой и равномерного увлажнения почвы. Разработан способ повышения влагообеспеченности лесных полос [7].

Эффективным средством защиты ложбин от размыва является их залужение. Создаваемые таким образом залуженные водотоки являются необходимым элементом системы стокорегулирующих рубежей, который

органически связывает эти искусственные элементы гидрографической сети с естественными и превращает их в систему безопасного отвода поверхностного стока. Их конструкция и методика расчета описаны в работах Института земледелия [124, 125], Института охраны почв УААН [121, 193].

Следует отметить, что создание МПД является весьма затратным мероприятием, особенно при стремлении сделать их как можно более надежными. Поэтому очень важной является правильная оценка потенциального стока с водосбора заданной обеспеченности и реальной опасности эрозионных процессов, вызываемых этим стоком. Для этого используют различные методики, основанные на т. н. *моделях потерь почвы от эрозии*, которые будут рассмотрены в следующем разделе.

1.4 Моделирование как метод прогнозирования эрозионной опасности земель и оценки эффективности почвозащитных мероприятий

На основе получаемой информации о стоке и смыве почвы в совокупности со сведениями о факторах и условиях эрозии разрабатываются *математические модели*. Они являются наиболее лаконичной и в то же время емкой формой отображения накапливаемой количественной информации о изучаемом явлении.

Математические модели представляют собой многофакторные уравнения или совокупности уравнений, объединенные единым расчетным алгоритмом и позволяющие делать прогноз потерь почвы от эрозии в зависимости от факторов, ее определяющих. Любую из моделей эрозии можно представить в виде полного или усеченного ряда стандартных блоков: гидрометеорологического, рельефного, почвенного, растительного покрова, противоэрозионных мелиораций, отражающих влияние на интенсивность эрозии таких факторов, как количество жидких и твердых осадков, характер и интенсивность их выпадения или таяния; крутизна, длина и форма склона; противоэрозионная устойчивость почвы; защитное действие растительного покрова; применение организационно-хозяйственных и других противоэрозионных мероприятий.

Как отмечают авторы монографии «Современные проблемы эрозиоведения» (Лисецкий, Светличный, Черный, 2012 [105]), первые работы по количественному описанию влияния различных факторов на интенсивность эрозионных процессов и попытки разработки формул их взаимосвязи относятся в мире к 30-м годам 20-го века, а в опубликованной в 1974 сводке Г.И.Швебса [202] приводится 18 различных формул для вычисления поверхностного смыва почвы.

На 2012 год – год издания монографии [105] их количество значительно увеличилось. К моделям, названным Г.И.Швебсом, как следует из списка, приведенного в [105], добавились еще не менее 60, разработанных с 1947 по 2006 гг. И в этом, на наш взгляд, следует усматривать положительный факт сохраняющегося интереса исследователей из разных стран к проблеме эрозии почв и роста количественной информации, получаемой ими, причем выраженной языком математики, делающим эти результаты наиболее понятными и пригодными к анализу и обобщению.

Ценность той или иной модели, на наш взгляд, определяется, во-первых,

точностью и достоверностью прогноза, а во-вторых степенью технической сложности ее широкого применения, доступностью всей необходимой исходной информации. Важно и то, чем по сути является модель, – инструментом для проектировщиков или чисто научным достижением. Но в любом случае каждая модель требует для своей разработки сбор информации об изучаемом процессе, осуществляемый в полевых или лабораторных условиях, а после разработки модели должны следовать этапы ее калибровки и верификации – т.е. сопоставление расчетных показателей с натурными, получаемыми опять-таки путем проведения исследований, но теперь уже чисто полевых.

Ознакомление читателей, особенно начинающих исследователей, с методическими подходами, применяемыми в эрозиоведении, является, как уже говорилось во введении к нашей книге, главной ее целью, поэтому мы не будем анализировать модели – даже самые признанные. Это хорошо сделано в учебниках и монографиях последних лет [95, 105, 172, 173], легкодоступных теперь благодаря их присутствию в электронных библиотеках, в частности в «твирпикс» (twirpx.com) и других. Тем не менее считаем целесообразным ознакомить читателей с классификацией моделей, в том числе и для того, чтобы они могли правильно назвать свои собственные первые модели.

Одной из них является классификация, приведенная в учебнике «Эрозия и охрана почв», изданном в МГУ (Кузнецов и Глазунов, 2004 [95]), согласно которой все модели делятся на *статистические* и *логико-математические*.

Первые основаны на обобщении и анализе накопленных фактических данных о потерях почвы в связи с комплексом факторов, от которых они могут зависеть, и не отображают физический смысл процесса эрозии. Вторые основаны на уравнениях, описывающих происходящие при формировании стока и развитии эрозии физические процессы и делятся на три класса:

1. Модели с сосредоточенными параметрами, не учитывающие пространственной неоднородности территории проявления эрозии;
2. Модели с сосредоточенно-распределенными параметрами, т.е. переходные;
3. Модели с распределенными параметрами, основанные на дифференциальных уравнениях в частных производных.

Подавляющее большинство моделей эрозии почв авторы [95] относят к первой группе и 1 классу. В нем выделяются системные модели типа «*черный ящик*» («вход-выход»), не учитывающие физику процесса; концептуальные модели типа «*серый ящик*», частично ее учитывающие; *физические непрерывные* модели – модели, целиком построенные на учете физики явления.

Наиболее детальную классификацию предложили авторы монографии «Современные проблемы эрозиоведения» Ф.Н.Лисецкий, А.А.Светличный и С.Г.Черный [105]. Приводим ее в сокращенном изложении.

Как отмечают авторы, в Западной Европе и Северной Америке при анализе подходов к моделированию процессов водной эрозии используют двух-, либо трехуровневую классификации. В первом случае выделяют *эмпирические и физически обоснованные* модели, во втором случае к ним добавляют еще *концептуальные* модели.

Светличный А.А. [105] все существующие математические модели водной эрозии предлагает делить на две группы – *эмпирические и теоретические*, поскольку именно теоретический метод исследований является альтернативным эмпирическому. Каждая из групп включает большое количество различных по детальности, степени обоснованности и информационной обеспеченности математических моделей.

1. Эмпирические модели, иногда называемые моделями «черного ящика» или «серого ящика», представляют собой обобщения данных наблюдений, выполненные статистическими методами. Как правило это модели *с сосредоточенными параметрами* (0-мерные), позволяющие выполнять оценку среднегодовых величин «потерь» или «смыва» почвы в среднем для склона или большей территориальной единицы. Классическим представителем моделей данного класса авторы называют известное Универсальное уравнение потерь почвы (USLE) Уишмейера и Смита (Wishmeier, Smith, 1958, 1978 и др. [221]).

Эмпирические модели делятся на два уровня.

1. Формально-статистические.

2. Физико-статистические, отличающиеся от моделей первого уровня стремлением к возможно более полному учету априорных (теоретических) знаний о моделируемом процессе. Некоторые из моделей данной группы называют «логико-математическими». Это известные модели Г.И. Швебса и Г.П. Сурмача. К физико-статистическим авторы [105] относят и такие широко известные модели смыва почвы, как вышеупомянутое USLE (Universal Soil Loss Equation), известное также под названием «уравнение Уишмейера-Смита», его модификации MUSLE, USLE-M и современные версии модели – RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) и RUSLE-3D.

По оценке авторов [105], формально-статистические модели смыва представляют собой уравнения множественной регрессии, в которых параметры определены статистическими методами на основе эмпирических данных с минимальным использованием содержательной информации о моделируемом процессе. К этой группе моделей они относят «одну из первых формул смыва почвы, предложенную А. Цингом (Zingg, 1940), прообраз USLE – формулу Дж. Масгрейва (Musgrave, 1947), формулы зависимости смыва почвы от длины и крутизны склона В.С. Федотова и Д.Д. Германюка (1971), формулы «сноса» почвы А.С. Рачинскаса (1987), формулу В.М. Володина и Г.А. Дмитриевой (1979), а также математико-статистические модели потерь почвы, разработанные в УНИИЗПЭ (Белоліпський, Колесников, 1986; Лавровский и др., 1987; Зубов, 2001, Белоліпський, 2006)», а также ряд других.

Едва ли справедливы суждения на рост количества эмпирических моделей эрозии, иногда встречающиеся в литературе. Ведь любая модель – это ничто иное, как «прием емкого, универсального отображения накопленной информации об изученном явлении» (Долгилевич, Швебс, Зыков, 1992) [49].

И только если проведенные исследования удалось переложить на язык математики, они могут считаться завершенными на определенном этапе.

2. Теоретические модели - это математические модели, основанные на использовании для описания моделируемых процессов фундаментальных законов физики: закона сохранения вещества и энергии в виде уравнений неразрывности воды и наносов, сохранения количества движения для воды в дифференциальной форме. В англоязычной научной литературе эти модели называют “*физически обоснованными*” (physics-based) и “*динамическими*” (process-based).

Эрозионные модели данного класса, как правило, являются одно- или двухмерными, т.е. пространственно-распределенными (1D или 2D).

Важной особенностью данных моделей есть то, что они являются “event-based”, то есть моделями, описывающими эрозионные процессы в результате отдельного (реального или модельного) события – ливня либо снеготаяния [105].

К классу теоретических моделей авторы [105] относят большое количество моделей, различных по детальности, обоснованности и полноте, созданных в разные годы такими авторами, как Корнев, 1937; Хортон, 1948; Костяков, 1960; Мирцхулава, 1970; Bennett, 1974; Hjelmfelt et al., 1975; Komura, 1976; Park et al., 1982; Storm et al., 1987; Nearing et al., 1989 и др.; Сухановский, 1990, 2000; Кондратьев, 1989; Schmidt, 1991; Svetlitchnyi, 1993; Смахтин, 1993; De Roo et al., 1994; Світличний, 1995; Schmidt et al., 1996; Hofierka, Suri, 1996; Morgan et al., 1994, 1998; Mitasova, Mitas, 2001 и др.

По степени детальности описания эрозионно-аккумулятивного процесса теоретические модели также делят на *теоретические формулы смыва* и *составные динамические модели* эрозионного процесса.

Теоретические формулы смыва получены на основе решения одномерных дифференциальных уравнений неразрывности и движения, выполненного с весьма существенным упрощением моделируемого процесса. Обычно они представляют собой алгебраические выражения в виде произведения показателей, характеризующих основные компоненты эрозионной геосистемы, и эмпирических коэффициентов, основанные на решении системы дифференциальных уравнений баланса массы и энергии для склонового стока. К ним авторы [105] относят модели Я. В. Корнева, Р. Е. Хортон, А. Н. Костякова, разработанные в 30-е – 50-е годы прошлого столетия. К ним же относится и модель ливневого смыва, разработанная Ц.Е. Мирцхулавой (1970), основанная на концепции усталостной прочности почвогрунтов и пульсационном характере динамического воздействия потока на поверхность почвы, которая, по мнению С.Ю. Булыгина [26] и Ю.П. Сухановского (2000), может с успехом применяться для решения задач противоэрозионного проектирования.

Составные динамические модели (*физически обоснованные или динамические*) основаны на численном интегрировании одно- или двухмерных систем дифференциальных уравнений, имеют модульную структуру, отражающую все основные составляющие эрозионно-аккумулятивного процесса. Наиболее широкое распространение при описании склонового стекания в них получила кинематико-волновая модель стока. Математический базис моделирования в этом случае составляет система из трех уравнений,

записанных для полосы склона единичной ширины. Наиболее известными зарубежными моделями данного класса, включающими достаточно детальные модели стокообразования являются: эрозионная модель, известная как WEPP-модель, разработанная в рамках Проекта прогноза водной эрозии ДСХ США, (Water Erosion Prediction Project), Лимбургская модель водной эрозии (LISEM), разработанная в университете г. Утрехта, Нидерланды, Европейская модель водной эрозии (EUROSEM), разработанная большой группой ученых Западной Европы и США под руководством профессора Р. П. С. Моргана из Университета Крэнфилда, Великобритания [220], и другие.

Составными частями современных динамических моделей водной эрозии являются модули, описывающие все основные составляющие эрозионно-аккумулятивного процесса: перехват осадков растительностью, количество и кинетическую энергию осадков, поверхностное задержание, инфильтрацию воды в почву, поверхностный сток, отделение почвенных частиц каплями дождя и стекающей водой, отложение наносов и транспортирующую способность потока во всей их сложной пространственной дифференциации в пределах склона или небольшого водосбора.

Важной особенностью современного моделирования является переход от одномерных (1D, профильных) к двумерным (2D, пространственно-распределенным) моделям, что обеспечивает возможность учета пространственно-распределенного характера факторов эрозионно-аккумулятивного процесса. Все большее распространение для решения этой задачи приобретает применение геоинформационных (ГИС) технологий.

Однако внедрение в практику почвоводоохранного проектирования моделей этого подкласса сдерживается рядом факторов, среди которых определяющее значение имеют их повышенные требования к составу исходных данных. Как отмечают авторы [105], в настоящее время не только отсутствуют цифровые банки пространственно-распределенных данных, характеризующие основные компоненты природно-хозяйственных территориальных систем (цифровые модели рельефа, карты почв и почвообразующих пород, растительного покрова и пр.), но практически не изучены закономерности пространственного распределения в пределах склонов и балочных водосборов характеристик, определяющих формирование стока воды и смыва почвы, таких как водно-физические свойства почв (наименьшая влагоемкость, полная влагоемкость, коэффициент фильтрации), противоэрозионная стойкость почв, емкость микрорельефа поверхности, гидравлическая шероховатость и пр.).

И это, на наш взгляд, аргумент в пользу того, что все эти свойства и характеристики надо продолжать изучать в натурных условиях.

В связи с этим, несмотря на наличие более совершенных теоретических математических моделей водной эрозии, в настоящее время при проектировании противоэрозионных мероприятий, а также решении других задач, связанных с использованием земельных ресурсов эрозионно-опасных территорий **основой противоэрозионного проектирования** в разных странах мира, как отмечают авторы [105], **остаются эмпирические**, как правило, **физико-статистические**

модели потерь почвы – модификации RUSLE, а в России и Украине - логико-математическая модель Г. И. Швебса [202] и формула Г. П. Сурмача [95, 123].

Поэтому, подводя итог выполненному анализу современных моделей, авторы [105] делают вывод, что совершенствование этих (эмпирических) моделей представляет в настоящее время **«актуальную теоретическую и прикладную задачу эрозиоведения»**.

Наиболее слабым местом как физико-статистических, так и, в еще большей степени, формально-статистических эмпирических моделей водной эрозии, является фактор рельефа, отображающий изменение характера и интенсивности эрозионного процесса по длине склона. Нерешенным, по мнению авторов, является вопрос количественного учета концентрации склонового стекания, увеличивающей глубину, скорость, и, следовательно, эродирующую и транспортирующую способность потока на собирающих склонах.

По сути авторами [105] в 2012 году подтверждена правильность вывода, сделанного нами в УНИИЗПЭ еще в 80-е годы, воплотившегося в исследования, позволившие количественно оценить усиление стока с ложбинных водосборов, особенности эрозионно-аккумулятивного процесса в ложбинах, условия функционирования линейных рубежей и разработать практические решения по повышению их эффективности [6, 56 - 66].

К сказанному можем добавить, что просмотр структуры всех рассмотренных моделей не показал присутствия в них учета описанного в подразделе 1.1. большого пространственного разнообразия условий стекания ливневых и талых вод, связанного с ложбинами и непараллельностью горизонталей.

3. Концептуальные модели водной эрозии, в отличие от эмпирических и физически обоснованных, не имеют достаточно четко выраженных «родовых» признаков. Для них характерно стремление включать обобщенное описание моделируемых процессов без специфических деталей взаимодействия между ними, не требующее детальной исходной информации, как правило, с использованием эмпирических соотношений.

Из разработанных отечественных моделей водной эрозии по мнению авторов [105] к концептуальным следует отнести формулы расчета среднесноголетнего смыва почвы, предложенные И. К. Срибным (Срибный, 1977; Срібний, Вергунов, 1993), а также модели смыва почвы, разработанные во ВНИИЗиЗПЭ (Сухановский, Пискунов, 2006, 2007; Сухановский и др., 2009).

К концептуальным моделям относится и ряд моделей водной эрозии, разработанных в 80-е – 90-е годы в Западной Европе, США и Австралии: MMF (Morgan et al., 1984), LASCAM (Viney, Sivapalan, 1999), MMMF (Morgan, 2001), SWAT2000 (Arnold, Fohrer . 2005) и некоторые другие.

В рамках 3-х выделенных подклассов возможна классификационная детализация моделей по другим основаниям с отнесением их к:

- а) детерминированным или стохастическим;
- б) 0-мерным (lumped), 1-мерным (1 D) или двухмерным (2D);
- в) реализуемым для площадки (plot scale), склона (slope scale), водосбора (catchment scale) или большой территории (regional scale) [105].

1.5 Классификация методов оценки эрозионно-гидрологического и дефляционного процессов

Сложность водноэрозионного и дефляционного процессов диктует необходимость изучения разнообразных физических явлений и процессов.

Как отмечают авторы [172], исследования проявлений водной эрозии почвы можно разделить на *методы оценки величины эрозии* (эрозионных потерь почвы) и *методы изучения результата ее действия* - эродированных почв.

В первую группу входят полевые, картографические и геоинформационные методы. Вторую группу методов составляют сравнительно-географические, стационарные, балансовые, дистанционные и, как и в первой группе, картографические и геоинформационные методы.

Для решения задач теоретических исследований и прикладных разработок в противоэрозионной мелиорации широко применяются разнообразные методы экспериментальных исследований. Ведущая роль среди них принадлежит методам комплексных и элементарных стоковых площадок, моделированию в полевых и лабораторных условиях на малых площадках и монолитах, в гидравлических лотках и других специальных установках и приборах.

Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, а также область предпочтительного применения. Лотки, монолиты, микроплощадки применяются для выявления, качественной и количественной оценок главным образом закономерностей ЭАП, стоковые площадки - для сравнительной оценки эффективности отдельных приемов и их сочетаний в полупроизводственных условиях, водосборы - для производственной проверки и мониторинга эффективности комплексов почвозащитных мероприятий, их фрагментов или отдельных приемов.

Методы лабораторно-полевого эксперимента (физического моделирования) в большей мере применяются для исследования ЭГП при стоке дождевых вод и в меньшей мере - талых.

Как и в целом почвоведение, имеющее в своем распоряжении четыре основных метода: сравнительно-географический, сравнительно-аналитический, стационарный и моделирование (Роде, 1971), располагает ими и новое направление в цикле наук о почве – эрозиоведение. Объект исследования эрозиоведения согласно [95] — совокупность явлений и процессов в биосфере, связанных с механическим движением почвенной массы под действием водных и воздушных потоков. Поэтому одним из основных методов исследования собственно эрозиоведения является гидроаэромеханический, предполагающий сопряженное изучение свойств почв, определяющих их противоэрозионную и противодефляционную стойкость, потоков воды и воздуха, эродирующих почв, и процессов отрыва, переноса и отложения почвенных частиц. При изучении эрозии почв наряду с методами почвоведения применяются и методы смежных наук, таких как гидрология, гидравлика, физика атмосферы, геоморфология, ботаника, грунтоведение и др. [95].

Наиболее важными в сборе информации, необходимой для познания процессов эрозии и разработки противоэрозионных мероприятий являются стационарные методы или, согласно [116], комплексные полевые наблюдения.

По мнению автора первого в СССР учебника по эрозиоведению (Заславский, 1983 [53]) методы изучения эрозии можно разделить на натурные исследования и моделирование эрозии в поле и на лабораторных установках.

А как отмечают авторы [105], ссылаясь на работу Д.Л.Арманда (1948), исходя из степени вмешательства исследователя в ход изучаемого процесса, все многообразие применяемых в эрозиоведении экспериментальных методов можно условно разделить на три группы:

- 1) пассивный эксперимент в природе;
- 2) активный эксперимент в природе;
- 3) физическое моделирование (эксперимент в лаборатории).

Этой классификации мы и будем придерживаться в ходе нашего изложения как существующих методов, так и разработанных или использованных в наших исследованиях.

РАЗДЕЛ 2

ПАССИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ПРИРОДЕ

Согласно [95], общей задачей, решаемой с привлечением пассивных экспериментов, является определение объема потерь, переноса или накопления почвы в зависимости от факторов эрозии. В эту группу отнесены методы наблюдения и измерения, которые не сопровождаются вмешательством в естественный ход процессов и не оказывают влияния на конечный результат этих процессов. Это методы, основанные на измерении объема русел временных водных потоков (водороин и промоин), объема наносов, отложенных водными и воздушными потоками в местах их аккумуляции, и на измерении снижения почвенной поверхности в результате эрозии. К ним относятся и методы изучения самих водных потоков, определение расходов воды и наносов.

2.1 Учет эрозии по замеру объема водороин

Наиболее простой и доступный метод определения потерь почвы основан на измерении ширины и глубины струйчатых размывов на пашне и расчете их объема. Этот метод известен как «метод водороин» или «метод С.С.Соболева», впервые описавшего его [177]. Суть его состоит в том, что после стока талых или ливневых вод, вызвавшего появление водороин, на склоне намечают ряд параллельных учетных линий, располагаемых перпендикулярно к линии наибольшего уклона АВ (рис. 2.1). Длина учетных линий находится в интервале от 20 до 100 м и зависит от ширины поля, близости водороин друг от друга, общей площади исследуемых полей и ресурсов времени у производителя измерительных работ.

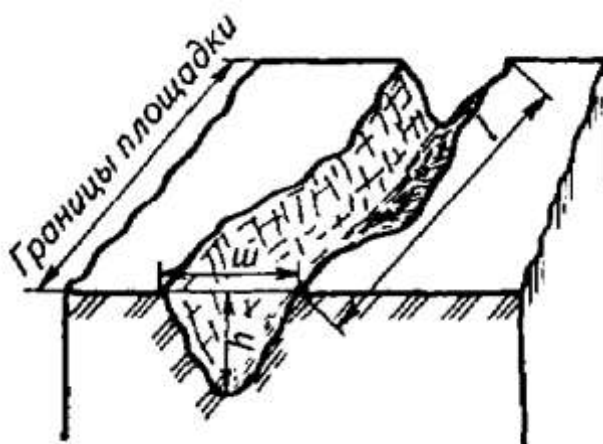
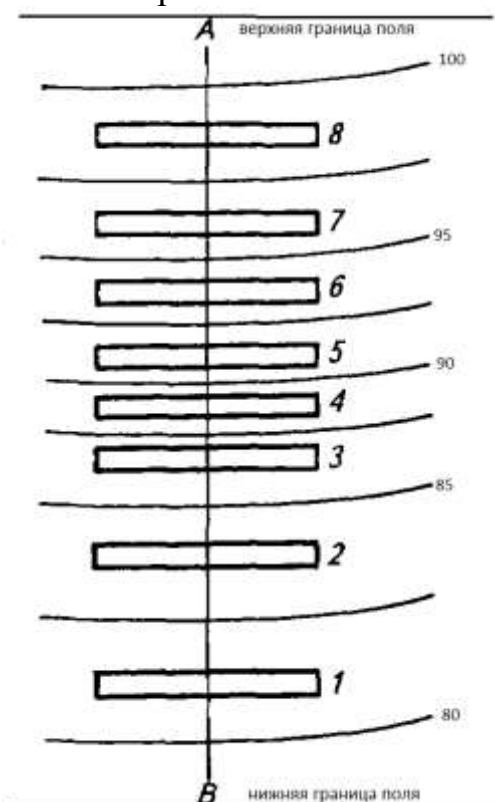


Рис. 2.1. Расположение учетных площадок на склоне (слева) и фрагмент площадки с водороиной (справа)

Расстояние между соседними линиями зависит от длины склона и принимается на крутых склонах равным до 15-20 м, на пологих — до 50-100 м. Чем меньше расстояние между учетными линиями, тем точнее результат определения.

Двигаясь вдоль каждой учетной линии, исследователь выявляет все водороины, пересекающие ее в пределах условной площадки шириной 1 м (рис. 2.1), а также места отложения (седиментации) принесенного временными потоками почвенного материала.

Затем производится измерение ширины b_i и средней глубины h_i каждой из водороин, высоты слоя h_{si} седиментов и их площади f_{si} .

Площадь сечения каждой водороины f_i вычисляют, в зависимости от его формы, по формуле прямоугольника или треугольника. Если сечение имеет трапециевидную форму, надо кроме его ширины поверху измерить ширину дна водороины и подсчет площади вести как произведение глубины на полусумму ширины поверху и понизу (ширины дна). А если водороина крупная и имеет сложную форму, надо измерить ее ширину поверху, а затем в нескольких местах измерить глубину (рис. 2.2) и вычислить среднюю глубину, но не как среднее арифметическое, а по формуле:

$$h_{cpi} = \frac{(h_1 + h_n)/2 + h_2 + h_3 + \dots + h_{n-1}}{n-1} \quad (2.1)$$

где h_1 и h_n – глубины водороины по ее краям; $h_2 \dots h_{n-1}$ – остальные глубины.

Обе или одна из глубин h_1 и h_n могут равняться нулю, формула от этого не меняется.

Площадь сечения водороины со сложным сечением рассчитывается как произведение ширины поверху на вычисленную среднюю глубину.

По каждой (j -той) учетной линии находят сумму площадей сечений всех русел $(\sum f_i)_j$. Суммарный объем русел V_{cpj} между двумя соседними линиями рассчитывают путем умножения расстояния l_j между ними на полусумму площадей сечений всех русел по этим двум линиям:

$$V_{cpj} = \frac{(\sum f_i)_j + (\sum f_i)_{j+1}}{2} \times l_j \quad (2.2)$$

где $j = 1 \div k$ – номер учетной линии снизу вверх; номер $j = 1$ имеет линия над верхней границей зоны седиментации (шлейфа отложившихся наносов, например перед лесной полосой), если эта зона есть; номер $j = k$ имеет самая верхняя учетная линия, на которой водороины еще есть и имеют размеры, достаточные для возможности их измерения.

Суммарный объем русел между двумя учетными линиями принимают за объем почвы, смытой с участка между ними.

Смыв почвы с единицы площади участка W_j в $\text{м}^3/\text{га}$ можно рассчитать путем деления объема смытой почвы V_{cpj} на площадь этого участка f_j , равную произведению длины учетных линий Δx_j на расстояние между ними l_j .

А смыв почвы в $\text{т}/\text{га}$ можно рассчитать путем умножения смыва в $\text{м}^3/\text{га}$ на

объемную массу почвы d (т/м³) по формуле:

$$W_j = \frac{V_{\text{фj}}}{l_j \times \Delta x_j} \times d = \frac{(\sum f_i)_j + (\sum f_i)_{j+1}}{2\Delta x_j} \times d \quad (2.3)$$

Средний смыв со всего поля можно рассчитать как средневзвешенное значение смыва на каждом участке между соседними учетными линиями, начиная от нижней границы поля ($j = 0$) до верхней ($j = k + 1$) по формуле:

$$W_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=0}^{k+1} (W_j \times l_j)}{L_{AB}} \text{ или, точнее, } \frac{\sum_{j=1}^{k+1} (W_j \times l_j) - \sum W_{\text{отл}}}{L_{AB}}; \quad \text{где } L_{AB} - \text{длина линии АВ (длина поля),}$$

$W_{\text{отл}}$ – сумма отложений в шлейфе на ширине Δx_j и между учетными линиями.

При изучении закономерностей изменения смыва по длине склона применяют **другой подход**, позволяющий определить локальные потери почвы на заданном расстоянии от водораздела. При нем смыв в месте расположения учетной линии (т/га) определяют по формуле:

$$W_j = \frac{(\sum f_i)_j \times 10^4}{\Delta x_j} \times d \quad (2.5)$$

Преимущества метода водороев: доступность, простота и, часто, незаменимость. Главным недостатком считают низкую точность измерений, обусловленную рядом обстоятельств:

а) искривленностью трасс водороев; б) колебаниями площади сечения каждой из водороев на фоне общего тренда ее изменения; в) неучетом междуречевой эрозии и др.

Повышения точности можно добиться путем увеличения числа учетных линий и увеличением точности измерения площади сечения русла.



Рис. 2.2. Детальное измерение глубины промоины в ложбине по ее ширине

В.А. Федоров и Н.К. Шидула (1973) предложили поправочные

коэффициенты к результатам определения смыва почвы по замеру объема русел временных водных потоков на пашне (табл. 2.1). Поправочный коэффициент представляет собой отношение фактической величины смыва почвы со склона, измеренной на стоковой площадке, к величине, найденной методом замера объема русел водотоков.

Таблица 2.1

Поправочные коэффициенты к результатам определения смыва почвы по замеру объема русел

Крутизна склона, град	При снеготаянии	При дождях
1-3	1,5	1,6
4-6	1,4	1,5
7-9	1,3	1,4
15-16	1,2	1,3
20	1,2	1,2

Пример использования метода при изучении эрозии на терриконах.



Рис. 2.3. Последствия многолетней водной эрозии на терриконе

Большую угрозу экологической безопасности техногенных ландшафтов и сельхозугодиям в угледобывающих районах представляют терриконы – породные отвалы угольных шахт [75, 76]. Коническая форма отвалов, большая крутизна их склонов (до 40°) способствуют активным эрозионным процессам на поверхности отвалов (рис. 2.3) и выносу большого количества породы на прилегающую территорию.

Смываемая потоками талых и ливневых вод порода токсична, под воздействием атмосферных осадков происходит процесс естественного выщелачивания металлов из породы отвалов с образованием загрязненных кислых стоков.

Серная кислота, образующаяся в результате окисления пирита, содержащегося в породе, растворяет различные металлы и переводит их в подвижную форму. Следовательно эрозионные процессы приводят к переносу в ландшафты тяжелых металлов в подвижной форме [76].

Исследования по определению интенсивности эрозионных процессов выполнялись совместно с С.Г.Воробьевым [76] на отвале шахты «Матросская» ПАО «Лисичанскуголь», переформированного из конического в плоский в 2006

году. В результате переформирования склоны отвала покрылись срезанной породой, а промоины, имевшиеся на них, оказались засыпанными. Поэтому появилась редкая возможность изучения эрозионного процесса как бы от его начала на свежоотсыпанном отвале.

Для определения годового модуля смыва породы был применен метод С.С. Соболева. При этом на площадке размером 1 x 10 м, расположенной поперек склона в нижней его части, производился замер ширины и глубины промоин, сформированных стоком талых и ливневых вод за 12, 24, 36, 48, 73 и 80 месяцев, прошедших после выполненного переформирования отвала - с 01.10.2006 г. по 6.10.2007 г.; затем по 5.10.2008 г., по 25.10.2009 г., по 16.10.2010 г., по 11.11.2012 г. и по 30.06.2013 г. (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Измерение параметров промоин на отвале в октябре 2010 г.
(фото проф. Зубовой Л.Г.)

Суммарная площадь сечения промоин рассчитана по формуле:

$$F = \sum(b_i \cdot h_{срi}),$$

где b_i и $h_{срi}$ – соответственно ширина промоин поперек и их средняя глубина.

Суммарные площади сечений растущих промоин на учетные даты 2007, 2008, 2009, 2010, 2012 и 2013 гг. соответственно равны: $F_1 = 0,181 \text{ м}^2$, $F_2 = 0,389 \text{ м}^2$; $F_3 = 0,543 \text{ м}^2$, $F_4 = 0,753 \text{ м}^2$, $F_{5-6} = 0,996 \text{ м}^2$, $F_7 = 1,183 \text{ м}^2$.

Смыв породы с учетной площадки в динамике определялся по формуле:

$$V = F \cdot L,$$

где F – суммарная площадь сечений промоин; L – ширина учетной площадки (1 м).

$V_1 = 0,181 \text{ м}^3$, $V_2 = 0,389 \text{ м}^3$, $V_3 = 0,543 \text{ м}^3$, $V_4 = 0,753 \text{ м}^3$, $V_{5-6} = 0,996 \text{ м}^3$, $V_7 = 1,183 \text{ м}^3$.

Объемный модуль смыва (смыв с единицы площади, $\text{м}^3/\text{м}^2$) равен:

$$W = V/S, \text{ где } S \text{ – площадь учетной площадки (10 м}^2\text{).}$$

$W_1 = 0,0181 \text{ м}^3/\text{м}^2 = 181 \text{ м}^3/\text{га}$; $W_2 = 0,0389 \text{ м}^3/\text{м}^2 = 389 \text{ м}^3/\text{га}$; $W_3 = 543 \text{ м}^3/\text{га}$; $W_4 = 753 \text{ м}^3/\text{га}$; $W_{5-6} = 996 \text{ м}^3/\text{га}$; $W_7 = 0,1183 \text{ м}^3/\text{м}^2 = 1183 \text{ м}^3/\text{га}$.

Массовый модуль смыва с площадки определялся по формуле:

$$M = W \cdot d, \text{ где } d = 1,29 \text{ т/м}^3 - \text{объемная масса породы.}$$

На 6.10.2007 г., 5.10.2008 г., 25.10.2009 г., 16.10.2010 г., 11.11.2012 г. и 30.06.2013 г. массовые модули смыва были соответственно равны: $M_1 = 234 \text{ т/га}$; $M_2 = 502 \text{ т/га}$; $M_3 = 700 \text{ т/га}$; $M_4 = 931 \text{ т/га}$; $M_{5-6} = 1285 \text{ т/га}$; $M_7 = 1526 \text{ т/га}$.

В результате измерений параметров поперечного сечения, проведенных на отвале шахты „Княгининская”, г. Красный Луч (табл. 2.2), построен график (рис. 2.5) и выведено уравнение изменения площади поперечного сечения промоин по длине склона:

$$F = 0,0483l - 0,0006l^2 - 0,0703,$$

где l – расстояние от вершины склона до исследуемого участка, м.

Таблица 2.2

Изменение площади поперечного сечения промоин по их длине

№ промоины	Расстояние от начала промоины, м				
	12	24	36	48	60
	площадь поперечного сечения, м ²				
1	0,59	0,87	1,53	1,17	0,8
2	0,57	0,62	0,49	0,57	0,44
3	0,8	1,75	0,63	0,97	0,81
4	0,27	0,28	1,09	0,91	0,81
5	0,03	0,26	1,95	1,75	0,97
6	0,04	0,44	0,74	0,54	0,64
7	0,03	0,19	0,6	0,23	0,14
8	0,04	0,17	0,57	0,24	0,15
9	0,26	0,84	1,53	0,38	0,29
10	0,3	1,51	0,89	0,72	0,44
средние значения F , м ²	0,293	0,693	1,002	0,748	0,549

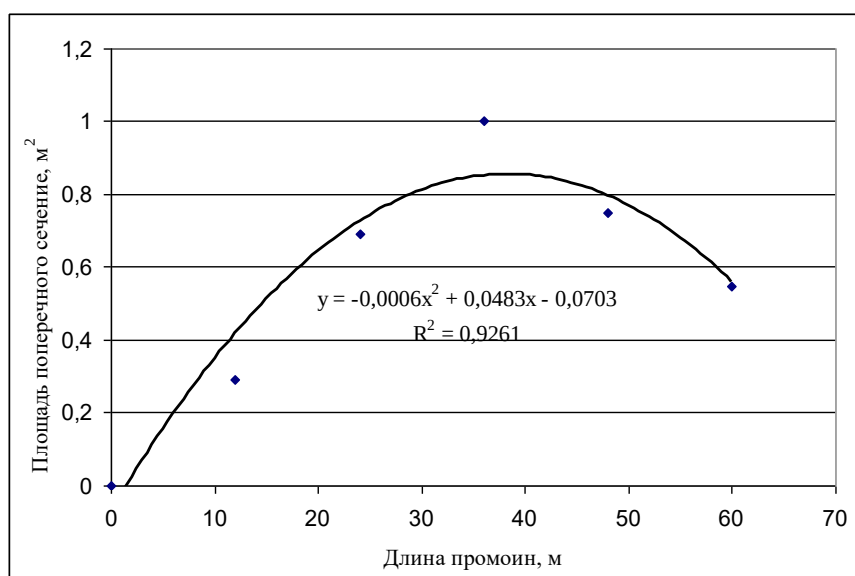


Рис. 2.5. Изменение площади поперечного сечения промоин по длине склона

С помощью этого уравнения может быть выведен коэффициент,

позволяющий по результатам измерения смыва в произвольной точке склона с известным удалением от его вершины определять средний смыв породы со всего склона. По расчету переходной коэффициент K для условий отвала шахты «Матросская» (г. Лисичанск) равен 0,66. Соответственно значения модуля смыва с отвала за один, два, три, четыре, шесть и семь лет в динамике таковы:

$$M_{Icp} = 234 \text{ т/га} \cdot 0,66 = 154,4 \text{ т/га}; M_{IIcp} = 331,3 \text{ т/га}; M_{IIIcp} = 462,3 \text{ т/га}; \\ M_{IVcp} = 614,5 \text{ т/га}; M_{V-VIcp} = 848,1 \text{ т/га}; M_{VIIcp} = 1526 \text{ т/га} \cdot 0,66 = 1007 \text{ т/га}.$$

На основании полученных данных, вынесенных на рис. 2.6, установлено, что динамика смыва породы с учетной площадки описывается уравнением:

$$M = A \cdot 12,423t$$

где t – количество месяцев; A – коэффициент размерности.

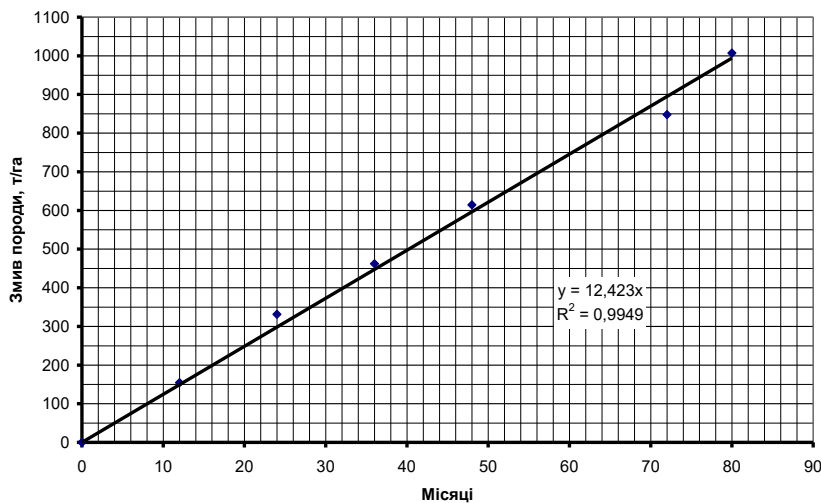


Рис. 2.6. Динамика смыва породы с террикона на протяжении семи лет

Расчеты показывают, что за первый год с отвала было смыто 154,4 т/га, за второй 176,9 т/га, за третий 131 т/га, за четвертый 152,2 т/га, за пятый и шестой 112 т/га и 121,5 т/га, за неполные 8 месяцев седьмого года – 159 т/га. В среднем за 80 месяцев месячный смыв породы составил 12,6 т/га, а годовой – 151,1 т/га.

Смыв породы со всего отвала может быть определен по формуле:

$$m_{cm} = M_{cp} \cdot S_{б.нов},$$

где m_{cm} – масса смытой породы; $S_{б.нов} = 5,04$ га – площадь боковой поверхности отвала; M_{cp} – средний суммарный модуль смыва.

Таким образом, за неполных 7 лет, прошедших после переформирования террикона в плоский отвал, смыв породы со всей его поверхности достиг такого значения: $m_{cm} = 1007 \text{ т/га} \cdot 5,04 \text{ га} = 5075 \text{ т}$.

Проанализировав метеоданные, мы установили, что за 1 – 6-й годы выпало 372, 430, 331, 583, 528 и 400 мм при норме годовых осадков (473 мм), то есть 79, 91, 70, 123, 112 и 85% от нормы. Корреляцию данных по смыву с годовыми осадками обнаружить не удалось, однако полученные данные позволяют сделать важный вывод о том, что эрозионные процессы на крутых склонах терриконов характеризуются не только катастрофической интенсивностью, но и тем, что, в отличие от склоновых земель агроландшафтов, эти процессы происходят даже в маловодные годы, то есть практически ежегодно.

2.2 Метод шпилек

Данный метод основан на учете изменения уровня почвенной поверхности и применяется для определения как потерь почвы на определенном участке, так и объема отложившихся наносов в зоне их аккумуляции. Как отмечает Н.Гудзон (Norman Hudson) [45], потери почвы с пахотных участков до 15 т/га невозможно определить по изменению отметок поверхности. И это вполне понятно, поскольку при эрозионном снижении поверхности почвы всего на 1 мм имеет место ее потеря не менее $10 \text{ м}^3/\text{га}$. Данный метод пригоден в местах концентрированного стекания воды, например, в ложбинах. Основной принцип метода заключается в том, что «в грунт забивают металлические костыли или оцинкованные железные гвозди длиной около 300 мм. Измерение расстояния от верха костыля до поверхности земли показывает изменение поверхности за счет эрозии почвы. Если чередуются циклы эрозии почвы и ее отложения, то гвоздь с шайбой из оцинкованного железа забивают до уровня почвы. При эрозии шайба опускается вместе с поверхностью почвы, а накапливающаяся на шайбе почва говорит о масштабе отложения». Можно интерпретировать этот способ как использование шпильки в виде тонкого металлического стержня с нанесенными на него делениями или просто окрашенный наполовину длины белой, наполовину более темной краской. Шпильку погружают в почву светлой частью вниз (до нулевой отметки шкалы). По длине белой части, обнажившейся после ливня или стока талых вод или по делениям шкалы судят о высоте потерянного слоя почвы или о высоте наноса почвы. Метод шпилек применяют как при изучении водной, так и ветровой эрозии.

Более эффективен метод шпилек при учете многолетних потерь почвы, а также при учете смыва по отложению наносов. Примером его реализации является разработанный нами способ учета продуктов водной эрозии с породных отвалов угольных шахт - терриконов, защищенный патентом на полезную модель [143] (рис. 2.7).

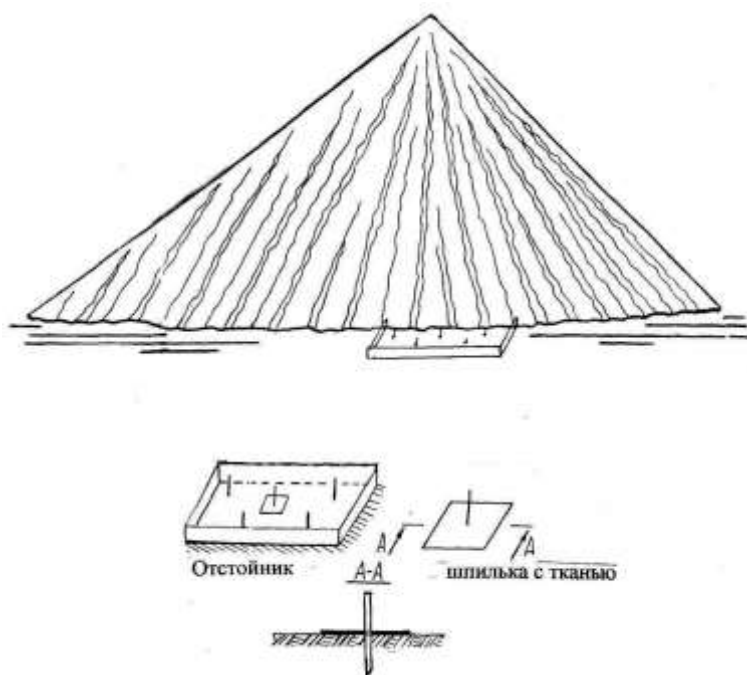


Рис. 2.7. Способ учета продуктов водной эрозии с терриконов

При использовании на этих объектах метода Соболева учитывается только линейная эрозия вдоль существующих промоин, но неучтенной остается весьма значительная поверхностная эрозия между ними; другим недостатком метода в условиях терриконов является высокая трудоемкость, связанная с необходимостью работы и перемещения по их крутой поверхности.

В разработанном способе учета смыва породы с терриконов, основанном на замере изменений уровня поверхности грунта с помощью шпилек, согласно новому решению у подножия отвала устраивают приемный резервуар-отстойник, в котором определяют объем стока и учитывают суммарные продукты плоскостной и линейной эрозии (рис. 2.7).

Для реализации способа на склонах отвала каждой экспозиции выбираются треугольные секторы с одинаковой площадью. У подножия секторов располагаются отстойники прямоугольной формы. Их границы закрепляются земляными валиками или транспортной лентой, прикопанной на глубину 50 см. Площадь типового сектора равна 350 м^2 ($70 \text{ м} \cdot 10 \text{ м} / 2$), где 70 м – средняя длина склона терриконика, 10 м – ширина сектора у его подножия.

При среднем многолетнем значении слоя стока талых вод с уплотненного грунта, равном 50 мм, объем стока с учетной площади будет равен $17,5 \text{ м}^3$. Исходя из расчетного объема стока, размеры отстойника будут следующими: длина – 5 м, ширина – 10 м, высота бортов – 0,5-0,7 м. Равномерно по площади отстойника располагаются 5 шпилек. Общая высота каждой равна 35 см. Шпильки заглубляются в грунт на 15 - 20 см.

После таяния снега или ливня в резервуаре измеряется слой воды и с учетом его площади (50 м^2) вычисляется объем стока. После поглощения воды по укорочению незаглубленной части каждой из шпилек измеряется среднее изменение уровня поверхности почвы (предположим, 10 см). Затем вычисляется объем смытого грунта. Он равен произведению площади отстойника на высоту слоя отложений в нем: $50 \text{ м}^2 \times 0,1 \text{ м} = 5 \text{ м}^3$. В пересчете на 1 м^2 учетной площади смыв грунта составит $5 \text{ м}^3 / 350 \text{ м}^2 = 0,0143 \text{ м}^3/\text{м}^2 = 143 \text{ м}^3/\text{га}$. Средняя высота слоя смытого грунта равна 14,3 мм. Умножив смыв по объему на плотность грунта ($1,29 \text{ т}/\text{м}^3$), получим смыв по массе, равный 184,5 т/га.

Так же вычисляется смыв на склонах других экспозиций, данные осредняются, и с учетом площади поверхности всего отвала (1,4 га) вычисляется масса грунта, смытого с него за одно эрозионно-гидрологическое явление: $184,5 \text{ т}/\text{га} \times 1,4 \text{ га} = 290,4 \text{ т}$.

Под одной из шпилек располагают пленку площадью 1 м^2 . Грунт, отложившийся на ней, собирают и анализируют на химический состав, высчитывают количество смытых элементов с единицы площади и всего склона данной экспозиции. По сумме смыва элементов с отдельных склонов определяют общий их вынос с терриконика и соответственно количество загрязняющих веществ, поступивших с отвала на прилегающую территорию, которая зачастую в Донбассе бывает занята сельскохозяйственными угодьями или приусадебными землями жителей.

Разновидностью метода шпилек можно считать применявшуюся и в наших исследованиях оценку величины потерь почвы по изменению глубины залегания семян. В [95] ее рекомендуют для определения потерь почвы от дефляции. Для различных культур она известна: так, для пшеницы - около 3 см. На ровной части поля метод трудноприменим из-за недостаточной точности, но в ложбинах, где глубина промоин измеряется сантиметрами, метод дает небольшую ошибку, особенно если использовать и такой диагностический признак, как то, что подповерхностная часть стебля выше семени, как и у шпильки, имеет белый цвет. При глубине промоин до 10-15 см растения озимой пшеницы остаются лежащими на поверхности с обнажившейся, но полностью не вымытой корневой системой, по длине которой до семян и длине белой части стебля можно судить о величине потерянного слоя почвы.

Простейший способ сохранения начального уровня почвы состоит, по описанию Н.Гудзона, во вдавливании в почву бутылочного колпачка. Вокруг него почва подвергается эрозии, а по высоте «пьедестала» (столбика почвы под колпачком) измеряют ход эрозии. Такие же столбики можно обнаружить и под естественно лежащими камнями подобно случаю на рис. 2.8.



Рис. 2.8. Пьедестальная эрозия (фрагмент фото Dr. F.Kwaad, сделанного в Люксембурге [222])

Видимо надо отметить ограниченность этого простого приема, поскольку, если будет поток, он размост и столбики, но на коротких крутых склонах, где преобладает эрозия разбрызгивания, столбики сохраняются. Большое передвижение почвы можно зафиксировать путем распыления краски вокруг выступающих на поверхность камней или корней деревьев.

Появившаяся неокрашенная часть ниже границы нанесения краски на камень характеризует степень эрозии.

В случае щебнистой почвы можно определить мощность выдутого слоя почвы по накоплению щебня на поверхности почвы. Для этой цели М.И. Долгилевич, согласно [96], предлагает с учетных площадок размером $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$ собрать двухсантиметровый поверхностный слой почвы и с помощью сита с размером ячеек 2 мм отделить мелкозем от камней и взвесить его. Затем необходимо определить концентрацию камней в пахотном слое почвы с помощью того же сита. Зная концентрацию камней в почве и количество камней, накопившихся на учетной площадке, можно, составив пропорцию, рассчитать количество мелкозема, вмещавшего это количество камней до начала дефляции.

2.3 Изучение дефляционных процессов путем замера нанорельефа

Метод описан в рекомендациях, разработанных Г.Е. Кошкиным, Н.И. Паниным, А.С. Извековым [118]. При исследовании пыльных бурь установлены три последовательные фазы развития эрозионного процесса на гребнистой поверхности поля (рис. 2.9). Дефляции предшествует измельчение почвенных агрегатов в результате промерзания и оттаивания, намокания и высыхания почвы. Содержание частиц размером менее 1 мм в верхнем 5-сантиметровом слое почвы к началу весенне-полевых работ достигает более 50% по весу. Такая почва легко подвергается воздействию ветра.

В первой фазе измельченные почвенные агрегаты под действием силы тяжести и ветра скатываются в пониженные места нанорельефа (рис. 2.9 а). Это фаза *накопления эродированного материала*. Началом ее считается появление в бороздках агрегатов, скатившихся с гребней, концом - время, когда сглаженные гребни сравниваются с засыпанными бороздками.

Во второй фазе (*развеивания*) дефляция интенсивнее, так как отсутствуют неровности почвы. Мелкие пылевидные частицы поднимаются на значительную высоту и переносятся на большие расстояния. Более крупные частицы, передвигаясь скачками или волочением, разрушают нетронутый слой почвы на валиках. Участок, где дефляция достигла второй фазы, характеризуется чередованием полосок сглаженных валиков с наносами (рис. 2.9 б). По мере развития эрозии ширина полосок с наносами становится все меньше (рис. 2.9 в).

За второй фазой наступает третья, для которой характерна выровненная поверхность участка, отсутствие наносов (рис. 2.9 г).

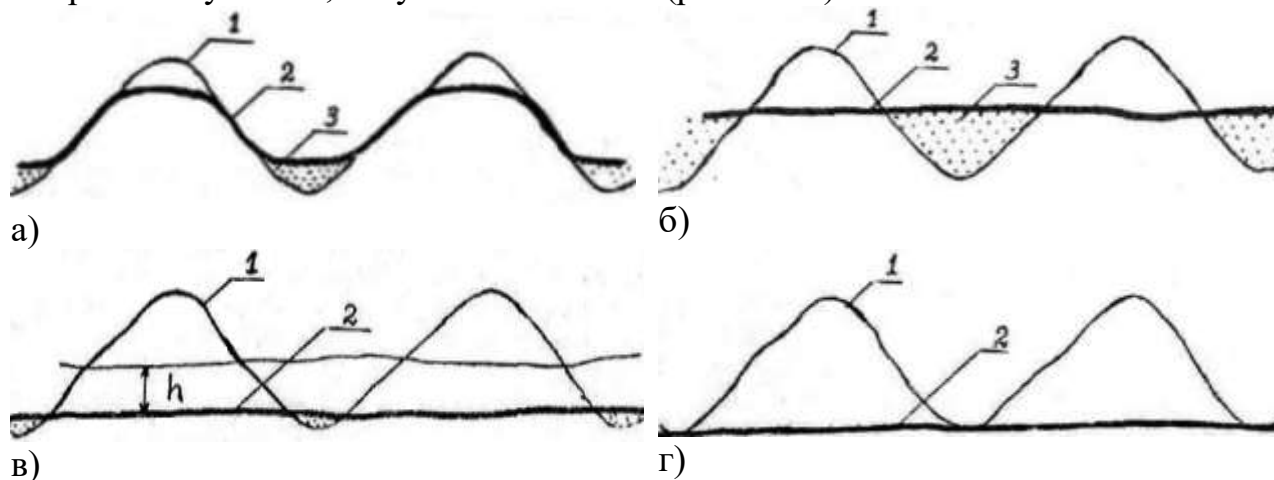


Рис. 2.9. Фазы ветровой эрозии: а) первая; б) начало второй (поверхность поля выровнялась; в) вторая; г) конец второй и начало третьей; 1 – гребнистая поверхность поля до эрозии, 2 – поверхность поля в процессе дефляции, 3 – масса почвы эродированных гребней, отложившейся в бороздках, h – высота развеянного ветром слоя почвы

При обследовании эродированного поля вначале выполняют замеры площадей эродированных участков мерной лентой или двухметровкой. Если поле окаймлено лесополосами или рельеф поля неровный, то на нем могут быть одновременно участки с с пятью разными состояниями: с сохранившимся после

пыльной бури неизменным микрорельефом, с тремя фазами эрозии и участки с эоловыми отложениями (наносами).

Объем эродированного материала в первой фазе вычисляют по изменению глубины бороздок (высоты гребней, валиков). Для этого замеряют глубину бороздок до начала эрозии не менее чем в 100 пунктах. Если этого не было сделано заранее, такие замеры делают после пыльной бури на участке поля, не подверженном эрозии. Замеры делают по диагонали участка через равные расстояния, прикладывая линейку к положенной на землю рейке (рис. 2.10).

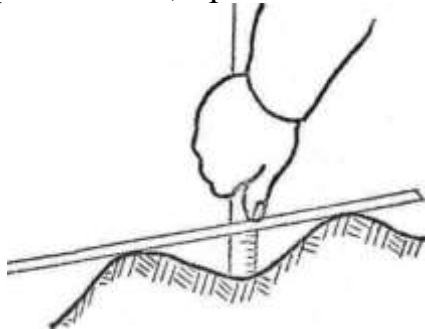


Рис. 2.10. Замер глубины бороздок до начала эрозии

Расчет объема эродированной почвенной массы производят по формуле:

$$U_1 = S(H-h)/8H,$$

где S – площадь участка; H – средняя высота валиков (глубина борозд) до эрозии; h – их средняя высота после бури.

Объем эродированной массы во второй фазе производят по замерам ширины полосок с наносами и сглаженных валиков по формуле:

$$U_2 = 0,5S(X_в - X_н)/(X_в + X_н),$$

где $X_в$ – ширина валиков (эродированных выдутых полосок), $X_н$ – ширина наносов в сохранившейся части бороздок.

Объем эродированной почвы в третьей фазе определяется различными способами: по изменению глубины залегания высеванных семян на посевах, по столбикам сохранившейся почвы – "останцам", методом шпилек и реперов, микро nivelирования, по изменению процентного содержания щебня или гумуса в верхнем слое почвы, по объему эоловых отложений.

Согласно методу заделанных в почву нитей, описанного К.С.Кальяновым, на исследуемом участке провешивают линию и намечают точки через равные расстояния. С помощью тонкого железного штыря в намеченных точках заделывают нити с грузом на конце для закрепления их в почве. На поверхности почвы оставляют нити одинаковой длины. Ряд с заделанными нитями отмечают колышками (сторожками) на расстоянии 1 м от него. По увеличению свободных концов нитей определяют толщину эродированного слоя почвы.

2.4 Метод микро nivelирования

Разработан в Проблемной лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ им. М.В. Ломоносова и заключается в устройстве на исследуемой площадке жестко фиксированных опор, на которые, по мере наступления сроков измерений, устанавливают на постоянной высоте от поверхности почвы металлическую рейку, по которой свободно перемещается тележка с прикрепленной к ней мерной иглой. Мерная игла снабжена нониусом и позволяет измерять вертикальную координату точки на поверхности почвы с точностью до 0,1 мм. Горизонтальную координату определяют с точностью до 1 мм (по линейке, укрепленной на направляющей рейке). Имея два профиля поверхности почвы, полученные в одном створе в разное время, можно

определить слой почвы, который утрачен вследствие эрозии за это время. Метод пригоден для работы с почвой в состоянии, близком к равновесному, при котором плотность почвы приблизилась к некоторой постоянной для данного угодья и сезона величине. В случае рыхлой почвы возможны ошибки в определении величины смыва, обусловленные усадкой почвы. Метод микронивелирования применяют при изучении всех видов эрозии [95].

2.5 Фотографические методы

Метод фотопрофилирования. Разработан во ВНИИ кукурузы, где был создан прибор – реечный профилограф, с помощью которого поверхность эродируемой почвы фотографируется, а ее профиль фиксируется на экране прибора. Затем по фотографиям определяют площадь поперечного сечения и вычисляют объем смытой почвы [53].

Стереофотограмметрический метод [22, 95]. Основан на сравнении вертикальных координат нескольких сотен точек на поверхности небольшого участка почвы, попавшего в кадр, по фотографиям, сделанным из фиксированной точки в два срока: до проявления процессов эрозии и после. По оценке [95] этот метод значительно точнее всех, описанных выше, поэтому он может найти применение при моделировании процессов и водной, и ветровой эрозии. К преимуществам метода относится и простота получения фотографий изучаемой поверхности. К недостаткам — высокая стоимость и сложность оборудования для считывания с этих фотографий требуемой информации.

2.6 Радионуклидный метод определения потерь почвы

К непрямым методам исследований следует отнести оценку потерь почвы по изменению содержания в почве изотопа ^{137}Cz , описанный в [172]. Данный изотоп является одним из компонентов глобальных радиоактивных осадений, которые возникли вследствие испытаний ядерного оружия в атмосфере с 1943 по 1967 гг. Другим источником ^{137}Cz в Украине являются выбросы радионуклидов при аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. ^{137}Cz прочно сорбируется почвенно-поглощающим комплексом и практически не мигрирует по профилю почвы. Горизонтальная миграция этого радионуклида возможна только с эрозионными процессами. В результате многократных обработок почвы этот изотоп равномерно распределяется в пахотном слое. На территориях до нескольких тысяч гектаров величину выпадений ^{137}Cz из атмосферы следует считать постоянной величиной. И.В. Якимовой (1988) предложена формула для определения потерь почвы (Δh , см):

$$\Delta h = \left(1 - x^{\frac{1}{n}}\right) \cdot H, \quad (2.6)$$

где H - мощность пахотного слоя (см), n - количество лет, x - концентрация ^{137}Cz в долях от эталона для исследуемого образца почвы.

2.7 Методы и устройства для измерения потоков почвы в процессе водной и ветровой эрозии

Как отмечается в [95], вышеперечисленные методы позволяют с той или иной точностью оценить потери почвы, т.е. последствия эрозии, но не дают сведений о механизме ее процессов, без понимания которых ими трудно управлять. Поскольку процессы эрозии сводятся к движению масс почвы под действием водных или воздушных потоков, необходимо уметь измерять это движение.

Все применяемые для этого устройства делятся на две категории: одни предназначены для измерения суммарного переноса твердой фазы через все живое сечение взвесенесущего потока, другие — для измерения потока твердой фазы через фиксированную площадку (равную площади отверстия прибора, помещенного в поток), составляющую зачастую ничтожную долю живого сечения всего взвесенесущего потока (особенно при дефляции почв).

Анализ всего взвесенесущего потока используют при углубленном изучении эрозии почв во время снеготаяния. Для этого из русла временного водотока периодически отбирают в мерную емкость пробу стока, определяют его расход, измеряют площадь сечения потока и рассчитывают его среднюю скорость. Тут же в поле методом мокрого просеивания пробы стока на колонке сит определяют распределение по размерам частиц донных наносов [95]. Мутность потока определяют методом фильтрования. При этом пробу стока выливают в воронку с кружком фильтровальной бумаги, сложенной особым образом в гофрированный конус. Исходная масса бумаги известна, после фильтрования и высушивания в термостате ее снова взвешивают и по прибавке веса определяют массу наносов, содержащихся в пробе. Путем деления массы наносов на объем пробы и получают мутность воды в г/л. Лучше это делать в лаборатории, поскольку пробу воды можно еще использовать для ее химического анализа. Процесс фильтрации значительно ускоряется при использовании фильтровального прибора ГР-60 (рис. 2.11).

Весь взвесенесущий поток удастся проанализировать и при изучении смыва почвы с небольших водосборов размером от десятых долей до нескольких гектаров. В этом случае весь объем поверхностного стока с водосбора пропускают через измерительный комплекс, где определяют расход жидкого стока, стока донных наносов и взвешенных наносов, стока растворенных в воде веществ. Подробнее об этом будет рассказано в подразделе 3.2.

При изучении дефляции почв в натуральных условиях такой возможности нет, поэтому для этого применяют методы и устройства второй категории. Хотя они и уступают в надежности определения суммарного потока твердой фазы методам первой категории, но имеют преимущество в том, что дают весьма ценную информацию о пространственном распределении концентрации почвенной фазы во взвесенесущих потоках.



Рис. 2.11. Фильтровальный прибор Куприна (ГР-60)

Для измерения переноса твердой фазы через все живое сечение взвесенесущего водного потока необходимо знать его расход и мутность воды. *Расход* потока - это количество воды, проходящее через его поперечное сечение за единицу времени, измеряемое в случае склонового стока обычно в л/с.

Расход небольшого потока можно определить *объемным методом* – по времени заполнения емкости известного объема.

Для больших потоков применяют метод «*скорость-площадь*». Суть его состоит в определении площади поперечного сечения потока, его средней скорости и их перемножении. Для расчета площади сечения потока необходимо измерить ширину потока и его среднюю глубину, а затем перемножить их.

Для определения скорости склонового потока применяют различные методы. Наиболее удобным и точным из них является метод микровертушки (рис. 2.12, 2.13).

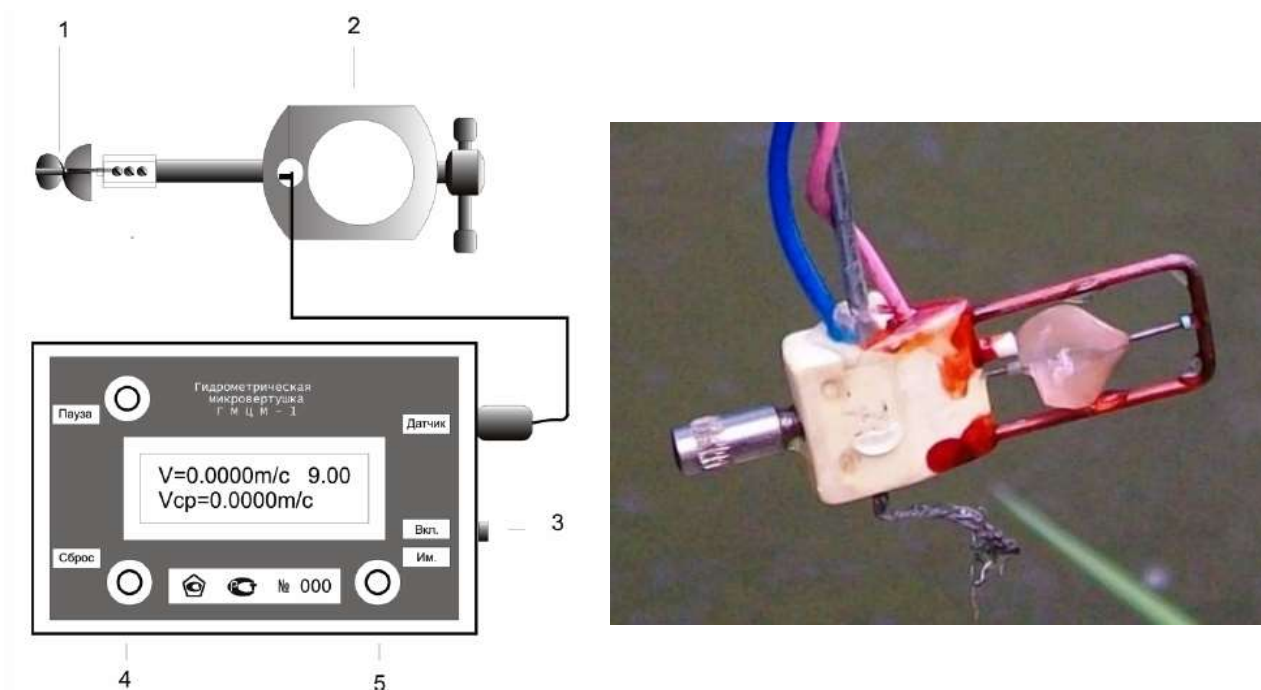


Рис. 2.12. Микровертушки ГМЦМ-1 (слева) и Х-6-М (справа, в натуральную величину, фото А.Р.Зубова): 1 – лопастной винт, 2 держатель лопастного винта, 3 – включатель, 4 – кнопка «сброс», 5 – кнопка «ИМ» тестового имитатора сигнала, 6 – кнопка «пауза».



Рис. 2.13. Студенты-гидрологи кафедры «Гидрометеорология» ВНУ им. В.Даля под руководством проф. Зубова А.Р. осваивают методы измерения скорости потока в ложбинах при стоке талых вод (фото проф. Зубовой Л.Г., март 2006 г.).

Очень прост и удобен для быстрого производства большого количества измерений, хотя и менее точен, метод трубки Пито (рис. 2.14).

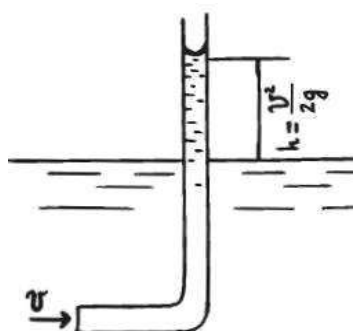


Рис. 2.14. Стекло́нная трубка Пито [96]

Принцип действия трубки: под действием скоростного напора, действующего на приемное отверстие трубки, вода в ней поднимается, и по высоте ее столбика h можно определить скорость. Фактически в трубке кинетическая энергия потока, равная $mv^2/2$, преобразуется в потенциальную, равную mgh , где m – масса некоторого объема воды, v – скорость потока, h – высота поднятия воды.

Приравняв энергии, получаем:

$$mv^2/2 = mgh,$$

$$\text{откуда } h = v^2/2g = 0,051v^2, \text{ а } v = \sqrt{(2gh)} = 4,43h^{0,5}.$$

Например, если $v = 0,5$ м/с, $h = 0,051(0,5)^2 = 0,0127$ м = 13 мм. И наоборот, если $h = 20$ мм = 0,02 м, $v = 4,43 \cdot 0,02^{0,5} = 0,63$ м/с.

Но это теоретически. На практике приходится трубку тарировать. Так в исследованиях, проводившихся нами, скорость ручейков измерялась вначале двумя способами – трубкой и поплавками, как будет показано ниже.

Набрав фактический материал, построили тарировочную кривую (рис. 2.15). Ее уравнение имеет вид: $v = 0,0647h^{0,653}$, $R^2 = 0,803$; соответственно $r = 0,90$.

Как видим, показатель степени при h в эмпирическом уравнении, равный 0,65, больше чем в теоретической формуле.

Затем замеры проводились только трубкой, что существенно облегчило измерения, сделало их более точными, поскольку скорость можно было измерять

в нескольких точках водного сечения с точно измеренными параметрами.

Важным дополнением к L - образной трубке является наличие второй - прямой вертикальной трубки, соединенной параллельно с первой (на рисунке не показана). Дело в том, что вследствие явления капиллярности даже при отсутствии напора вода поднимается по трубке выше поверхности воды, поэтому надо брать отсчет высоты подъема от мениска в вертикальной трубке, столбик воды в которой не испытывает скоростного напора.

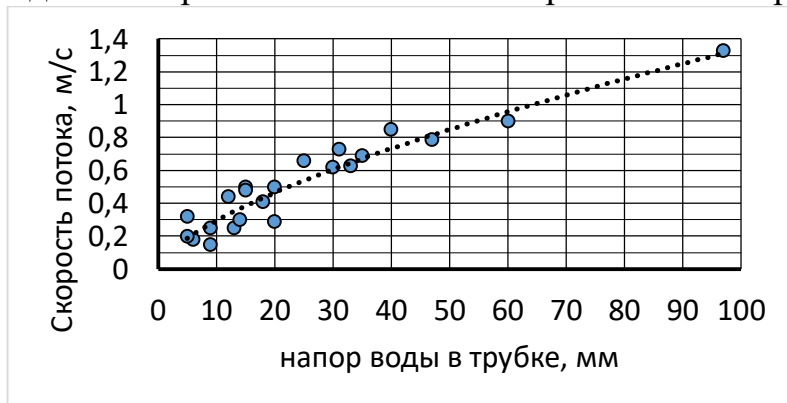


Рис. 2.15. График тарировки трубки Пито

Иногда скорость потока определяют по времени прохождения отмеченной дистанции определенной длины бросаемыми в поток поплавками или используя естественные плавущие растительные частицы.

В случае чистой воды в воду капают краситель (чернила) или раствор

электролита, при дохождении которых до конца дистанции судят визуально или по повышению электропроводности с помощью гальванометра.

В.И. Петровым во ВНИАЛМИ [151] разработан метод измерения расхода водного потока, основанный на электрометрии, применительно к горным рекам.

Для определения мутности речной воды (содержания взвешенных наносов) отбирают ее пробы с помощью батометров различных конструкций, наиболее известным из которых является батометр-бутылка (рис. 2.16).

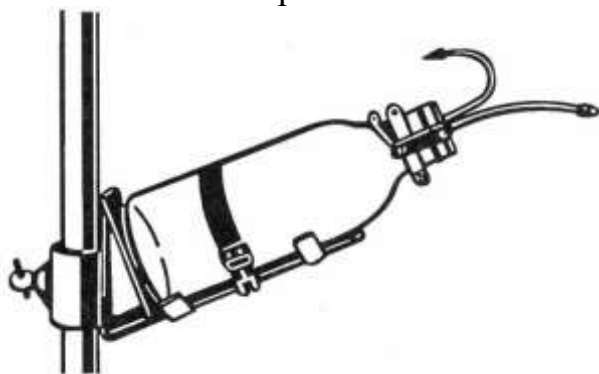


Рис. 2.16. Батометр-бутылка на штанге.

Однако в малых ручьях батометр не удобен. Проще отобрать воду непосредственным погружением в поток компактной емкости с широким горлом.

При малых глубинах потока пробы на мутность целесообразно брать с помощью вакуумного батометра [116]. Он представляет собой бутылку, закупориваемую пробкой с двумя трубками (рис. 2.17).

Одна трубка служит для соединения бутылки с вакуумным насосом, другая, снабженная наконечником, предназначена для забора проб воды. Наконечник крепят к штанге и опускают на заданную глубину. Заполнение бутылки водой осуществляется за счет разности давления в бутылке и атмосфере, создаваемой насосом. С.В. Будник [24] предлагает использовать для отбора проб из малых ручейков резиновую грушу с наконечником.

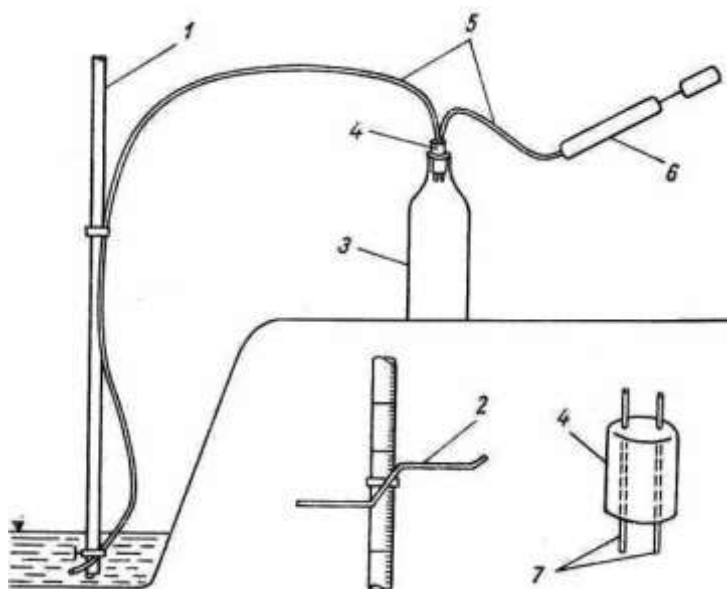


Рис. 2.17. Вакуумный батометр:
1 – штанга; 2 – водозаборный
наконечник; 3 – бутылка;
4 – пробка; 5 – шланги; 6 – насос;
7 – трубки латунные.

Измерений мутности, проводимых на разной глубине, достаточно только для расчета потока взвешенных наносов.

Для определения суммарного потока почвенной фазы во взве-

сенесущем потоке необходимо измерение также потока донных наносов. Их измерение производят с помощью донных ловушек.

Типичная донная ловушка представляет собой открытую коробку, заделываемую в дно потока так, чтобы края коробки были вровень с дном. Сверху коробка накрывается решеткой. Конструкция решетки такова, что частичка почвы, катящаяся или скачущая по дну потока и попавшая на решетку, обязательно проваливается в коробку. Миновать уловитель донных наносов могут только те частички, длина скачка которых больше длины самого уловителя. Однако, поскольку подавляющая часть суммарного потока почвенной фазы переносится в придонном слое и характеризуется небольшой длиной скачка, можно ограничиться сравнительно небольшой длиной ловушки. Можно применить и ловушку, показанную на рис. 2.18.

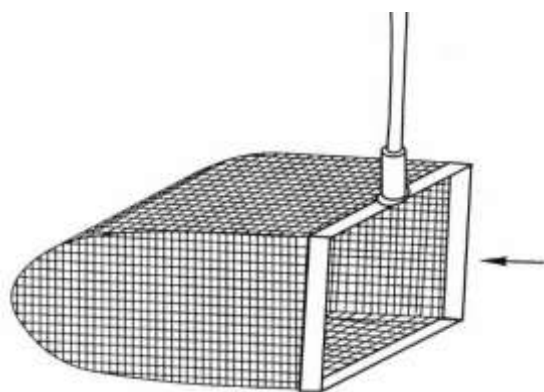


Рис. 2.18. Ловушка для отбора
донных наносов

С.В. Будник [23, 24] предлагает для изучения эрозионно-гидрологических исследований при отсутствии специально оборудованных площадок исследовать ручьи.

Выдвигаемые к ним требования: относительная прямолинейность по длине склона, отсутствие бокового оттока за пределы водосбора.

Согласно [23] по длине водотока назначается несколько створов для проведения гидрометрических работ.

Количество створов зависит от длины водотока, степени покрытости склона

снежным покровом (при постепенном освобождении водосбора от снега количество створов может быть увеличено в зависимости от удлинения водотока). В случае наличия полосного размещения культур на склоне створы наблюдений разбивают на каждом агрофоне в двух точках; в верхней части

агрофона и нижней, при переходе лесных полос: до лесной полосы и после нее. Створ располагают в местах, где водотоки имеют прямолинейные участки длиной не менее 30-40 см. Размещение створов производится так, чтобы охватить все характерные элементы рельефа.

В каждом створе каждый день в период стока проводятся гидрометрические работы, включающие в себя определение расхода воды, уклона водной поверхности, температуры воды, а также отбор проб воды на мутность и химический состав. Одновременно на линии створа проводится определение глубины оттаивания почвы, температуры воздуха и почвы, отбор проб на влажность и плотность почвы, на гранулометрический и химический анализ.

Измерение **расходов** воды в склоновых водотоках следует вести методом "скорость-площадь". Измерение скорости потока допускается проводить одним или несколькими методами в зависимости от состояния и мутности потоков.

При небольшой глубине потока (до 0,01 м) и невысокой мутности воды скорость целесообразно определять методом **пуска краски**. На прямолинейном участке назначается два створа, измеряется расстояние между ними (L , м), по длине верхнего створа пускается краска, в нижнем створе фиксируется время прохождения облака краски по секундомеру (T , с), скорость воды (v) определяется путем осреднения нескольких показаний секундомера и вычисляется по формуле: $v = L/T$, м/с.

При глубине потока более 0,01 м и относительно небольшой мутности воды, скорость потока возможно измерять с помощью микровертушки (рис.2.6), величина скорости определяется путем деления числа сигналов на счетчике микровертушке Х-6-М на время выдерживания вертушки в потоке и снятия показаний по полученной величине с тарировочной кривой. Более удобна микровертушка ГМЦМ-1, у которой скорость воды отражается на дисплее.

При высокой мутности потока применение красителей и микровертушек затруднительно, поэтому в данном случае рекомендуется применять поплавки. Способ определения скорости тот же, что и при пуске краски: в нижнем створе фиксируется время прохождения поплавка от верхнего створа секундомером. Одновременно с измерением скорости фиксируется и характер течения воды по особенностям перемещения чернильного пятна в потоке: перемещается струями, облаком, интенсивно перемешивается и т. п.

Измерение площади поперечного сечения потока в случае измерения скорости пуском краски и поплавками проводится в двух створах (верхнем и нижнем) между которыми пускали краску или поплавки.

При измерении скорости потока микровертушкой промеры поперечного сечения проводят только в створе измерения скорости воды.

В створах замеряются ширина водотока по урезу воды (B), затем, в зависимости от ширины водотока, назначается сеть промерных вертикалей для определения глубины потока так, чтобы через каждые 3 см (при $B < 30$ см) и 5 см (при $B > 30$ см), но не менее трех, были сделаны промеры глубины потока.

Промеры глубины потока целесообразно проводить деревянной линейкой (на дереве хорошо виден след от воды), ставя её широким ребром вдоль потока

для уменьшения создаваемого подпора.

Измерение **уклона водной поверхности** осуществляется прибором, принцип действия которого подобен принципу действия геодезических уровней (Будник, 2005).

Измерение **температуры воды** производится в створе наблюдений за скоростью потока термометром ТМ-10 (ГОСТ 112-78). Термометр погружается в поток так, чтобы вода свободно обтекала его со всех сторон.

Приборы для отбора проб на мутность должны соответствовать требованиям ГОСТ 17.1.5.04-81.

Емкости и батометры перед отбором проб ополаскивают водой из водотока. Отобранные пробы доставляются в лабораторию, где определяют объем каждой пробы и затем их переносят на заранее взвешенные фильтры. Фильтрование проб целесообразно проводить прибором Куприна либо на воронках (ГОСТ 19908-90). В случае дальнейшего использования пробы на химический анализ лабораторная посуда должна быть чистой, ополоснутой дистиллированной водой [24].

Определение длины и уклона склона производится при нивелировке склона по линии водотока после прохождения стока. На пути нивелирного хода в полевом журнале отмечают точки, где располагались створы. При камеральной обработке длину склона и уклон вычисляют для каждого створа.

При определении среднего уклона водосбора проводится дополнительно нивелировка участков склона поперек водотока между створами.

В наших исследованиях уклон определяли с помощью снегомерной рейки, укладываемой на почву, и эклиметра, уложенного сверху (рис. 2.19). Нажимали кнопку, освобождая колесо, выждав время, когда оно успокоится, плавно отпускали кнопку и смотрели отсчет.



Рис. 2. 19. Эклиметр ЭВ1
(фото Зубова А.Р.)

При исследованиях с использованием ручьев можно применить и подход М.С.Кузнецова (А.с. СССР №4732226, 23.03.92, бюл, № 11). Данный способ определения эрозионной стойкости почв включает создание в поле искусственного водотока, установку ловушек донных осадков, учет донных осадков, взвесей, скорости и расхода воды, нахождение предельной неразмывающей скорости течения, отличающийся тем, что, с целью определения противэрозионной стойкости почвы на различных агрофонах, водоток создают во время снеготаяния

путем *спрямления* русел естественных, временных микроручьев, при этом ловушки устанавливают на участках с разной скоростью течения.

2.8 Определение потерь почвы по отложению наносов

К методам определения смыва почвы по непосредственным результатам эрозии следует отнести измерение объема наносов, отложившихся в прудках валов-каналов и валов-террас, перед лесными полосами, в нагорных канавах, на дне балок, в прудах, как показано в работах А.И. Узолина и А.В. Кулик [194, 195] и т.д. Наносы отлагаются, если водный поток теряет свою скорость, что происходит в случае увеличения площади его поперечного сечения, уменьшения уклона дна потока или просто при встрече потока с тормозящим препятствием. В первую очередь при этом отлагаются донные наносы, степень отложения взвешенных наносов зависит от их крупности. Увеличению площади сечения способствуют водоподпорные естественные или искусственные объекты. Снижение уклона дна происходит обычно при выходе потока на дно балки, речную пойму или террасу, при подходе потока к поперечно-склоновой лесополосе с напашью по верхней опушке или к водоотводящему валу. Тормозящим препятствием может стать кустарниковая и даже травяная полоса.

Примеры отложения наносов при талом стоке показаны на рис. 2.20, 2.21.



Рис. 2.20. Смыв почвы и отложение наносов на поле с посевом озимой пшеницы, выполненным вдоль склона (Новоайдарский район Луганской области, фото А.Р. Зубова, март 2014 г.).



Рис. 2.21. Отложения наносов в лесной полосе (фото А.Р. Зубова, март 1985 г.).

В случае на рис. 2.20 наносы отложились перед валом обпашки поля плантационным плугом. Так поступают чтобы защитить поля от заезда браконьеров, охотящихся зимой за зайцами с автомобиля, ослепляя их ночью светом фар. Наносы определяют путем измерения их площади и средней высоты путем многократных замеров линейкой. Показан довольно сложный случай. Но замерять смыв по водороинам было бы сложнее ввиду малых размеров сечения и множественности промоин. Легче замерять конусы выноса из ложбин, они обычно компактны, в плане представляют подобие треугольника, площадь которого измеряют перемножением половины его основания – ширины наносов вдоль линейного рубежа и высоты – длины наносов вдоль тальвега ложбины.

Объем отложения определяют с помощью мерной ленты и линейки, тщательно измеряя его площадь и вычисляя среднюю высоту отложения путем большого количества промеров равномерно по площади. Но следует помнить, что в конусах выноса оседает только часть твердого стока, часть же взвешенных наносов транзитом выносятся в гидрографическую сеть.

Отложившиеся в устьях ложбин наносы обычно имеют в плане форму треугольника или трапеции с основанием, примыкающим к линейному рубежу.

Для определения его объема намечают несколько учетных линий, параллельных рубежу с известным расстоянием между ними и их измеренной длиной. На линиях через равные расстояния измеряют высоту наносов (после подсыхания они легко пробиваются линейкой до более плотного грунта поля). Подобно методу Соболева по длине каждой линии и средней высоте наносов вдоль нее определяют площадь сечения наносов. Затем по формуле усеченной пирамиды определяют объем наносов между соседними сечениями и суммируют эти объемы. После этого важно определить площадь водосбора, с которого стоком был принесен этот материал. Путем деления объема на площадь получают смыв в $\text{м}^3/\text{га}$. По объемной массе наносов можно пересчитать его в весовой. Надо понимать, что часть взвешенных наносов не отложилась. Но недостающую фракцию можно вычислить, если сделать мокрый рассев наносов и сравнить результаты с почвой в поле. Пример расчета смыва дан в табл. 2.3.

Пример расчета объема отложившихся наносов
(ливневый смыв 23.08.1998 г.)

№ створа	Интервал удаленности, м	Длина, м	Высота наноса, см		Площадь сечения, м ²		Объем, V _i = [7]*[2]
			h _i	h _{ср}	f _i = [3]*[5]/100	f _{ср}	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	18	8,12,10,10,6,5,5	8,25	1,485		
2	+3	17	3,4,4,3,4,4,3	3,71	0,631	1,030	3,090
3	+4	14	3,4,6,5,5,3	4,6	0,644	0,638	2,552
4	+4	10	4,2,0,3,3,2	2,2	0,220	0,413	1,652
5	+4	8	4,4,3,4,3	3,63	0,290	0,255	1,020
6	+3	2	2,2	2	0,04	0,165	0,495
Сумма	18						8,809

Разделив суммарный объем наноса на площадь ложбинного водосбора, равную 1,45 га получаем смыв почвы, равный 6,08 м³/га.

Такие же методы применяют и при определении объема эоловых отложений на пашне, в лесополосах. Определив объем, плотность отложений и размер пылесборной площади, можно рассчитать слой сдутой почвы. Точность такого рода расчетов обычно невелика. Это объясняется трудностью определения пылесборной площади, соответствующей изучаемому отложению, а также тем, что не вся почва, сдуемая с поверхности поля, откладывается у ближайшего препятствия ветру. Часть почвы, представленная мелкими частичками, уносится на большие расстояния.

Пример определения многолетних потерь почвы по ее отложениям в балках. Объектом изучения был водосбор балки Калмыцкий яр, расположенной к юго-западу от города Луганска. Измерение мощности наносов выполнялось по почвенным разрезам глубиной до 3 м, образовавшимся во многих местах дна балки в результате хищнической разработки с целью продажи многолетних отложений плодородного грунта, смытого с водосборной площади, с использованием землеройной техники и автотранспорта. Днище балок имеет меньшую крутизну чем склоны, поэтому при попадании склонового стока на дно складываются условия для отложения наносов, хотя наиболее мелкая фракция не отлагается и следует далее в пойму реки Ольховая. Учесть эту часть возможно по отложениям ила в прудах, например, в пруду «Роскошнянский» (см. [69]).

Так как разрезы имеют ограниченными возможностями экскаваторов глубину, осуществлялось их доуглубление с помощью ручного почвенного бура до начала переходных к материнской породе горизонтов. В связи с разбросанностью разрезов была выполнена их высотная и плановая привязка путем мензульной съемки. На основании плана был составлен поперечный профиль днища балки (рис. 2.22).

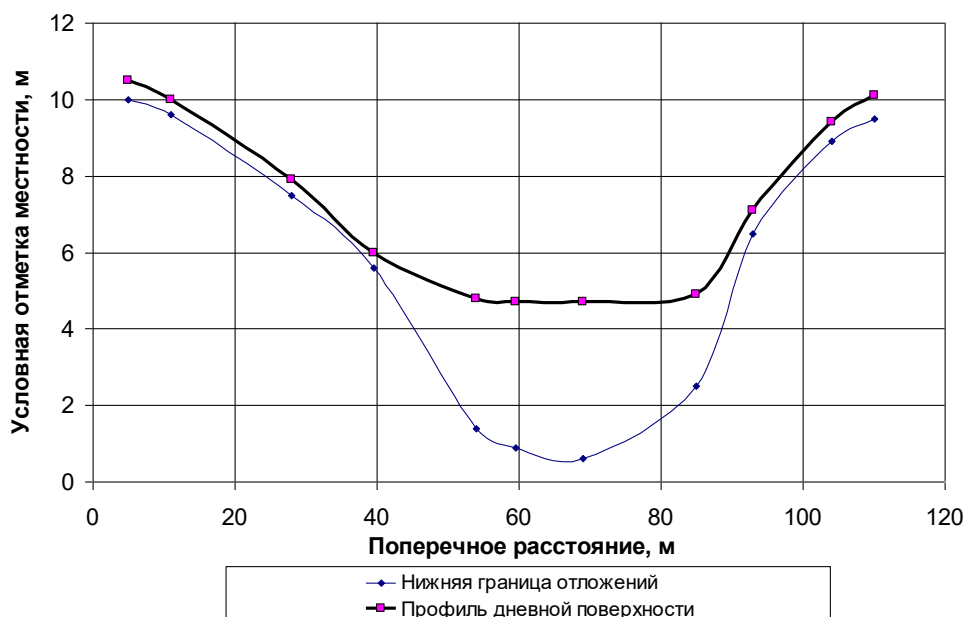


Рис. 2.22. Поперечный профиль балки "Калмыцкий яр" и делювиальных отложений на ее дне

Как удалось установить, максимальная глубина отложений превысила 4 м, площадь отложений на профиле составила 146 м². Если сделать предположение, что площадь сечения отложений увеличивается по длине балки от ее начала по линейному закону, то по формуле объема пирамиды можно рассчитать, что с учетом расстояния до изучаемого места (3,0 км) объем отложений составляет не менее 146000 м³. Закономерно предположить, что потери почвы с распаханной части водосбора балки будут превышать это количество, поскольку далеко не вся смытая почва доносится водными потоками до днища балки, отлагаясь на днищах ложбин, в прибалочных лесных насаждениях, заросших травой склонах балки. Кроме того, как уже отмечалось, не все наносы, поступившие в балку, остаются на ее днище. Следовательно, с учетом площади распаханной части водосбора (650 га), можно утверждать, что многолетние потери почвы с пашни составляют не менее 224,6 м³/га. Однако, наиболее важно определить годовые потери. Известно, что современная эрозия почв возникла сравнительно недавно. Многие исследователи связывают ее активизацию с отменой крепостного права, когда освободившиеся от господ, но безземельные крестьяне были вынуждены осваивать новые просторы, распахать менее пригодные земли. Промышленное освоение территории Донбасса сопровождалось интенсивным антропогенным давлением на природные ресурсы. Если до реформы 1861 года распаханность земли не превышала 1-2%, то уже в 1927 году она увеличилась до 72%, почти достигнув нынешнего своего значения. Таким образом, можно предположить, что период накопления наносов на днище продолжался не более 140 лет (до года измерений). Следовательно, годовые потери в среднем за период составили не менее 1,6 м³/га или 1,9 т/га. Данная цифра меньше, чем полученная расчетным путем для Лутугинского района по методике [160] - 3,7 т/га, что подтверждает, с учетом ее заниженности по вышеназванным причинам, правомерность использования модели эрозии [160] для оценки потерь почвы в Северной степи.

Пример изучения многолетней эрозии почв по донным отложениям в прудах.

Среднемноголетние потери почвы определяли по отложениям наносов в Марковском водохранилище, а также в прудах противозерозионных гидротехнических сооружений (ПЭГТС) на его водосборе [68].

Исследования проводились совместно с Ю.В.Славгородской на базе сельскохозяйственного предприятия «Орион», расположенного на севере Луганской области в Марковском районе. Территория хозяйства расчленена большим количеством оврагов и балок. Резко выраженный рельеф создает условия для развития эрозионных процессов – смыва почвы, роста оврагов. Климат умеренно-континентальный с засушливым летом и морозной холодной зимой. Почвенный покров агропредприятия представлен преимущественно черноземами обыкновенными тяжелосуглинистыми.

Марковское водохранилище создано в 1970 г. с целью орошения полей. Общая площадь его водосбора 87 км², площадь зеркала – 91,5 га, длина – 1,8 км. Исследования на водохранилище проводились в 2009 г., то есть через 39 лет после ввода его в эксплуатацию.

Для определения объема донных отложений в водохранилище были построены два профиля дна балки в привязке к нормальному подпорному уровню (НПУ) - до создания в ней водоема - согласно карты внутрихозяйственного землеустройства колхоза «Дружба» на 1970 г. и современный профиль дна водохранилища (рис. 2.23) построенный Ю.В. Славгородской по результатам выполненного измерения глубин вдоль дамбы водохранилища с лодки.

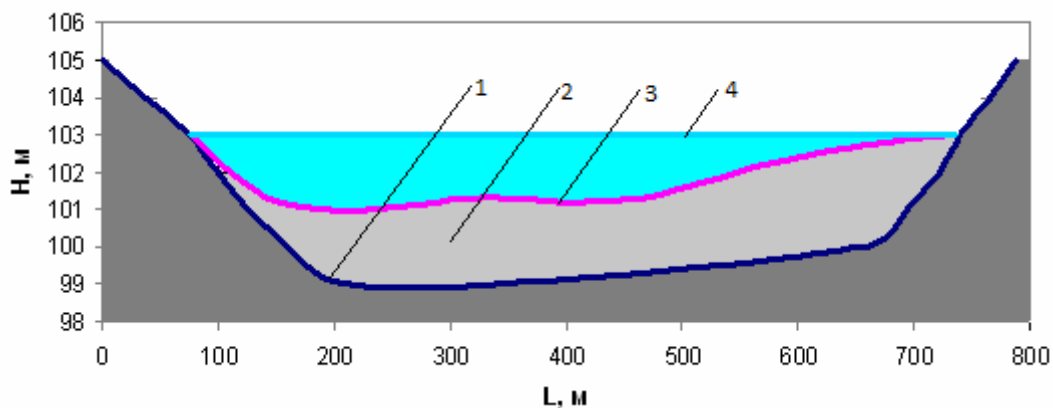


Рис. 2.23. Поперечное сечение чаши Марковского водохранилища вдоль плотины: 1 - дно балки до затопления, 2 – отложения наносов, 3 – современное дно через 39 лет эксплуатации, 4 – поверхность воды при НПУ

Разница между профилями является сечением (основанием) призмы отложений наносов, объем которых (V_n) рассчитывали по формуле:

$$V_n = \frac{F_{осн} L}{3}, \quad (2.7)$$

где $F_{осн}$ – сечение отложений, м², L – длина водохранилища, м.

Для определения площади сечения отложений применили формулу:

$$F_{осн} = \Delta h B, \quad (2.8)$$

где Δh – средняя высота наносов, м

B – ширина зеркала водохранилища вдоль дамбы, м.

Средняя высота наносов Марковского водохранилища составляла 2,1 м, ширина водохранилища вдоль дамбы равна 630 м. Сечение наносов ($F_{осн}$) как произведение средней высоты наносов и ширины водохранилища равняется 1323 м². Общие многолетние наносы на дне водохранилища – 705600 м³. Исходя из значения площади водосбора, равной 87 км², с 1 гектара ее за 39 лет эксплуатации водохранилища на его дно поступили 81 м³ продуктов эрозии, среднемноголетние поступления почвы составляют 2,1 м³ с каждого гектара, т.е. смыв почвы на водосборе балки равен 2,1 м³/га.

Для пересчета кубометров в тонны была определена объемная масса ила. Для этого высушенную до воздушно-сухого состояния пробу ила массой m поместили в емкость с площадью дна f (см²), залили водой и отстаивали до тех пор, пока высота ила в емкости h (см) перестала изменяться от измерения к измерению. Расчет объемной массы проводили по формуле $d = m/(f \cdot h)$. Полученный результат: $d = 1,25 \text{ г/см}^3 = 1,25 \text{ т/м}^3$. То есть, в пересчете на массу среднемноголетние годовые потери почвы равен 2,6 т/га.

С учетом того, что не вся почва, смываемая с сельскохозяйственных угодий транспортируется водными потоками на дно водоема, закономерно допустить, что средние годовые потери почвы с пахотных земель водосборной площади водохранилища будут превышать данное значение. Значительная часть почвы задерживается в составляющих частях гидрографической сети – отложения почвы происходят на склонах и днищах балок, в приовражных и прибалочных лесных полосах, в прудках гидротехнических сооружений и т.д.

Для пересчета применили следующий предложенный нами алгоритм.

По соотношению содержания водопрочных агрегатов размером <0,25 мм в иле дна водохранилища как конечного звена гидрографической сети (63 %) к их содержанию в почве поля как места наносообразования (35 %) определили количество почвы, смещенной с места эрозией. Коэффициент соотношения указанной фракции составляет 1,8. Зная среднемноголетнее поступление почвы в водохранилище, равное 2,6 т/га, можно предположить, что среднегодовые потери почвы с пахотных земель водосборной площади водоема превышают этот показатель в 1,8 раз и составляют 4,7 т/га.

При более точном расчете заносимости водохранилища кроме определения наносов следует учитывать и объем отложений за счет переформирования (абразии) берегов ($m = 5\text{-}10\%$ от объема стока наносов G_0) [34]. Необходимо учитывать и то, что часть взвешенных наносов проносится через водохранилище (через отверстия сбросных сооружений) транзитом, не отлагаясь в нем. Как правило, доля транзитных наносов $\delta_{ТВ}$ составляет около 5% относительно всех взвешенных наносов G_0 , т. е. масса этих наносов равна $0,05G_0$.

Кроме того, вместе с минеральными речными наносами оседает органическая масса, в основном за счет водной растительности, доля которой (e') может достигать 20% (0,2) от твердых наносов.

Таким образом, общая масса наносов, отлагающихся за год, выразится так:

$$G^1_0 = (1 + m - \delta_{TB}) \cdot (1 + e^1) \cdot G_0 \text{ [34].}$$

Среднегодовое количество потерь почвы определялось и по отложениям в прудках гидротехнических сооружений. На территории СТОВ «Орион» ГТС как элемент системы противоэрозионных мероприятий внедрялись в период с 1970 до 1972 гг. В основном они представлены гидротехническими сооружениями типа земляных валов на тальвегах ложбин, которые в условиях сложного рельефа предотвращают дальнейший рост оврагов. В целом в хозяйстве насчитывается 56 гидротехнических сооружений.

Были обследованы двадцать валов. Их выбор объясняется разной экспозицией, крутизной, длиной и формой склонов, на которых они расположены, типом севооборотов на прилегающих полях и т.п. Исследуемые валы имеют дугообразную и волнообразную форму, длину от 70 до 142 м. В большинстве случаев их верховой пологий откос обрабатывается, а нижний – более крутой залужен. Экспозиция склонов – северо-восточная, восточная, юго-восточная, западная, северо-западная. Крутизна склонов – 1-5°. Форма склонов – прямая, выпуклая, вогнутая. Длина склонов – 290-740 м. Средняя продолжительность эксплуатации валов составляет 38 лет.

Для определения объема отложений почвы сравнивали продольные и поперечные профили валов - проектные и современные фактические.

Современные продольные и поперечные профили склонов с валами были построены по результатам геодезических съемок. Для этого было изготовлено устройство в виде двух размеченных через каждый сантиметр деревянных реек, к верхушке которых прикреплялись горлышком вниз пластиковые бутылки емкостью 0,5 л. Бутылки соединялись между собой прозрачной гибкой трубкой длиной 5 м, заполненной водой. Работа устройства (своего рода строительного уровня) основана на законе сообщающихся сосудов. С помощью данного устройства измерялось превышение - разность высот между точками продольного профиля, проходящего по дну ложбины поперек вала и трех поперечных, проходящих вдоль вала в его прудке на 15 м выше и ниже вала (на местности, которая не была нарушена при строительстве сооружений). Превышения между точками (всего их было снято 880) и длина между ними фиксировались в лабораторном журнале. На основе этих данных и были построены современные поперечные и продольные профили в условных отметках.

Для построения профиля склонов до сооружения валов использовали карту масштабом 1:10000 с горизонталями. Методом реконструкции строили профили валов с их прудком (выемкой грунта перед ними). Путем попарного сравнения продольных и поперечных профилей (см. пример на рис. 2.24) рассчитан объем наносов в прудках ПЭГТС. Объем наносов определялся по формуле пирамиды:

$$V_n = \frac{F_{осн} L_{нан}}{3}; V_n = \frac{F'_{осн} B_{нан}}{3},$$

где $F_{осн}$ и $F'_{осн}$ – поперечное и продольное сечение наносов в самом глубоком месте, м²; $L_{нан}$ – длина наносов вдоль вала, м; $B_{нан}$ – ширина наносов, м.

Из вышеприведенных формул видно, что объем наносов определялся дважды – как по длине, так и по ширине наносов.

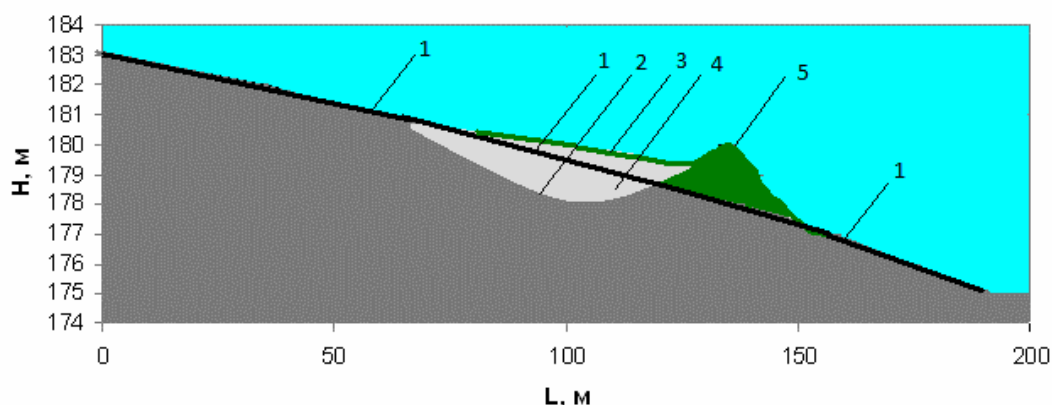


Рис. 2.24. Продольные профили склона до, после сооружения вала и после заиления его прудка : 1 – линия склона, 2 – дно выемки (прудка), 3 – поверхность заиленной выемки, 4 – отложения в прудке вала, 5 – вал (насыпь)

Средний объем наносов рассчитывался как среднее значение объемов наносов по их длине и ширине. По объему наносов определялся среднегодовой смыв почвы с 1 га водосборной площади каждого сооружения. Для пересчета смыва почвы из м³/га в т/га применяли коэффициент объемной массы, равный 1,17.

Вычисленные среднемноголетние годовые потери почвы для водосборной площади различных валов колеблются в пределах 1,0 – 2,8 т/га, среднее значение 2,1 т/га. Установлена корреляционная зависимость потерь почвы от площади водосборов, длины, крутизны и экспозиции склонов. В табл. 2.4 представлены уравнения-множители полученной модели, показан рост коэффициента корреляции по мере включения в модель новых факторов.

Таблица 2.4

Многофакторная математико-статистическая модель потерь почвы

Фактор		Уравнение функции фактора	Коэффициент множественной корреляции r
X_1	площадь водосбора, га	$Y = 1,197 + 2,861/X_1$	0,56
X_2	крутизна склона, град	$Y = 0,889 + 0,004X_2^3$	0,66
X_3	длина склона, м	$Y = 0,9 + 8,938 \cdot 10^{-10}X_3$	0,69
X_4	экспозиция	$Y = 1,147 - 0,138X_4 + 0,0189X_4^2$	0,78

График математической модели корреляционной зависимости от водосборной площади гидротехнических сооружений (рис. 2.25) иллюстрирует, что расчетные потери почвы уменьшаются с увеличением площади водосборов.

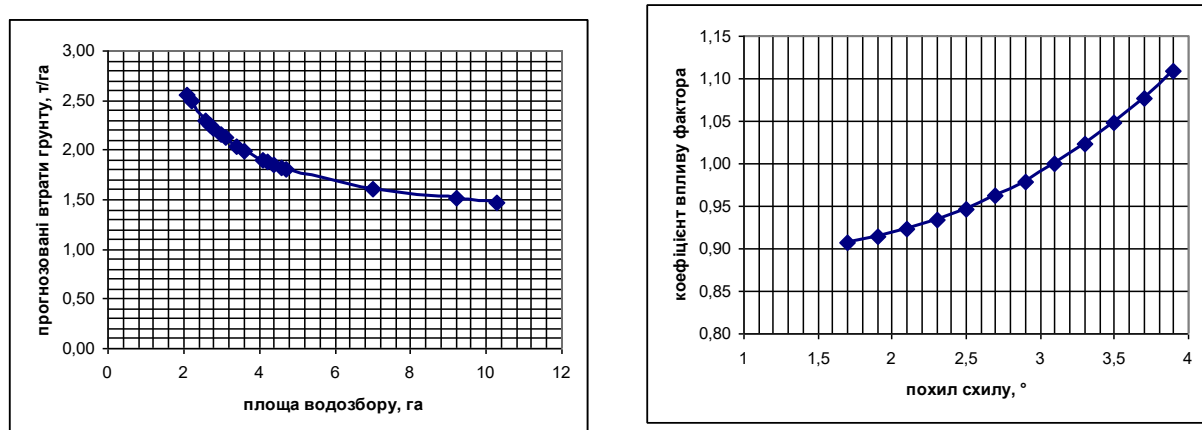


Рис. 2.25. Расчетная зависимость потери почвы от площади водосбора в натуральном виде и от крутизны склона – в коэффициентном

С увеличением крутизны склона и длины склона наблюдается увеличение потерь почвы. Коэффициент влияния факторов равняется единице при крутизне склона $3,1^\circ$, его длине 480 м. Среднегодовые потери почвы по экспозициям склонов такие: на восточной – 1,8 т/га, на западной – 2,2 т/га, на юго-восточной – 1,8 т/га, на северо-восточной – 1,9 т/га, на северо-западной – 2,7 т/га.

Потери почвы на склонах западной экспозиции больше чем на склонах восточной экспозиции на 0,4 т/га. Кроме естественных факторов на такие показатели влияет и то, что склоны западной, северо-западной и северо-восточной экспозиций активнее используются в аграрном производстве. На отмеченных склонах размещены полевые севообороты, тогда как на склонах восточной и юго-восточной экспозиций – почвозащитные севообороты.

Заиление Роскошнянского пруда. Ярким примером заиления прудов является пруд бывшего опытного хозяйства УНИИЗПЭ совхоза «Ударник», земли которого ныне принадлежат птицефабрике ОАО «АВИС» («Роскошнянский пруд», «Луганское водохранилище», а в народе – «Луганское море»). Пруд расположен к югу от Луганска на реке Ольховая.

Проектная емкость пруда составляла 770 тыс. м³, максимальная глубина (у плотины) 5 м. Сбросные сооружения поддерживают уровень воды практически на постоянной отметке. Длительное время накопленные прудом воды использовались для орошения овощных культур в с-зе "Ударник", а ныне пруд служит местом отдыха и рыбной ловли горожан.

В 2003 году А. Р. Зубовым и Л. Г. Зубовой были выполнены около 200 замеров глубины пруда. Они производились с резиновой лодки с помощью ручного лота; месторасположение точек замеров на плане определялось глазомерно и показано на рис. 2.26 (слева). Измерения показали, что наибольшая глубина пруда в то время уже не превышала 2 м (при проектной 5 м). В среднем по северной (большей части пруда), частично отделенной от южной (меньшей

части) вытянутым подобием «полуострова», она равнялась 1,47 м, а по приплотинной половине северной части – 1,69 м. Примерно половина южной части полностью заросла осоково-тростниковой болотной растительностью, как было отмечено глазомерно на карте (рис. 2.26). Незаросшая половина южной части имела глубины 0,6 – 0,7 м.



Рис. 2.26. «Роскошнянский пруд» на карте 1990 года и на космическом снимке (Google Earth, 2017), глубины пруда на 2003 г.)

Расчеты, выполненные на основании полученных данных, показали, что емкость пруда уменьшилась к 2003 году (примерно за 30 лет эксплуатации) до 260000 м³ и составила 34% от проектной, а 2/3 его объема заняты илистыми отложениями [68]. Таким образом, объем отложений составил 510000 м³.

Путем деления этого объема на площадь водосбора р. Ольховой (814 км²) и время заиления (30 лет) получаем модуль выноса ила, равный 0,021 мм/год. Такому количеству соответствует потеря почвы 0,21 м³/га·год. И это очень мало по сравнению со значением допустимого смыва (2-4 т/га в год), однако данный показатель не может быть достоверным по ряду причин. Во-первых, на притоках р. Ольховой имеются два водохранилища. Во-вторых, как было показано на примере балки Калмыцкий яр, большое количество почвы не доходит до речной долины, а оседает перед лесными полосами, прибалочными насаждениями, на склонах и днищах балок.

В 2012 году аспиранткой проф. Зубова А.Р. Гречишкиной Н.В. были выполнены повторные замеры глубин с лодки - уже с определением координат по GPS-навигатору MI0-550 [69]. Сравнение результатов измерения глубин в 2003 и 2012 гг. показало, что в пруду сохранились отдельные глубины до 2 м,

средняя глубина северной части была равна 1,50 м, т.е. практически не изменилась. Этот факт можно объяснять как различиями в методике измерений и их погрешностью, так и тем, что с 2003 года на водосборе пруда не наблюдалось активных эрозионных процессов.

Измерения глубин пруда повторились и в третий раз - через 5 лет, в июле 2017 г. студентом-гидрологом Д.А. Мельянцевым совместно с А.Р.Зубовым. Исследовалась приплотинная половина северной части пруда с резиновой лодки. Координаты точек замеров определялись планшетом Explay с GPS-датчиком, оснащенный программой Navitel. Глубины измерялись портативным эхолотом FISH FINDER и дублировались ручным лотом в виде мерной ленты с металлическим диском диаметром 7 см на конце. Средняя глубина исследуемой части оказалась равной 1,51 м, то есть практически не изменилась по сравнению с 2012 годом. Однако обращает на себя внимание тот факт, что глубин более 1,7 м не обнаружилось. А в 2012 году, как и в 2003-м, были и глубины около 2 м (рис. 2.20). Дно как бы стало ровнее, не повышаясь в целом [68].

2.8 Методы учета выносимой ветром почвы

Для учета ветровой эрозии используют пыле- и пескоуловители, фильтры, пьезоэлектрические и другие устройства. Принцип их работы заключается в измерении расхода потока почвенной фазы через площадку известного размера, расположенную перпендикулярно потоку. Имея значения расхода почвенной фазы для ряда таких площадок, охватывающих с той или иной полнотой все поперечное сечение взвешенного потока, можно методом интерполяции определить суммарный поток почвенной фазы через данный створ. Такой площадкой обычно служит приемное отверстие водо- или воздухозаборного устройства измерительного прибора. Измерения будут наиболее точны тогда, когда средняя продольная скорость потока в приемном отверстии прибора будет равна средней продольной скорости потока в данной точке при отсутствии прибора. Если скорость потока в приемном отверстии будет меньше ее, результаты измерений будут заниженными. Если скорость на входе в прибор будет больше средней скорости потока в этом месте в отсутствие прибора, то результат измерений будет завышенным.

Перемещение почвенных частиц при ветровой эрозии происходит тремя способами: частицы перекачиваются или скользят по поверхности почвы, перемещаются скачкообразно и передвигаются во взвешенном состоянии.

В соответствии с этими способами передвижения частиц разработаны и приборы для количественного учета сносимой ветром почвы.

Перенос почвенных частиц ветром подчиняется таким же закономерностям, что и перенос водным потоком, но масштабы процессов (и линейные, и временные) различны. Это создает ряд дополнительных трудностей при измерении потока почвенной фазы. Главная среди них — большая толщина потока, несущего почвенные частички: сплошной пылевой фронт во время пыльных бурь часто имеет толщину несколько сотен метров (рис. 2.27).



Рис. 2.27. Пыльная буря надвигается на военный лагерь Аль-Асад (Ирак).

Однако, согласно данным многих источников, основная масса почвы переносится в слое до 1 м. Это открывает возможности для измерения переноса почвы ветром с использованием простых и доступных методов.

Для учета перекатывающихся частиц наиболее распространен метод ловушек [32]. Ловушка-цилиндр представляет собой металлический или изготовленный из другого материала цилиндр, который устанавливают в почву так, чтобы края его располагались вровень с поверхностью почвы (рис. 2.28).

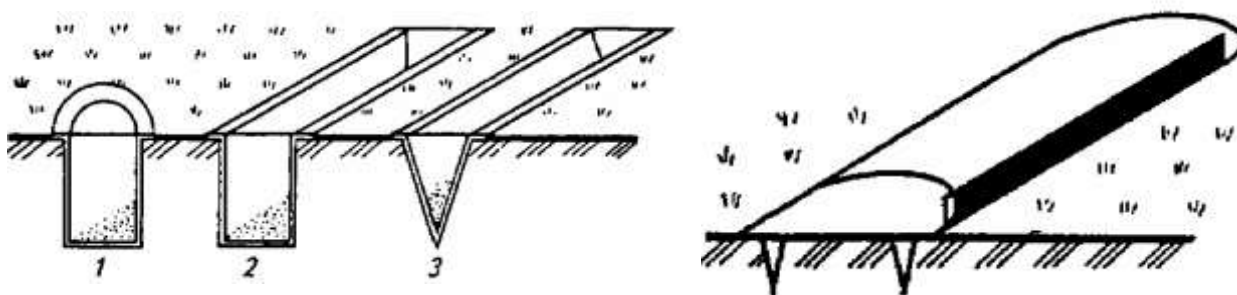


Рис. 2.28. Почвенные ловушки (слева) и метелемер А.К. Дюнина (справа)
1 – ловушка-цилиндр, 2,3 – ловушки-кюветы [32]

Ловушка-кювет — уловитель, выполненный в виде длинного ящика с прямоугольным или треугольным (вершиной вниз) поперечным сечением (рис. 2.22). Ловушку устанавливают краями вровень с поверхностью почвы в длинную канавку перпендикулярно направлению ветра. Почвенные частицы, передвигающиеся по поверхности почвы, попадают в ловушку и оседают в ней. После прекращения пыльной бури ловушку очищают от почвы и взвешивают почву. Зная площадь пылесбора и массу скопившейся в ловушке почвы, количество снесенной ветром почвы пересчитывают вначале на площадь пылесбора ловушки, а затем на 1 га, выражая ее в тоннах или кубических метрах.

Метелемер А.К. Дюнина. Предназначен для определения снегопереноса и используется при изучении ветровой эрозии почвы (см. рис. 2.28). Прибор изготовлен в виде аэродинамического крыла, в лобовой части которого

размещена приемная щель размером 20 x 100 мм. Внутри крыла имеется снегоборник (пылесборник). Прибор вдавливают в почву до совпадения нижнего края щели с поверхностью почвы и затем на определенное время открывают приемную щель.

Собравшуюся в пылесборнике почву взвешивают, пересчитывают на площадь приемной щели и на 1 га пашни с учетом продолжительности экспозиции прибора и длительности пыльной бури.

Авторы практикума [32] отмечают, что метод ловушек дает значительно заниженные результаты, так как большая часть почвы, перемещающейся скачкообразно и находящейся во взвешенном состоянии, не учитывается. Поэтому более точные результаты при изучении ветровой эрозии почвы получают с применением специальных приборов — пылеуловителей, которые позволяют улавливать частицы, передвигающиеся всеми тремя способами.

Пылеуловитель Бэгнольда. Прибор состоит из закрепленного на поверхности земли корпуса с приемной щелью для переносимых ветром частиц почвы шириной 10 мм и высотой 110 см, пылесборника и флюгарки [95].

Пылеуловитель активно использовался в изучении ветроэрозионных процессов на полях Донецкой противозэрозионной станции (Украина), что позволило впоследствии исследователям усовершенствовать его и разработать собственный прибор, который будет описан ниже.

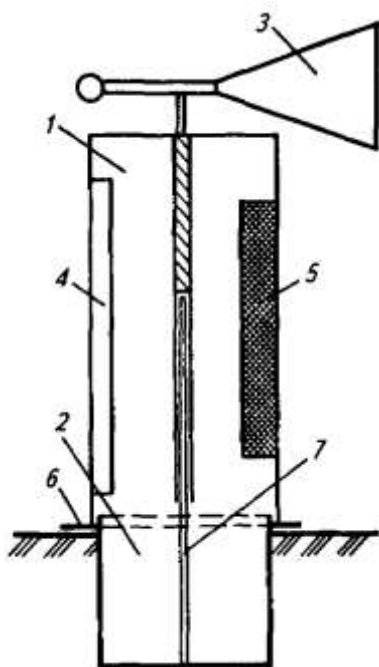
Пылеуловитель Бэгнольда крепится на вращающейся оси и снабжается флюгером, что обеспечивает оптимальное положение приемного отверстия относительно потока — плоскость приемного отверстия располагается перпендикулярно направлению ветра. Частицы почвы, попавшие в створ пылеуловителя, оседают в приемный сосуд, который расположен под приемной коробкой ниже уровня поверхности почвы. Часто входную щель пылеуловителя снабжают перегородками, что позволяет раздельно учитывать перенос почвы в разных слоях [95].

Недостатком пылеуловителей указанного типа согласно [95] является то, что они не пропускают воздушный поток сквозь себя. Это приводит к тому, что значительная доля частиц, особенно мелких, минует пылеуловитель. Поэтому пылеуловители такого типа приходится тарировать. Существует и другая разновидность пылеуловителей, отличающаяся от описанной выше тем, что в тыльной части накопительной емкости имеется выходное отверстие. Запыленный поток, попадая в накопительную емкость через приемное отверстие, освобождается там от пыли и выходит очищенным через отверстие в ее тыльной части. Простейшим примером устройства такого рода служит стеклянная колба с резиновой пробкой, в которую вставлены две Г-образные стеклянные трубки. Колба крепится к штанге на фиксированной высоте от поверхности почвы так, чтобы конец одной из стеклянных трубок был открыт навстречу потоку. Почвенные частички, попавшие в створ отверстия этой трубки, скатываются в колбу [95].

Скорость потока в приемном отверстии пылеуловителей такой конструкции будет, конечно, отличаться от нуля, но она будет отличаться и от скорости в

свободном потоке. Для большей эффективности пылеуловителя необходимо, чтобы, во-первых, скорость потока во входной его части была равна скорости потока в его отсутствие в данной точке и, во-вторых, поток, попавший в уловитель, полностью очищался от почвенной фазы. Таким требованиям удовлетворяют приборы с принудительным забором воздуха наподобие бытовых пылесосов. Но они не выпускаются промышленностью. Приборы с принудительным забором воздуха снабжаются датчиками для измерения скорости потока в носике заборного отверстия и в свободном потоке на такой же высоте от поверхности, на которую установлено измерительное устройство. Датчики позволяют добиваться равенства скоростей в заборном отверстии и в свободном потоке.

Пылеуловитель И. В. Годунова [32]. Прибор состоит из вращающегося металлического цилиндра-пылеуловителя 1, неподвижного пылесборника 2 и флюгарки 3 (рис. 2.29).



С одной стороны пылеуловителя находится приемная щель 4 размером 30 x 150 мм, а с другой (противоположной приемной щели) — выходное окно 80 x 130 мм, закрытое мелкой металлической сеткой 5. Пылесборник имеет сверху опорную пластинку 6, а в центре — стержень 7, на который надевается трубчатая ось пылеуловителя.

Прибор устанавливают в выкопанное в почве углубление так, чтобы опорная пластинка пылесборника соприкасалась с поверхностью почвы. После прекращения пыльной бури или через определенный промежуток времени (например, один или несколько раз в сутки) пылесборник очищают от собравшейся в нем почвы, взвешивают ее и пересчитывают сначала на площадь пылеприемной щели, а затем на 1 га, выражая количество снесенной почвы (т или м³) за весь период пыльной бури или за определенный промежуток времени (часы, сутки и т.д.).

Рис. 2.29. Пылеуловитель Годунова [32].

Однокамерный пылеуловитель А. Н. Знаменского [32]. Представляет собой горизонтально расположенную трубу 1 переменного сечения с перегородками 2 в рабочей ее части с приемным отверстием 3 диаметром 35 мм и выходным отверстием 4 (рис. 2.30). Размер выходного отверстия регулируют в зависимости от скорости ветра: чем она больше, тем больше должно быть и отверстие пылеуловителя.

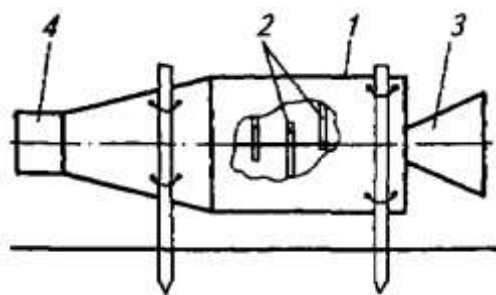


Рис. 2.30. Пылеуловитель Знаменского [32].

Работу ведут следующим образом. Прибор с помощью колышков и кронштейнов устанавливают на поверхности почвы так, чтобы расстояние от горизонтальной оси прибора до поверхности почвы было 10 см, ориентируя прибор приемным отверстием на ветер.

Приборы размещают в нескольких точках на делянке и работают одновременно на всех вариантах опыта в течение 0,5-1 или 3-4 ч в зависимости от скорости ветра.

Затем пылесборник очищают от почвы, взвешивают ее и производят соответствующие пересчеты.

Пылепескоуловитель УПЗ-50 [32]. Предназначен для улавливания почвенных частиц, движущихся в слое воздуха толщиной 50 см (рис. 2.31).

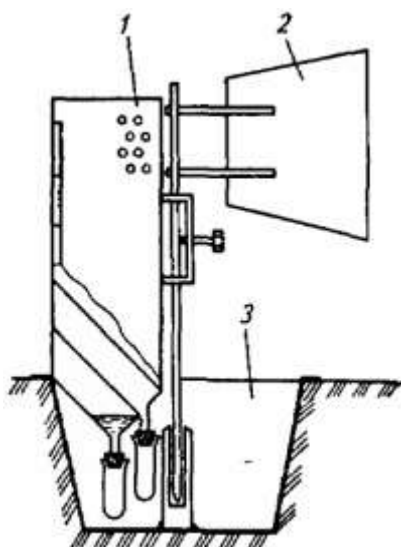


Рис. 2.31. Пылепескоуловитель УПЗ-50 [32]

Прибор состоит из корпуса пылеуловителя 1, флюгарки 2, резервуара 3, вращающегося штатива с трубчатой осью и стержнем. В верхней части пылеуловителя расположены эжекторные отверстия. Пылеуловитель выполнен в виде щели размером 1 x 50 см, разделенной на пять равных частей, переходящих в пять прямоугольных каналов. К каждой части пылеуловителя подходят отражательные пластинки, изменяющие направление движения частиц.

Частицы почвы собираются отдельно по каждой секции в мешочки или пробирки.

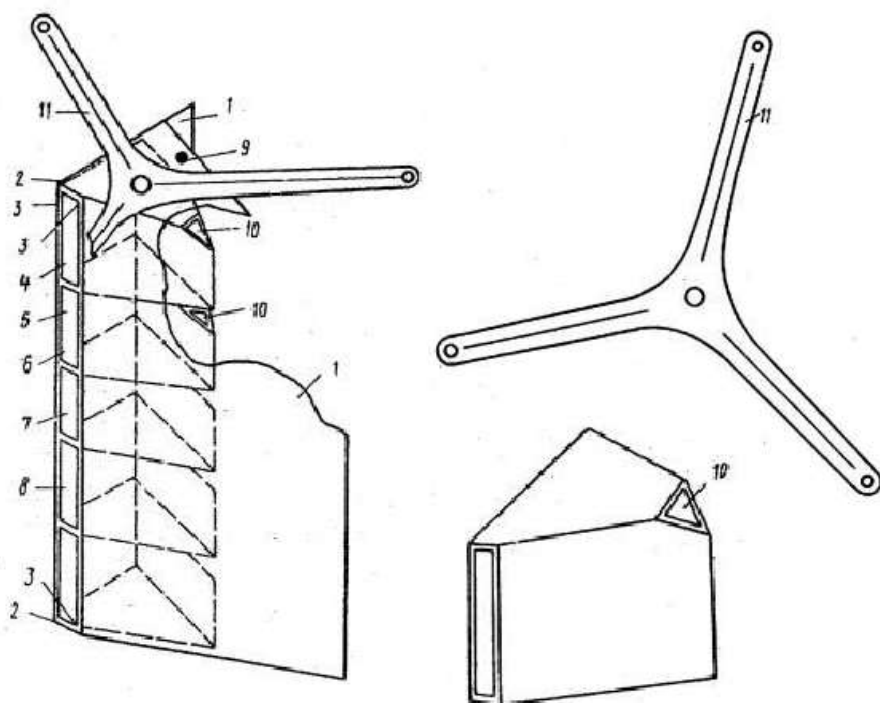
Методика и техника работы с этим прибором мало отличаются от работы с прибором И. В. Годунова. Разница заключается в том, что улавливание и учет почвенных частиц происходят послойно через каждые 10 см.

Стержневой метод (метод реперов) [32]. Разработан А. Н. Киселевым на кафедре земледелия и методики опытного дела МСХА. Он применим для учета сноса и наноса почвы в опытах, не требующих точных сравнений.

Сущность метода заключается в следующем. На учетных площадках вколачивают в почву металлические стержни с делениями через 1 мм. Заметив глубину, до которой был забит стержень, после прекращения ветровой эрозии измеряют толщину снесенной или нанесенной почвы.

Зная слой снесенной (или нанесенной) с единицы площади почвы и ее плотность, легко пересчитать снос (нанос) в тоннах или кубометрах с 1 га.

Полевой эрозиомер. Разработан А.Г. Зузой, В.И. Щербаковым и В.М. Столяр на Донецкой противоэрозионной опытной станции ННЦ «Институт почвоведения и агрохимии им. А.Н. Соколовского, защищен авторским свидетельством СССР № 855498 (61) от 15.08.1981 г. (рис. 2.32).



Эрозиомер состоит из двух боковых стенок 1, приемника 2, имеющего входное отверстие 3 шириной 1 см. Приемник 2 состоит из пяти отдельных секций 4-8 высотой 10 см каждая, которые фиксируются при помощи штыря 9, и свободно устанавливаются друг на друга между боковыми стенками 1, служащими одновременно и флюгаркой.

Рис. 2.32. Полевой эрозиомер А.Г. Зузы и соавт.

Секции 4-8 приемника 2 имеют выход 10 площадью 5 см^2 для очищенного воздуха в верхнем углу каждой секции. Установка устройства на местности производится при помощи фигурной планки 11, к которой прикрепляют три оттяжки, закрепленные в почве удерживающими колами.

Устройство работает следующим образом. При наличии ветроэрозионных процессов воздух вместе с почвенными частицами попадает в входное отверстие 3 в секциях 4-8 пылеуловителей, где скорость воздушного потока в камере гасится за счет резкого расширения камеры и наличия торцевой стенки. Почвенные частицы откладываются на дно каждой приемной камеры, а очищенный воздух выходит через выходное отверстие 10 в верхнем углу каждой секции. Для учета уловленных частиц вынимается штырь 9, и секции поочередно вынимаются, из каждой секции в отдельности взвешивается уловленный материал, затем суммируется и дается вывод об общем выносе почвенных частиц и о дифференциации их выноса по высоте через каждые 10 см.

Существуют и продолжают разрабатываться также принципиально иные измерительные приборы. Так, при регистрации и отслеживании пыли, поднятой в воздух во время обработки почвы или в результате эрозии, стали применять лидары, солнечные фотометры, счетчики фотонов; при изучении переноса почвы ветром в приземном слое — пьезо- и мембранные датчики с высокой

собственной частотой измерения, изокинетические пылеуловители, при физическом моделировании ветровой эрозии — усовершенствованные полевые и лабораторные аэродинамические установки.

Одновременно с развитием экспериментальных методов изучения ветровой эрозии совершенствуются системы дистанционного зондирования [98].

Метод биоловушек. Разработан В.И. Тарасовым [188] в результате многолетнего мониторинга эоловых процессов, проводимого им с сотрудниками лаборатории защиты почв от эрозии ЛИАПП на землях государственного с.-х. предприятия «Ударник» Лутугинского района Луганской области с различными системами полезащитных и стокорегулирующих лесных полос различной рядности и конструкций.

Метод основан на способности лесных полос снижать скорость ветра на своей наветренной и заветренной сторонах. Наибольшее снижение скорости ветра за лесными полосами продуваемой конструкции происходит на расстоянии около 5H за ними, в лесных полосах плотной конструкции минимум скорости наблюдается на их нижней опушке (в плотных лесополосах почти до нуля).

Снижая скорость ветра в приземном слое, лесные полосы фактически являются биологическими ловушками для почвенных частиц, вынесенных ветром с примыкающей пылесборной площади. Для определения вынесенного за год мелкозема осенью делается отбор образцов лесной подстилки. Ее отмывают с целью отделения твердого осадка, который после высушивания взвешивается.

По массе мелкозема, отложившегося на единице площади лесной полосы m' (г/м²) вычисляется масса мелкозема, вынесенного с единицы площади пылесборной (подвергшейся дефляции) поверхности поля m , т/га.

В нашей трактовке это можно сделать по формуле: $m = 0,01m'(b/B)$, т/га, где b (м) - ширина лесной полосы; B (м) - ширина поля; 0,01 – коэффициент перехода от граммов к тоннам и от м² к га.

В результате сбора и обработки большого статистического материала В.И. Тарасовым были выявлены факторы, влияющие на величину годовой дефляции M (т/га), и получена ее математическая модель (коэффициент множественной корреляции модели $R = 0,82 \pm 0,03$):

$$M = 0,019 \cdot 1,21^n (1 + 5,39/P) (0,34 + 2,19/d) (1,15 - 0,019W) (0,88 - 0,118k + 0,078k^2),$$

где n – количество дней со скоростью дефляционно-опасных ветров выше 15 м/с;

P – защищенность угодий лесными полосами, %;

d – эквивалентный диаметр почвенных агрегатов, мм;

W – средний декадный слой жидких осадков за декады с дефляционно-опасным ветром, мм;

k – коэффициент устойчивости угодий к эоловым процессам: для естественных кормовых угодий он равен 0,7; многолетних трав – 1,1; озимых зерновых 2,1; пропашных и черного пара 3,3.

Защищенность угодий определяется по формуле Коптева [93] как процентное отношение площади части поля, находящейся в зоне защитного

действия лесных полос к общей площади поля. Эквивалентный диаметр определяется по результатам сухого рассева образцов, отобранных с поверхности почвы.

Достоинством метода является его простота и возможность охвата большой площади с малыми затратами труда.

Исследования В.И. Тарасова [188] показали, что даже при видимом отсутствии потерь почвы они имеют место и превышают допустимый уровень 0,5 т/га. Результаты позволили автору сделать вывод, что достаточно иметь защищенность 50%, чтобы свести выдувание мелкозема на уровень ниже допустимого, который не должен превышать 0,5 т/га в год.

Метод был использован при обследовании состояния лесных насаждений и гидротехнических сооружений (в котором принял участие и Зубов А.Р.) в бывшем колхозе им. Кирова, где в 1988 г. была внедрена контурно-мелиоративная организация территории. А в 2001 году для хозяйства при участии В.И. Тарасова и А.Р. Зубова был разработан пионерный для области проект распаева земель на основе эрозионно-безопасной эколого-ландшафтной системы земледелия.

2.10 Оценка интенсивности эрозионных процессов на водосборах по речному стоку взвешенных наносов

К методам изучения водной эрозии можно отнести также исследования, связанные с попыткой связать интенсивность эрозионного процесса с жидким и твердым стоком рек. Как указывает М.Н. Заславский [53], для характеристики современного проявления эрозии часто используют данные месячного, сезонного и годового твердого стока в речной сети. В этих целях используют *модуль эрозии (модуль стока взвешенных наносов)*, который выражается в тоннах твердого стока, отнесенного к 1 км² водосборной площади.

Однако, хотя данные модуля эрозии в определенной мере позволяют судить об интенсивности современного проявления эрозии на водосборном бассейне реки, они далеко не полно отражают действительное проявление эрозии, так как часть смытой почвы не достигает реки (как было показано выше, она в виде наносов откладывается у подножий склонов, по дну балок, в прудах, в оросительной и дренажной сети и т.д.), а часть продуктов эрозии, поступающая в речную сеть, быстро осаждается в виде русловых наносов.

Как отмечает автор [53], в районах, где в результате интенсивной овражной эрозии в речную сеть поступает из устьевой части оврагов щебень и крупный песок, быстро переходящие в донные наносы, показатели модуля эрозии могут быть в десятки раз меньше действительной величины проявления эрозии на водосборе. Если твердый сток определяется в устье реки, то следует учитывать и ту почву, которая в виде наносов задержалась в водохранилищах, расположенных выше по реке, а также в оросительной сети, если проводился забор воды для орошения. Часть продуктов эрозии также могла в виде наносов отложиться на пойменных землях в период половодий.

Следовательно, как отмечается в [53], данные модуля эрозии далеко не

тождественны интенсивности смыва и размыва почвы. Так, исследованиями И. П. Ковальчука (1981) в Западном Подолье установлено, что примерно 20—27% продуктов смыва переотлагается в пределах склона, 13-34 — в притальвежной части первичного водосбора и лишь 34—64% попадает в русла временных потоков.

Исследования И. В. Старостиной (1972), проведенные на реках бассейна р. Оки, позволили установить, что около 60% смываемой почвы откладывается в нижних частях склонов, 20 — в логах, балках, ручьях, 10% — в малых реках а только незначительная часть доходит до средних и больших рек. Как отмечает Р. С. Чалов (1979), в русла рек поступает от 3 до 20% смытой со склонов почвы.

Вместе с тем следует иметь в виду, что в формировании твердого стока в речной сети участвует не только эрозия почв, но и другие почворазрушающие процессы, проявляющиеся на водосборном бассейне — осыпи, обвалы, боковая речная эрозия, сели, дефляция и т. д. Поэтому, как отмечает автор [53], следует очень осторожно использовать данные твердого стока для оценки интенсивности современного проявления эрозии на водосборном бассейне речной сети.

При пользовании данными среднего модуля эрозии следует также иметь в виду, что эрозия почв на площади бассейнов рек проявляется неравномерно. Наиболее интенсивно она развивается на обрабатываемых склоновых землях. Как отмечает М.Н.Заславский [53], пахотные земли на территории бывшего СССР занимают 10%. Если принять, что 4/5 пашни находятся на склонах разной крутизны, то наиболее активно эрозия почв проявляется только на 8% площади страны. Поэтому данные о модуле эрозии, вычисленном в среднем по всем водосборным бассейнам разных систем страны, весьма условно характеризуют действительную картину интенсивности проявления эрозии со среднего квадратного километра, так как на одних водосборных бассейнах площади обрабатываемых земель занимают 60—80%, а в других — только 1—2. На одних водосборных бассейнах природные условия и хозяйственное использование земель обуславливают весьма интенсивное проявление эрозии; а на других ускоренная эрозия почв не наблюдается [53].

Ответ на поставленный вопрос дают и наши исследования на реке Лугань в период весьма значительного весеннего половодья 2003 г. [68].

Измерения проводились в районе 1-й проходной Луганского тепловозостроительного завода «им. Октябрьской революции». Путем замеров с моста предварительно был получен поперечный профиль дна реки и поймы. В период с 14.03. по 24.04.2003 г. было организовано ежесуточное дежурство студентов. Они измеряли глубину и скорость течения в пяти точках по ширине потока методом запуска поплавков, отбирали пробы воды на мутность. По значениям ширины реки, средней глубины и скорости рассчитывали площадь живого сечения реки (ω , м²) и среднесуточный расход воды (Q_i , м³/с).

Зная площадь водосбора реки F , равную 3510 км², рассчитывали суточный слой стока (h_i , мм) по формуле:

$$h_i = (86400 \cdot Q_i) / (1000 \cdot F),$$

где 86400 – количество секунд в сутках; 1000 – коэффициент перевода м в мм.

Значения расхода реки и слоя стока с ее водосбора без срезки грунтового питания, а также средняя и максимальная температуры для каждого дня наблюдений ($T_{\text{ср}}$ и $T_{\text{макс}}$) представлены в табл. 2.5 и на рис. 2.33.

Таблица 2.5

Суточные значения слоя стока с водосбора р. Лугань, средней и максимальной температуры воздуха за период половодья 2003 г.

№ пп	Дата	Q, м³/с	h, мм	$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	№ пп	Дата	Q, м³/с	h, мм	$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$
0	14.03	12,32	0,29	0,5	2,1	21	04.04	52,67	1,24	4,8	10,6
1	15.03	23,36	0,55	-0,9	1,6	22	05.04	50,55	1,19	5	10,4
2	16.03	26,34	0,62	-0,6	2	23	06.04	46,72	1,1	5,6	10,1
3	17.03	28,46	0,67	-0,2	2,7	24	07.04	44,60	1,05	6	11,1
4	18.03	31,01	0,73	0,3	3,4	25	08.04	42,05	0,99	6,7	12
5	19.03	37,80	0,89	0,6	3,8	26	09.04	40,35	0,95	7,4	13,1
6	20.03	45,88	1,08	0,7	4,4	27	10.04	38,23	0,9	7,8	14
7	21.03	44,18	1,04	-0,4	3,1	28	11.04	35,68	0,84	8,7	15
8	22.03	42,48	1	-2,2	1,1	29	12.04	33,56	0,79	9,6	16
9	23.03	40,78	0,96	-3,9	-0,3	30	13.04	31,43	0,74	10,2	17
10	24.03	38,23	0,9	-3	0,3	31	14.04	29,31	0,69	10,8	18
11	25.03	36,53	0,86	-1,7	1	32	15.04	27,19	0,64	11,5	19,6
12	26.03	33,98	0,8	-0,4	1,9	33	16.04	26,34	0,62	10,1	17
13	27.03	39,08	0,92	0,8	3	34	17.04	25,49	0,6	9,3	15,8
14	28.03	42,05	0,99	1,6	4	35	18.04	24,47	0,576	7,9	13,6
15	29.03	45,03	1,06	2,5	7,6	36	19.04	23,36	0,55	8,5	14
16	30.03	48,00	1,13	3,5	10,3	37	20.04	22,09	0,52	9,4	14,5
17	31.03	50,97	1,2	4,6	12,7	38	21.04	20,81	0,49	10	15
18	01.04	61,59	1,45	4,1	11,5	39	22.04	19,54	0,46	10,9	15,6
19	02.04	57,77	1,36	4,4	11,3	40	23.04	18,69	0,44	11,1	16,1
20	03.04	54,37	1,28	4,7	10,8	41	24.04	17,84	0,42	11,3	16,5

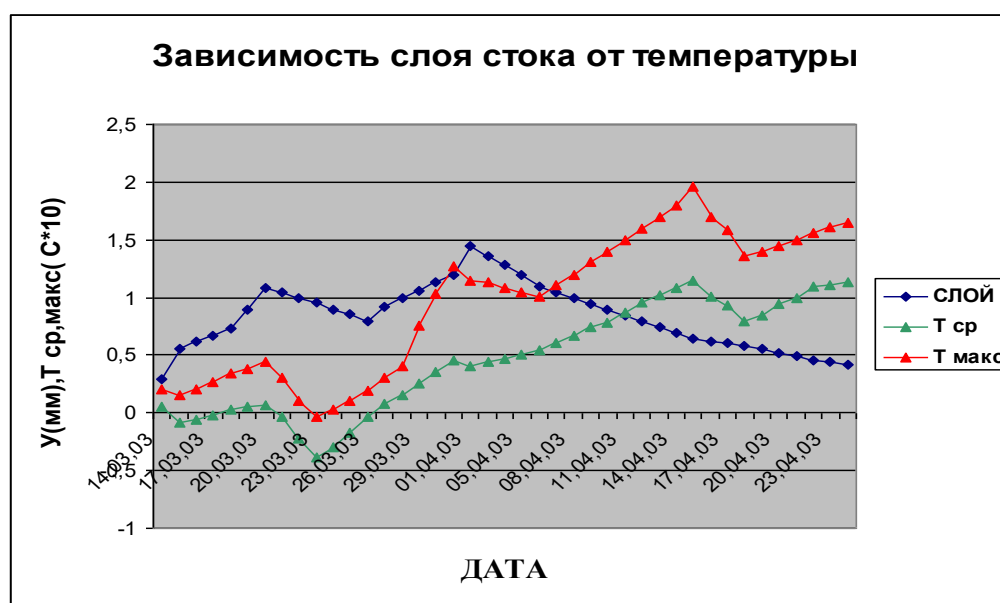


Рис. 2.33. Динамика суточного слоя стока, средних и максимальных суточных температур (умноженных в 10 раз) за половодье 2003 г.

Чтобы получить слои и расходы, обусловленные чисто поверхностным стоком, следует вычесть из них грунтовое питание, равное расходу и слою стока на 14.03.2003 г., когда поверхностного стока на водосборе, по нашим наблюдениям, еще не было, т.е. 12,32 м³/с и 0,29 мм соответственно.

Как следует из табл. 2.6, суммарный слой поверхностного стока за половодье с 15 марта по 24 апреля со срезкой грунтового питания составил 21,5 мм. Наблюдения за стоком на водосборе пруда в балке Калмыцкий яр площадью 330 га, описанные в разделе 3.2, дали втрое большие значения стока – 71 мм, что объясняется разновременностью прихода к исследуемому створу реки объемов воды с различных участков ее водосбора, различиями стокоформирующей способности этих участков, зарегулированностью стока водохранилищами и прудами. Известно, что сток р. Лугань значительно зарегулирован двумя водохранилищами: Углегорским (162 млн м³) и Мироновским (20,5 млн м³), расположенными на территории Донецкой области. Эти и другие факторы вместе взятые и обуславливают отмеченное явление снижения модуля стока в замыкающем створе реки, называемое *редукцией* стока.

Существенно различаются и максимальные суточные слои стока. На водосборе пруда 29-30 марта (на 15-16 дни стока, см. рис. 3.31) они равнялись 13,5 мм. Однако растянутость таяния снега во времени способствовала тому, что максимальный суточный слой стока с водосбора Лугани, имевший место 1.04, не превышал 1,45 мм, т.е. был в 9,3 раза меньшим отмеченного на малом водосборе, и тем не менее подъем уровня рек Лугани и Ольховой был значительным, вызвав большую тревогу населения Каменнобродского района города Луганска.

Из графика на рис. 2.33 следует, что с увеличением температуры вполне закономерно увеличивается слой стока и наоборот, с уменьшением температуры он уменьшается. Сравнение графиков слоя стока и хода температуры показало, что существует отставание колебаний стока от колебаний температуры до 3 суток. В гидрологии подобные временные интервалы называют *временем добега*ния. Пик половодья наступил на одни сутки позже соответствующего максимума температуры. Начавшееся затем снижение стока связано было вначале со снижением температуры, а затем с истощением запасов снеговой влаги на водосборе реки.

Наиболее тесной оказалась зависимость слоя стока от максимальной температуры в интервале времени до начала спада стока. Проверялись различные варианты сдвига значений слоя стока назад во времени – на 1, 2 и 3 суток. Наиболее тесной зависимость оказалась при сдвиге в 2 суток. Именно она и ее график показаны на рис. 2.34. Уравнение зависимости суточного слоя стока Y , мм от температуры $T_{\text{макс}}$, °С с учетом временного сдвига имеет вид:

$$Y = 0,79 + 0,054T_{\text{макс}}.$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0.703$, т.е. коэффициент корреляции довольно высок и равен $r = 0,84$, что характеризует связь факторов, согласно [74], как сильную.

Преимуществом использования максимальной температуры является то, что она определяется одним измерением и не требует круглосуточных

наблюдений как среднесуточная.

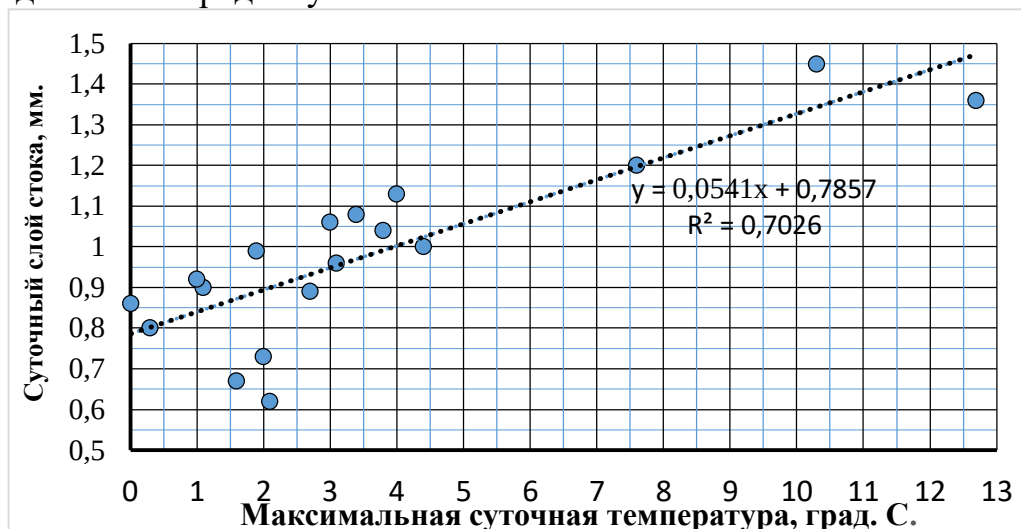


Рис. 2.34. Зависимость суточного слоя стока от максимальной суточной температуры воздуха

Практическое значение проведенных исследований заключается в том, что на основании изменения температуры воздуха можно делать прогноз изменения расхода воды в реке, а значит и ее уровня, который, с учетом запаздывания, наступит через 1-3 дня. То есть в случае неожиданно резкого повышения максимальной суточной температуры появляется возможность за 1 - 3 дня прогнозировать резкое повышение уровня воды и принять экстренные меры по предотвращению катастрофических последствий наводнения (таких как в 1985 году), например: произвести своевременную эвакуацию населения из зоны затопления, защитить ценные объекты, нарастить прирусловые дамбы и т. д.

Как было установлено, средневзвешенная мутность стока реки за период половодья составила $0,37 \text{ кг/м}^3$, максимум ее, равный $0,65 \text{ кг/м}^3$, отмечен 31.03-1.04. при максимальных расходах реки, равных $60,0$ и $61,6 \text{ м}^3/\text{с}$ и скоростях потока $0,92$ и $1,0 \text{ м/с}$. Объем стока половодья составил $122,58 \text{ млн м}^3$. Умножая этот объем на мутность воды, пересчитанную в т/м^3 , получаем массу твердого стока (стока наносов), равную 45354 т . Максимальный расход твердого стока равен произведению максимального расхода на мутность и составляет $40,0 \text{ кг/с}$.

Если массу наносов разделить на водосборную площадь реки, равную 3670 км^2 , можно получить модуль стока взвешенных наносов. Он равен 12358 кг/км^2 или 124 кг/га , что никак не говорит, что на водосборе реки происходили существенные эрозионные процессы, хотя они в этом многоводном году были весьма значительными.

РАЗДЕЛ 3

АКТИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ПРИРОДЕ

К этой группе отнесены методы наблюдения и измерения, использование которых предполагает активное вмешательство исследователя в целях создания искусственных условий, благоприятных для хода процесса в природе или для его видоизменения.

Основным методом этой группы является измерение твердого и жидкого стока на стоковых площадках (водно-балансовых, эрозионно-гидрологических) и малых (обычно ложбинных) водосборах.

3.1 Изучение эрозии на стоковых площадках и малых водосборных бассейнах

Метод стоковых площадок вошел в практику исследований с конца XIX - начала XX вв., но наиболее широко стал применяться, начиная с 30-40-х годов XX вв. [39]. Стоковой площадкой называют изолированный от окружающей местности участок склона, оборудованный устройствами для учета стекающей с его поверхности воды и влекомой ею почвы (рис. 3.1).

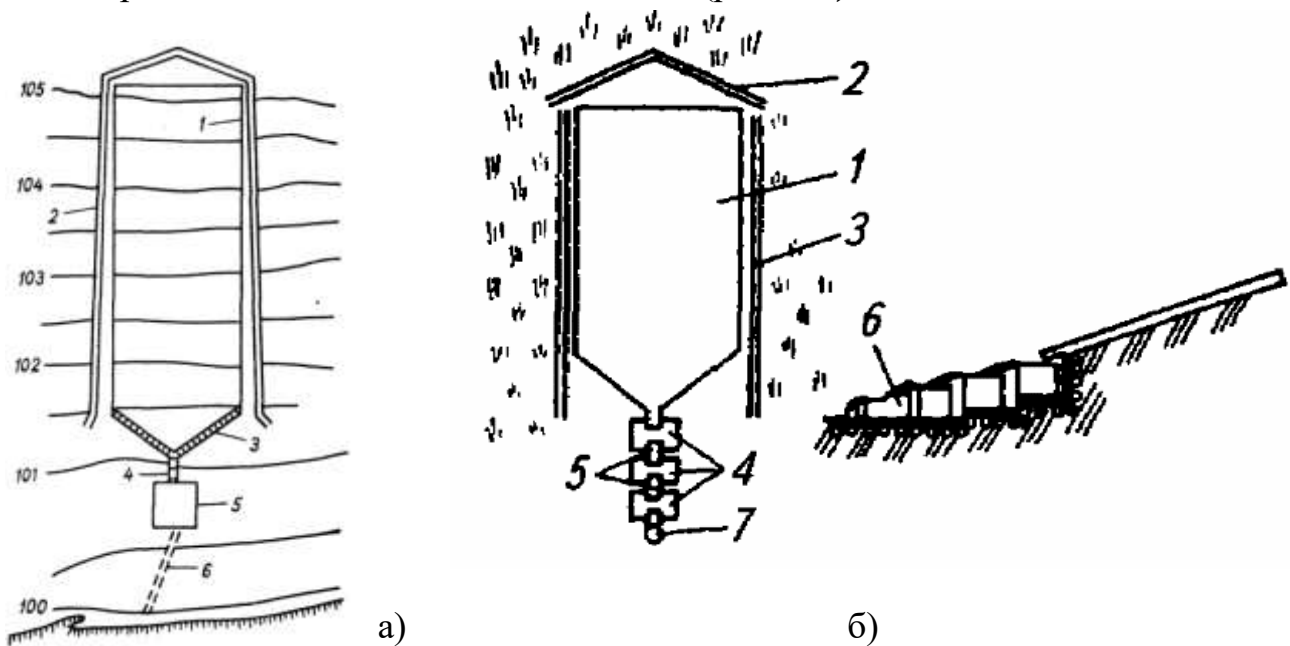


Рис. 3.1. План стоковой площадки с различными вариантами стокоприемного оборудования: а) 1 — бортик площадки; 2 - водоотводящие канавы; 3 - водоприемный лоток; 4 - водоподводящий лоток; 5 - измерительный павильон; 6 — канализационная труба [116]; б) 1 – стоковая площадка; 2 – ловчие канавы; 3 – заградительные каналы; 4 – отстойники; 5 – водосливы; 6 – делитель стока; 7 – водосборная емкость [53].

Устройство стоковых площадок. Согласно методическим рекомендациям [116] участки для оборудования стоковых площадок, должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) типичность по отношению к склонам экспериментального водосбора;

- 2) наличие необходимых почвенно-растительных, агротехнических и других условий, обеспечивающих решение поставленной задачи;
- 3) отсутствие резких переломов рельефа и препятствий (канав, бугров, западин и пр.), искажающих формирование стока на исследуемом склоне;
- 4) отсутствие выхода подземных вод на дневную поверхность;
- 5) возможность отвода воды от измерительных устройств.

В зависимости от протяженности склонов и цели опыта рекомендуются площадки следующих размеров (в метрах): 50 х 400, 50 х 300; 50 х 200; 40 х 200; 40 х 150; 30 х 200; 30 х 150; 30 х 100; 30 х 50 м.

Стоковые площадки могут быть постоянными и временными, убираемыми на период обработки почвы и уборки урожая. По контуру стоковая площадка ограждается бортиками, кроме нижней стороны, по всей длине которой оборудуется водоприемный лоток с козырьком, обеспечивающий поступление воды в измерительное устройство.

Бортики постоянных стоковых площадок делаются бетонными, металлическими, деревянными или земляными.

Для ограждения временной стоковой площадки по ее периметру устраивают валик из почвы высотой 25-30 см путем напахивания с помощью навесного плуга, с которого сняты все корпуса, кроме второго. Гусеничный трактор с плугом движется по размеченному периметру будущей стоковой площадки так, чтобы пласт, отделяемый плугом, отваливался в сторону площадки. Валик получают в результате двух проходов трактора в одном направлении. При втором проходе трактор правой гусеницей уплотняет валик, образовавшийся во время первого прохода. После этого валик осматривают и поправляют вручную.

Вал получается более высоким, если отвал корпуса удлинить навариванием на него с тыльной стороны второго отвала или специальных полосок.

На небольших участках склона бортики временных стоковых площадок удобно делать разборными деревянными, металлическими или из пленки на брусчатой основе. Их легко демонтировать на период механизированной обработки склона. Бортики заглубляются в почву на глубину пахотного слоя (20 - 30 см) и возвышаются над поверхностью почвы на 20—25 см. Для придания устойчивости бортики крепятся гвоздями к забиваемым с внешней стороны кольям сечением около 25 см² и длиной 60—80 см, отстоящим друг от друга на расстояние 3 м. Для того, чтобы в водоприемные лотки не попадала вода с соседних участков, боковые бортики, ограждающие площадку, должны быть продолжены по склону на 0,5 м ниже водоприемных лотков.

С внешней стороны верхнего оградительного вала, а иногда и боковых валов, как показано на рис. 3.1, делают борозды для отвода воды, движущейся в сторону стоковой площадки с вышележащей территории. Недопустимо образование борозды вдоль продольных валиков внутри площадки, т. к. она концентрирует и усиливает поверхностный сток, а при испытании таких приемов обработки почвы, как зябь поперек склона, гребнистая вспашка и т. д., искусственно снижает их эффективность.

С внутренней стороны нижнего вала устраивают водоприемную борозду, в

которую укладываются (под некоторым углом в сторону места определения стока) продольно распиленные асбоцементные трубы, служащие водоприемным лотком. Назначение лотка — принять воду, стекающую со стоковой площадки, и направить ее в измерительный павильон.

Для контакта желоба с почвой площадки на внутреннюю сторону трубы накладывается лента рубероида, толя или полимерной пленки с заделкой второго ее края в почву (рис. 3.2). Стыковые места желоба тщательно заливают гудроном. Лента рубероида прикрепляется к желобу расплавленным гудроном. В отдельных случаях допускается крепление нижней борозды полиэтиленовой пленкой или рубероидом.

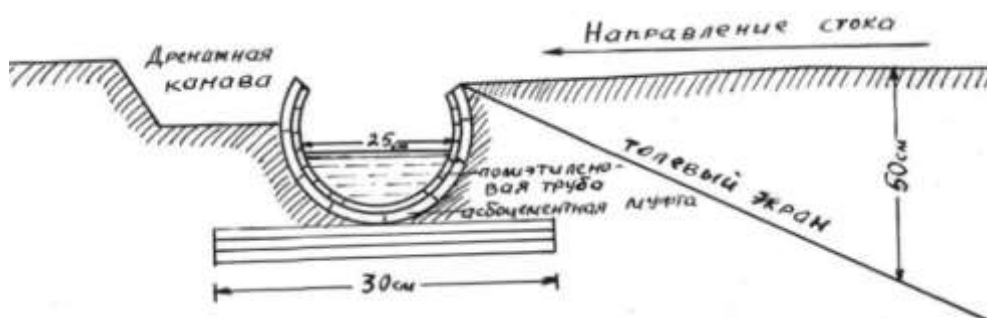


Рис. 3.2.
Водоприемное устройство стоковой площадки в разрезе [88]

На постоянных площадках водоприемный лоток может быть изготовлен из армированного бетона (рис. 3.3), металлических швеллерных балок или просмоленных и прошпаклеванных в стыках досок, обитых с внутренней стороны кровельным железом.

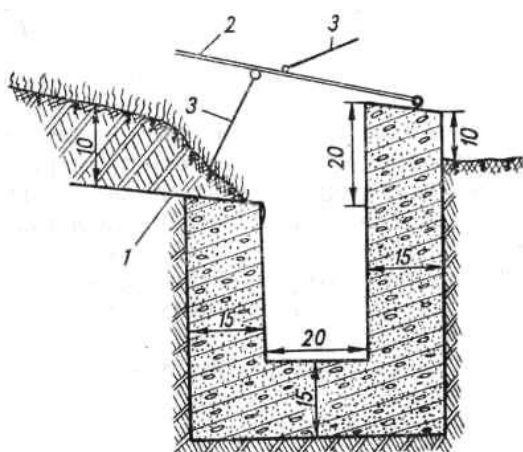


Рис. 3.3 [116]. Поперечный разрез бетонного водоприемного лотка стоковой площадки: 1 — металлический подрезной лист, 2 — металлический козырек, 3 — сошки

Форма поперечного сечения лотка делается, как правило, прямоугольной. Металлические лотки желательно устанавливать на бетонной основе.

Толщина дна и стенок железобетонных лотков должна быть не менее 15 см, деревянных 5 см. Верхняя грань внутренней стенки лотка заглубляется на 10 см ниже поверхности почвы, она имеет скос в сторону лотка и прикрывается сверху слоем грунта.

Во избежание утечки воды в месте сопряжения стенки лотка с грунтом площадки укладывается металлический лист (экран), врезанный одним краем в грунт (под дерн) на 30—50 см и опирающийся другим краем на срез внутренней стенки лотка.

При рыхлых грунтах для предотвращения размыва и сползания грунта, покрывающего стенку лотка, производится подмазка его глиной, одерновка и

крепление металлической сеткой с крупными ячейками. Внешняя стенка делается на 20 см выше внутренней, верхняя грань ее должна быть скошена в сторону от площадки и возвышаться над поверхностью земли на 10 см.

Подвод воды из водоприемных лотков в измерительное устройство осуществляется по водоподводящему лотку (каналу), площадь сечения которого должна обеспечивать пропуск максимального расчетного расхода со всей площадки. Уклон водоприемного и водоподводящего лотков задается максимально возможным по условиям местности, при этом измерительное устройство заглубляется в землю с таким расчетом, чтобы обеспечить необходимый уклон водосбросной канализации.

Ширина лотков делается не менее 20 см, высота стенок водоподводящего лотка и примыкающей к нему нижней части водоприемного лотка рассчитывается на пропуск стока 1%-ной обеспеченности.

Сечение лотка сбросной канализации (рис. 3.2, 3.3) должно обеспечивать отвод всей воды, поступающей в измерительное устройство.

Кроме учета стока талых и ливневых вод на стоковых площадках ведутся наблюдения за метеоэлементами – осадками, температурой и влажностью воздуха, испарением с поверхности снега и почвы, ее влажностью, промерзанием и т. д. Вместе с изучением общих закономерностей стока и смыва почвы на стоковых площадках изучают влияние на них почвозащитных агротехнологий, леса, различных агрофонов и т.д. [116].

Особое место в противозрозионной лесомелиорации (ПЭЛМ) получили комбинированные стоковые площадки. Они включают сочетание нескольких фонов (угодий): пашня – лес (рис. 3.4), пашня - луг и т.п., - и различаются размерами (обычно большими, чем для элементарных площадок) и отдельным (помимо интегрированного) учетом стока и наносов по границам угодий [39, 97]. При изучении стока на комбинированных площадках (на полевой части, лугу, в лесополосе и т. д.) ограждение обрабатываемой части площадок остается постоянным, а на полевой части ежегодно восстанавливается.

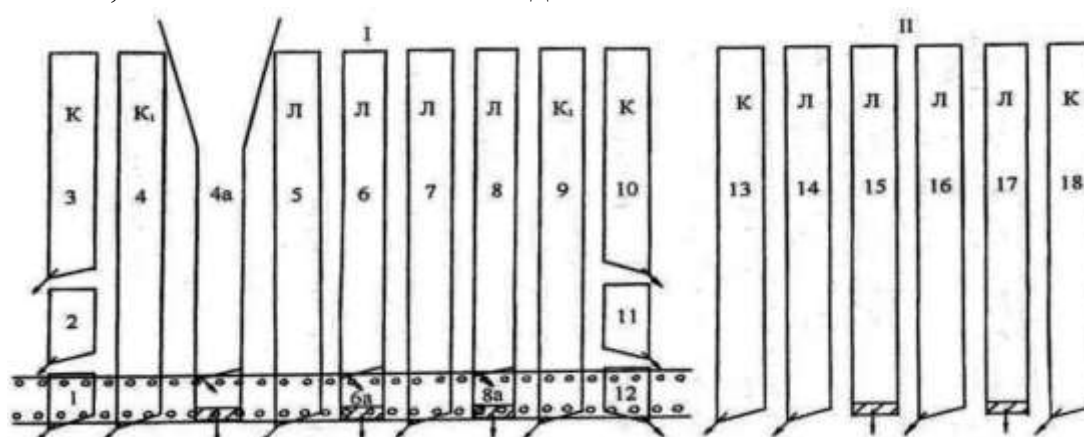


Рис. 3.4. Схема опыта со стоковыми площадками [97].

I и II – соответственно склон с прибалочной лесной полосой и без нее; К, К1 – контрольные варианты; Л – варианты с лункованием; 1, 2, 3 и т.д. – номера площадок, штриховка – канава с валом, стрелка – места установки водосливов

Данная схема, использованная в исследованиях М.С. Кузнецова и В.В. Демидова [97], позволяет изучать дифференцированно сток из зон поля, разноудаленных от лесной полосы, оценивать стокопоглощение в лесной полосе при наличии и отсутствии гидротехнического усиления, оценивать роль гидротехнических противоэрозионных мероприятий без лесных полос.

На рис. 3.5 и 3.6 показаны различные варианты стоковых площадок с металлическими ограждающими и водонаправляющими бортиками.



Рис. 3.5. Большая и малая стоковые площадки с водоотводящей трубой (фото с сайта USDA [225]).



Рис. 3.6. Серия стоковых площадок для изучения эффективности различных противоэрозионных приемов возделывания кукурузы в Молдавии [53].

Изучение интенсивности эрозии на малых водосборных бассейнах.

К таким бассейнам, в первую очередь, относятся водосборы ложбин - верховых звеньев первичной гидрографической сети. Но иногда, как это будет показано ниже, ими могут быть даже балочные водосборы. И если в первом случае на изучаемой площади расположена, как правило, одна культура или несколько с полосным их чередованием, то на балочном водосборе уже располагаются несколько полей севооборота, а то и весь он в целом.

Удобством такого подхода [205] является отсутствие необходимости устраивать боковые границы – ими служат водоразделы между соседними ложбинами. Но если на стоковой площадке имеет место параллельно-струйчатое вдольсклоновое стекание воды, то на ложбинном водосборе всегда имеется более или менее выраженный водоток, в котором происходит концентрация стока и линейная эрозия. Эрозия на склонах ложбины имеет характер поверхностной ручейковой. Как было показано выше, линии стока здесь имеют ограниченную длину, что не позволяет изучать влияние длины склона, а сам смыл бывает менее выражен и измерить его методом водороин не всегда возможно. Поэтому на склонах ложбин устраивают небольшие стоковые площадки - даже метровые. Потери почвы на малом водосборном бассейне являются результатом сложного взаимодействия поверхностной и русловой эрозии.

В качестве примера можно привести опыт с различными вариантами ПЭГТС в бывшем опытном хозяйстве УНИИЗПЭ «Ударник» Лутугинского района Луганской обл. (рис. 3.7), созданный под руководством д.с.-х.н Шелякина Н.М.

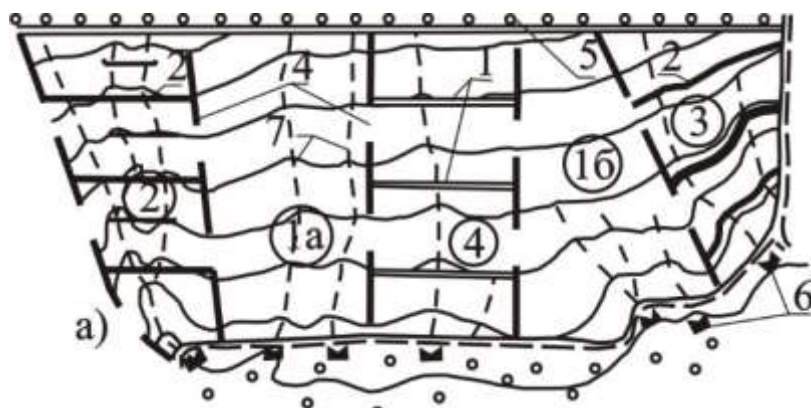


Рис. 3.7. План опытного участка № 4 с различными вариантами ПЭГТС: в кружочках – номера вариантов; 1 – валы-террасы, 2 – контурно-параллельные и контурные валы-канавы, 3 – перемычки в ложбинах, 4 – границы между вариантами опыта, 5 – лесная полоса + вал-траншея, 6 – водосливы-водомеры; 7 – тальвеги ложбин.

Площадь поля 17 га, длина склона от верхней (стокорегулирующей) лесной полосы до нижнего прибалочного насаждения 300 м.

Вариантами опыта были участки площадью от 2,4 до 4,3 га с контурно-параллельными и контурными валами-канавами (№№ 2 и 3), с валами-террасами через 80 м (№ 4), контрольные варианты (№№ 1а и 1б) с почвозащитной агротехникой.

На каждом участке имеются 1-2 ложбины; границами вариантов являются их водоразделы. Для учета стока с вариантов служат семь водосливов-водомеров, расположенных в замыкающих створах ложбин. Смыв почвы учитывался методом водороин и по мутности стока.

3.2 Приборы и оборудование для измерения стока воды со стоковых площадок и малых водосборов

Сток талых и ливневых вод со стоковых площадок и малых водосборов может измеряться с помощью гидрометрических лотков, тонкостенных водосливов-водомеров, методом замера воды точно вымеренной тарой и с помощью специальной измерительной аппаратуры (делительных лотков и т. д.).

Водосливом называется искусственная преграда, через которую происходит перелив воды [178]. Тот участок, над которым непосредственно происходит протекание воды называется *порогом* водослива. Область потока перед водосливом (вверх по течению) называется *верхним бьефом*, а область потока за водосливом – *нижним бьефом*.

В зависимости от ширины порога (стенки) различают водосливы: с *тонкой стенкой* (рис. 3.8 а), когда толщина стенки $\delta \leq 0,67H$, где H – геометрический напор на пороге водослива; *водосливы практического профиля* – полигонального (б) и криволинейного (в) очертаний, когда $0,67H < \delta \leq (2 \div 3)H$; с *широким порогом*, когда $(2 \div 3)H < \delta \leq (8 \div 10)H$.

В зависимости от геометрической формы водосливного отверстия (выреза) различают водосливы: *прямоугольные* (рис. 3.9а), *треугольные* (рис. 3.9б),

трапецевидальные (рис. 3.9 в), круговые (рис. 3.9 г), параболические (рис. 3.9 д), с наклонным ребром (рис. 3.9 е), пропорциональные (рис. 3.9 ж).

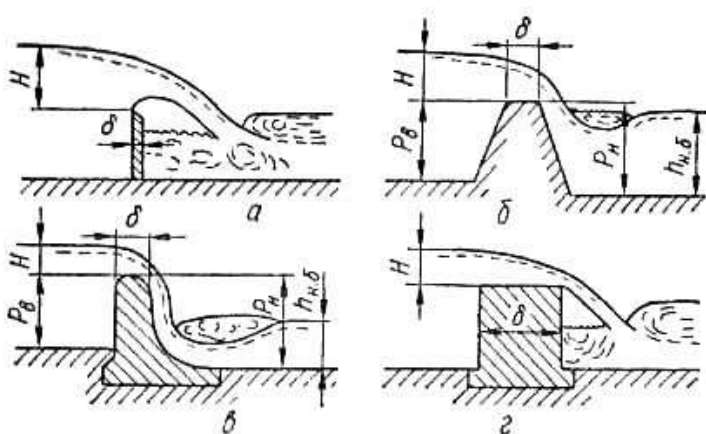


Рис. 3.8. Виды водосливов в зависимости от ширины стенки (порога) [178]

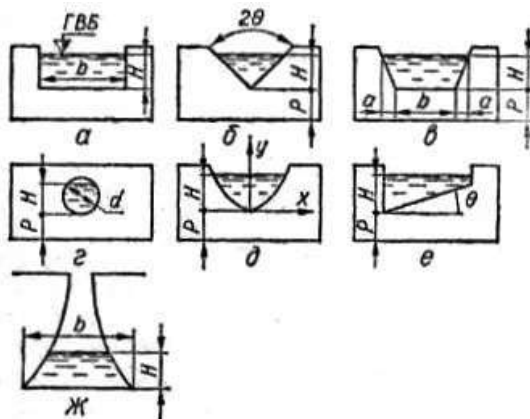


Рис. 3.9. Виды водосливов в зависимости от формы водосливного отверстия [178]

Наиболее прост по конструкции тонкостенный водослив-водомер с треугольным вырезом (треугольный водослив), называемый еще водосливом Я. Томсона. От прямоугольного и трапецевидального его отличает меньшая пропускная способность при равных напорах, но зато намного более высокая точность определения малых расходов. Все эти водосливы могут быть изготовлены из листа металла с вырезом, через который и происходит перетекание воды. Водослив Я. Томсона обычно делают с углом выреза 90° . При изменении напоров от 0,05 до 0,25 м, по данным его автора, расход через него от H (м) выражается таким уравнением: $Q = 1,4H^{5/2}$, м³/с.

Более точно расход можно определить по формуле Кинга:

$$Q = 1,343H^{2,47}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.1)$$

Согласно рекомендациям [116] при напоре до 45 см расход для этого и других углов выреза можно определить по табл. 3.1. При напоре до 1 м для углов 45° и 90° расход можно определить по приложению 2 [116]. Максимальные измеряемые расходы при этом соответственно равны 0,577 и 1,36 м³/с.

Таблица 3.1

Расходы воды через треугольный водослив

Напор, см	Расход воды (л/с) через водослив с углом выреза		
	45°	60°	90°
5	0,4	0,5	0,8
10	1,9	2,6	4,5
15	5,1	6,9	12
20	10	15	25
25	18	26	44
30	28	40	69
35	42	59	101
40	59	82	142
45	79	111	190

Примерами широкой применимости треугольного водослива являются водослив с высотой выреза 2 м в замыкающем створе балки Плоская в ОПХ УНИИЗПЭ «Ударник» с площадью водосбора 2937 га и водослив с высотой выреза 0,7 на фрагменте варианта №3 научно-производственного опыта №3 - выполненном овраге с системой двухрядных лесных полос и валов-канал.

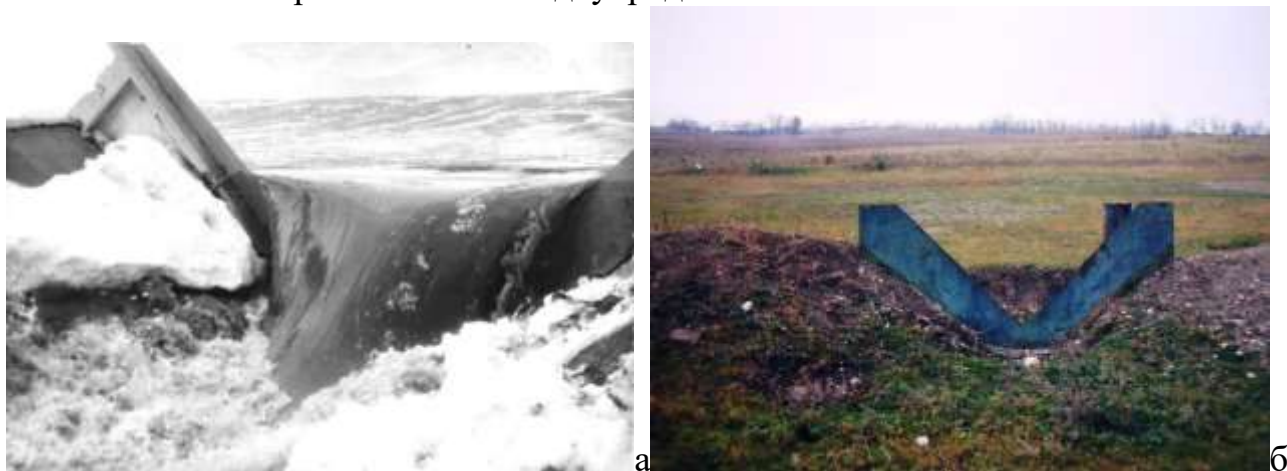


Рис. 3.10. Примеры водосливов-водомеров: а) в замыкающем створе балки Плоская с водосбором площадью 2973 га при стоке талых вод в марте 1985 г. (фото Ю.И.Колесникова); б) на выполненном овраге (вариант №2 опыта №3)

В исследованиях заведующего лабораторией коренной мелиорации склонов УНИИЗПЭ к.т.н. Малютяка В.Т. с коллегами в этом же ОПХ применялись и комбинированные водосливы, представляющие собой трапецидальный водослив с треугольным вырезом на пороге (рис. 3.11). Достоинством водослива является большая пропускная способность без образования большого подпора и, в то же время, достаточная точность измерения малых расходов, не присущая обычным трапецидальным водосливам с такой шириной порога.

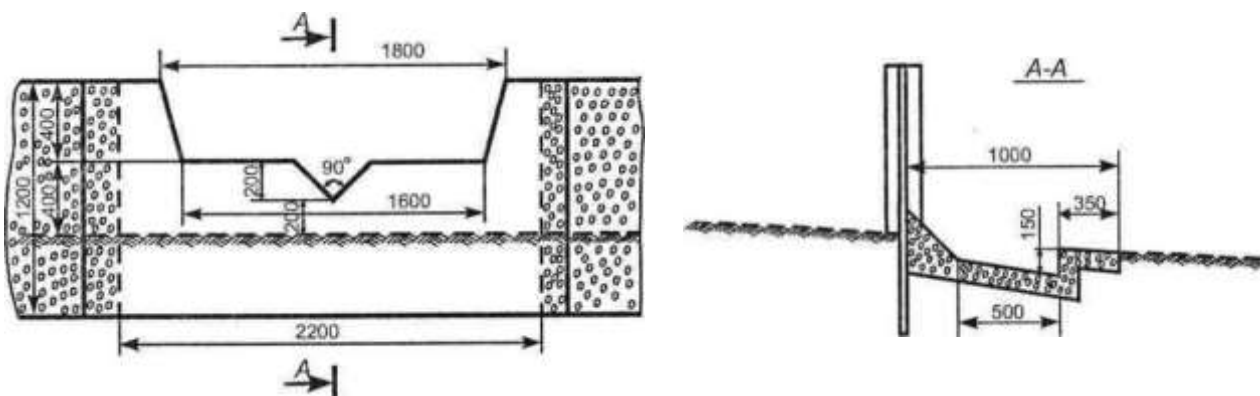


Рис. 3.11. Комбинированный водослив с бетонным водобойным колодцем и его поперечное сечение [113]

В качестве примера стоковой площадки со стокомерным оборудованием в виде водослива можно привести площадку с земляными валиками, применяемую НПЦ зернового хозяйства им. А.И. Бараева, Казахстан [2].

Подобные площадки, но с менее капитальными земляными валиками,

напаханные плугом с оставленным одним корпусом, применялись в наших исследованиях на опыте, показанном на рис. 3.7.



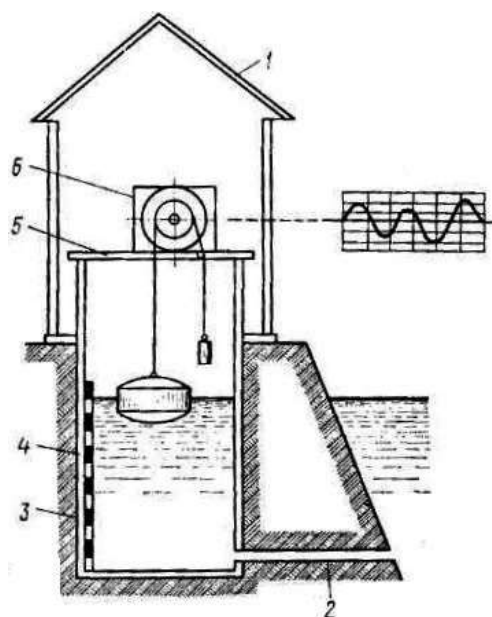
Рис. 3.12. Стоковая площадка НПЦ зернового хозяйства им. А.И.Бараева [2]

Ширина площадок 20 м, длина шести площадок, расположенных попарно между лесополосой и валом-террасой №1 (ВТ-1), между ВТ-1 и ВТ-2, между ВТ-2 и ВТ-3 равна 70 м. Две площадки длиной по 160 м располагались на контроле 1 а в зоне от уровня ВТ-1 до ВТ-3, две – на контроле 1 б в зоне от ЛП до ВТ-2.

Для автоматической регистрации изменения напоров на пороге водосливов во времени используют самописцы уровня (СУВ) «Валдай» (рис. 3.13). Их устанавливают в специальной будке над вертикальным колодцем 3 с обсадной трубой 4, связанной трубой 2 с чашей прудка перед водосливом.



а)



б)

Рис. 3.13. Общий вид СУВ «Валдай» и его размещение: а) 1 - корпус прибора, 2 – крышка со стеклом, 3 – диаграммный бланк, 5 – часовой механизм, 6 – гиля часового механизма, 8 – гиля-противовес поплавка; б) 1 – крыша будки, 2 – труба, 3 – колодец, 4 – обсадная труба, 5 – столик, 6 – СУВ «Валдай»

Датчиком самописца является поплавок. Он поднимается или опускается вместе с уровнем воды. Это движение приводит во вращение барабан с

диаграммным бланком, а часовой механизм 5 самописца приводит в горизонтальное перемещение каретку с пером, которым на разграфленной бумаге (диаграммном бланке) 3 (рис. 3.13 а) записывается график изменения уровня во времени. Кинематическая схема самописца «Валдай» приведена на рис. 3.14. Поплавок 2 с грузом 1 и противовес 3 подвешены на поплавковом колесе 4. Длина окружности поплавкового колеса 4 — 300, а колеса 5 — 600 мм.

Именно таким СУВ оборудован водослив, показанный на рис. 3.10 а.

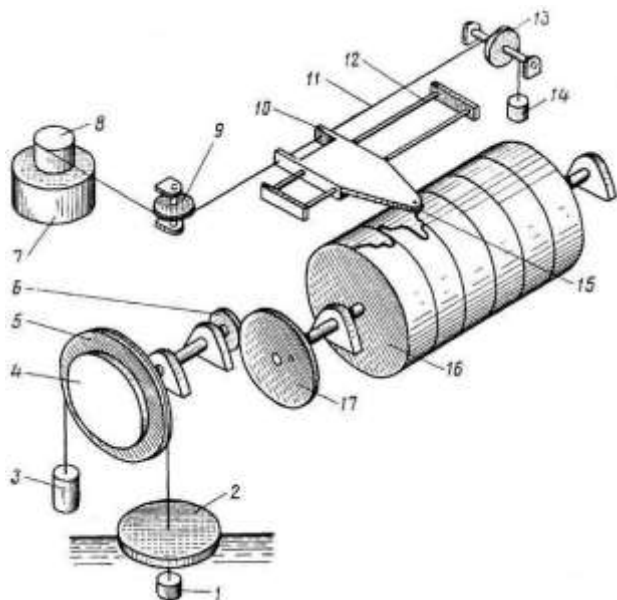


Рис. 3.14. Кинематическая схема СУВ «Валдай»: 1 – грузик поплавок, 2 – поплавок, 3 – противовес поплавок, 4 – малый шкив, 5 – большой шкив, 6 – шестерня, 7 – часовой механизм, 8 – барабан, 9 – ролик, 10 – каретка, 11 – струна, 12 – направляющие стержни, 13 – ролик, 14 – груз, 15 – перо, 16 – барабан, 17 – шестерня

На больших ложбинных водосборах в опытах отдела ПЭК в ОПХ УНИИЗПЭ «Ударник» применялись и самодельные самописцы из переоборудованных термографов.

Современные уровнемеры. В настоящее время для автоматического измерения уровня грунтовых вод в скважинах применяют регистратор данных DCX-16, производимый швейцарским заводом Keller AG. На наш взгляд, его вполне можно использовать и в гидрометрии, в частности для измерения напора воды на водосливах. Это автономный прибор, питающийся от литиевой батареи [226]. Корпус датчика изготовлен из нержавеющей стали. Диаметр прибора составляет 16 мм. Регистратор позволяет измерять и записывать данные об уровне воды и ее температуре в течение длительных периодов. В электронные компоненты входит микропроцессор. DCX-16 доступен в 3-х исполнениях:

DCX-16 (рис. 3.15). Чувствительный элемент, электроника и корпус с батареей находятся в одном герметичном корпусе. Для того, чтобы скачать информацию, необходимо извлечь регистратор из воды и снять колпачок, чтобы получить доступ к разъему для считывания данных. В регистраторе используется сенсор абсолютного давления. Это допустимо, когда можно пренебречь изменениями атмосферного давления, или же в случае наличия на поверхности барометрического датчика, параллельно измеряющего атмосферное давление.

DCX-16 SG/VG. В этом исполнении регистратор и корпус с батареей монтируются на поверхности, чтобы обеспечить легкий доступ к разъему для считывания данных, а датчик передает сигнал об измерениях на регистратор при помощи кабеля. Модульная конструкция датчика позволяет подключить

регистратор к GSM модулю, который передает данные на модем. Также данные могут быть отправлены на мобильный телефон обычным SMS-сообщением. Ценным качеством второго варианта является наличие отверстий для передачи атмосферного давления к датчику, благодаря чему он измеряет давление водяного столба без влияния атмосферного давления. Погрешность 0,05% от максимального предела измерений (10, 20 и 50 м вод. столба), т.е. 5, 10, 25 мм. Для больших водосливов это приемлемо, но для малых не дает требуемой точности.



Рис. 3.15. Измеритель уровня воды **DCX-16** [226]

На площадках размером до 0,5 га устанавливаются водосливы с углом выреза $\alpha = 45^\circ$, более точные, а на площадках большего размера — с углом выреза $\alpha = 90^\circ$. Водослив должен устанавливаться в вертикальной плоскости таким образом, чтобы биссектриса угла выреза совпадала с отвесной линией.

Металлический щит водослива делается из листовой стали толщиной 3-5 мм, край выреза водослива должен быть заточен со стороны нижнего бьефа под углом 60° к горизонту и иметь толщину кромки 1 мм. Размеры водосливного выреза назначаются в зависимости от расчетного максимального расхода воды с площадки. Для их определения можно воспользоваться Приложением 2 [116].

Наименьшие надежно измеряемые расходы воды составляют 0,8 л/с для водослива с углом выреза 90° и 0,4 л/с с углом выреза 45° .

Тонкостенный водослив с треугольным вырезом позволяет измерить расход воды с большой точностью при выполнении следующих требований [116].

1. Утечки воды под сооружением или в обход его должны быть сведены к минимуму. Поэтому при установке водослива целесообразно приваривать его наглухо к металлическому водоподводящему лотку. При установке водослива в русле водотока необходимо обеспечить водонепроницаемость основания и надежность сопряжения напорной стенки с естественными берегами.

2. Поток перед водосливом должен протекать прямолинейно, скорость подхода не должна превышать 0,5 м/с.

3. Водослив должен работать в условиях незатопленного режима. Для этого уровень в нижнем бьефе должен быть не менее чем на 10 см ниже вершины угла выреза водослива.

4. Струя переливающейся воды должна падать свободно, не приликая к стенке водослива.

5. Вершина угла водослива должна возвышаться над дном верхнего бьефа не менее чем на 10 см.

6. Водомерная рейка и приемная часть самописца уровня воды, служащие для измерения напора воды, должны быть удалены от водосливной стенки на расстояние не менее двух-трехкратного значения максимального напора.

7. Недопустимо скопление перед водосливной стенкой наносов и мусора.

На временных стоковых площадках, когда установка постоянной водосливной стенки и самописца оказывается невозможной, допускается устройство временных съемных водосливов. Водосливный щит устанавливается либо на весь период измерения стока (например, в период снеготаяния), либо используется для эпизодических измерений расхода воды в качестве переносного устройства. При этом необходимо следить за тем, чтобы весь расход воды проходил через водослив, не обходил его с боков и снизу.

Для устранения скоростного напора перед водосливами необходимо устраивать горизонтальную площадку площадью 1,5—2 м² с уровнем на 8—10 см ниже порога.

Смыв со стоковых площадок определяют по объему отложений перед водосливом и методом «мутность-расход». Для детального изучения закономерностей смыва выполняется обследование водосбора в период стока или после его прохождения вышеописанными методами.

Постоянные стоковые площадки небольших размеров (<0,5 га) обычно оборудуются мерными баками (рис. 3.16) с водосливными вырезами, крючковыми рейками и СУВ «Валдай» [116]. Все измерительное оборудование размещается в специальном павильоне, который либо заглубляется в землю на большую часть высоты, либо относится от площадки на 5—10 м.

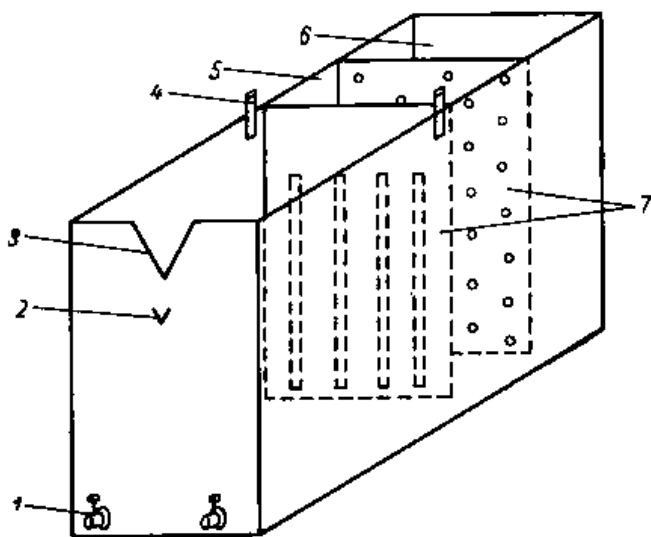


Рис. 3.16. Общий вид мерного бака: 1 — спускной кран, 2 — лоток (носик) для тарировки щита водослива, 3 — водосливное отверстие в передней стенке бака, 4 — кронштейн для крепления крючковой рейки, 5 — отсек для поплавка самописца уровня, 6 — отсек для приема воды, 7 — внутренние перфорированные стенки

Мерный бак сваривается из листового металла толщиной 4—5 мм. Бак разделен на три отсека съемными перфорированными стенками, которые не доходят до дна на 10 см. Вода из водоприемного лотка поступает в задний отсек. Для улавливания мусора и гашения энергии падающей струи в этот отсек на расстоянии 20 см от заднего края бака помещается съемная металлическая сетка с отверстиями размером 1 см². В среднем отсеке помещается поплавок самописца уровня. В передней стенке вырезается водосливное отверстие. К боковой стенке переднего отсека на

расстоянии 75 см от водослива, на специальном кронштейне крепится крючковая рейка. К наружной стороне передней стенки бака, в 10 см ниже вершины угла выреза водослива, приваривается небольшой лоток (носик) для отжима струи от стенки бака при тарировании водослива; в нижней части стенки, на расстоянии 10 см от дна, привариваются два водовыпускных крана диаметром не менее 2 дюймов для быстрого выпуска воды.

СУВ «Валдай» устанавливается на двух металлических или деревянных брусках, прикрепленных болтами к боковым стенкам мерного бака.

Твердый сток, т.е. смыв почвы с территории стоковой площадки, определяют путем суммирования стока взвешенных и донных наносов. Сток донных наносов, которые обычно оседают в стокоприемнике, определяют весовым методом, а сток взвешенных наносов определяют методом фильтрования проб, отбираемых на мутность в потоке на выходе из стокоприемника.

Эксплуатация тонкостенных водосливов и мерных баков с водосливными вырезами в некоторых случаях может быть затруднена и даже невозможна из-за быстрого заполнения емкостей наносами. На площадках, дающих большие объемы смытой почвы, рекомендуется использовать *гидрометрические лотки*, так как они создают наиболее благоприятные условия для транзита наносов.

Достаточно простым по конструкции и удобным в эксплуатации при большом содержании в потоке наносов является гидрометрический лоток Вентури прямоугольного сечения с горизонтальным дном (рис. 3.17).

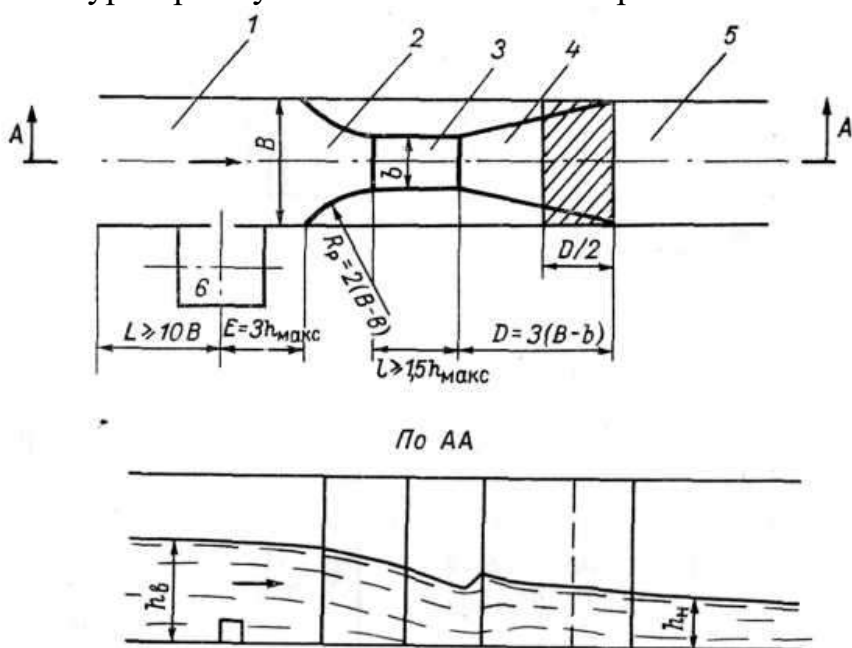


Рис. 3.17. Лоток Вентури [116].

- 1 — канал подводящий,
- 2 — раструб приемный,
- 3 — горловина,
- 4 — раструб отводящий,
- 5 — канал отводящий,
- 6 — колодец самописца

Лоток состоит из приемного раструба со сходящимися стенками, горловины с параллельными стенками и отводящего раструба с расходящимися стенками, образующими в плане угол с направлением оси лотка 1 : 6.

Размеры лотка Вентури определяются шириной горловины b , шириной подводящего канала B и максимальным напором $h_{\text{макс}}$, величина которого не должна превышать трехкратную ширину горловины. Боковые стенки приемного раструба очерчивают по радиусу $R = 2(B-b)$, длина горловины $l \geq 1,5 h_{\text{макс}}$,

длина отводящего раструба $D = 3(B-b)$. Высота стенок лотка назначается равной $h_{\text{макс}} + 0,1$ м.

Параметры лотка: ширина горловины b и отношение b/B выбираются по табл. 4 или Прил. 1 [116] в зависимости от расчетного максимального расхода воды. Так для пропуска расхода $Q = 5,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ширина горловины должна быть равна 2,75 м, отношение $b/B = 0,6$. Напор H при этом будет равен 1 м. Для сравнения треугольный водослив с углом 90° при таком же напоре пропустит поток с расходом $1,36 \text{ м}^3/\text{с}$, т.е. в 3,75 раз меньший, чем лоток с вышеназванными параметрами.

Современный лоток Вентури, изготавливаемый в НПО «Эргомера» (рис. 3.18) [223] имеет датчик уровня с беспроводной передачей данных на расстояние до 300 м, их просмотром на дисплее уровнемера и печатью на внешнем принтере. Предусмотрена система сигнализации о выходе измеряемого уровня за установленные пределы. Ведется архив результатов измерений в энергонезависимой памяти.



Рис. 3.18. Лоток Вентури, изготавливаемый в НПО «Эргомера» [223]

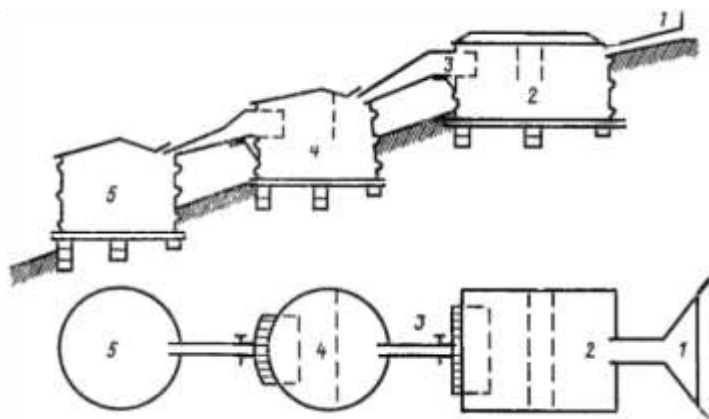
При устройстве лотка Вентури необходимо выполнять следующие требования [116]:

- 1) подводящий участок русла должен быть прямолинейным на расстоянии $15 \div 20B$ и иметь однообразный уклон, не превышающий $1-2\text{‰}$. Ниже лотка не должно быть препятствий, создающих подпор в нижнем бьефе;
- 2) продольная ось лотка должна совпадать с направлением течения потока;
- 3) размеры лотка должны быть выдержаны точно по расчету;
- 4) дно горловины должно быть строго горизонтально, а стенки вертикальны и параллельны.

Небольшие лотки целесообразно делать целиком из листового железа толщиной 4—6 мм с применением сварки. Для предотвращения деформаций лотка следует укрепить железные листы ребрами жесткости из железных уголков и вставить поверху распорки у входа в лоток, на стыках горловины с приемным и отводящим раструбами и на выходе из лотка.

При улавливании стока в собирающую емкость ее обычно рассчитывают на сток обеспеченностью 1% или 130-150 т/га смытой почвы. Поскольку такому смыву при площади водосбора, измеряемой целыми гектарами и даже их десятными частями соответствует объем наносов в десятки и сотни тонн

кубометров, делать такие емкости не представляется возможным. Поэтому часто бывает удобно исследовать не весь объем стока, а какую-то его долю. В этих случаях в измерительную систему вводят один или несколько делителей стока (рис. 3.19).



а) б)

Рис. 3.19. Делители стока: а) фрагмент фото с сайта [222]; б) рис. из [53]

Самый простой делитель стока представляет собой емкость с вертикально расположенными водовыпускными щелями. Щели должны быть такими, чтобы независимо от уровня воды в делителе через каждую из них вытекало одинаковое количество воды. Воду, вытекающую из щели, оборудованной направляющим лотком, подают в измерительную емкость или во второй делитель, а воду из остальных щелей сбрасывают в канализационную сеть. Если в измерительной системе установлено последовательно два делителя, каждый из которых отделяет для изучения $1/11$ часть поступающего в него стока, то в замыкающую емкость такой системы поступает $1/121$ часть суммарного стока, а $120/121$ частей сбрасывается в канализацию.

При применении переносных водосливных рамок напор измеряется обычно в створе водосливного отверстия. С этой целью с верховой стороны на щите по обеим сторонам водосливного выреза наносятся две шкалы (рейки с миллиметровыми делениями), служащие для отсчета высоты напора. Нули шкал должны совпадать с отметкой вершины угла выреза.

Вследствие того, что напор, измеренный в створе водосливного отверстия, меньше напора в верхнем бьефе водослива на расстоянии $2-3H$ от стенки, использование таблиц и прил. 2 [116] ведет к занижению значений расхода воды. Для корректировки измеренных расходов воды рекомендуется производить тарировку водослива объемным способом.

Для срочных (разовых) измерений расходов воды на временных стоковых площадках могут служить протарированные емкости объемом 50-100 л. Мерные емкости устанавливаются в котловане глубиной $0,7-1,0$ м. Вода к ним подводится по деревянным или металлическим лоткам или асбоцементным трубам (распиленным по продольной оси пополам) и сбрасывается через открытую канавку. Измерение расхода воды производится объемным методом по времени заполнения мерного сосуда. Необходимо следить за тем, чтобы

подводящие лотки не давали течи и вся вода, стекающая с площадки, поступала в мерный сосуд.

Примеры устройств для учета стока со стоковых площадок. Для изучения процесса стока в наших исследованиях использовались треугольные тонкостенные водосливы-водомеры Я. Томсона, расположенные в замыкающих створах на вариантах опытов (см. рис. 3.7) и водосборах разного уровня – от ложбинных - площадью 0,7-30 га до водосбора балки Плоская в целом.

Расход стока определяли по графику, построенному на основании формулы Кинга: $Q = 1,343 h^{2,47}$, м³/с, где h – напор воды над порогом водослива, м.

По значениям расхода воды на протяжении суток для каждого водослива строили гидрографы стока, по которым и были рассчитаны максимальные расходы и объем стока с каждого исследуемого водосбора.

Измерение напора воды на водосливах (рис. 3.20) в периоды талого стока выполнялось каждый час вручную и автоматически с использованием самописцев уровня воды "Валдай" и прибора, разработанного во Всероссийском НИИ земледелия и защиты почв от эрозии [40] и существенным образом усовершенствованного в бывшем Институте охраны почв [205].

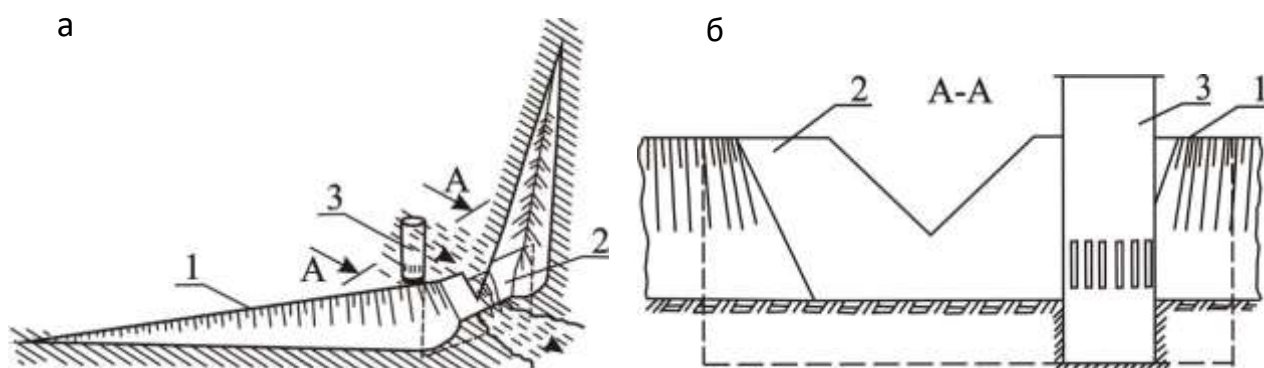


Рис. 3.20. Стоковое оборудование в замыкающих створах ложбинных водосборов: а – вид в аксонометрии, б – проекция по линии А-А; 1 – земляные валики, 2 – водослив-водомер, 3 – металлическая будка с самописцем уровня воды

Прибор изготовлен из гидрометеорологического самописца (термографа и др.) и состоит из основания с барабаном и направляющей трубкой, в которой свободно передвигается металлический шток с поплавком и пером для записи колебаний уровня воды. Барабан вращается часовым механизмом, который автоматически включается при подъеме поплавка с помощью устройства, разработанного Ю.И. Колесниковым. При колебаниях уровня воды поплавок поднимается и опускается, эти движения повторяет перо, вычерчивающее на диаграммной ленте, одетой на барабан, график колебаний уровня воды. На основе этого графика по формулам или таблицам рассчитываются ординаты графика колебаний расхода воды через водослив, называемого *гидрографом*, а затем строится сам график.

При участии Ю.И. Колесникова А.Р. Зубовым разработан самописец, защищенный авторским свидетельством СССР № 1765706 [8]. Он изготавливается

из термографа и имеет основание 1 с крышкой 2 и вертикальной осью 3, на которой вращается барабан 4 с диаграммной лентой и часовым механизмом 5 с недельным или суточным оборотом (рис. 3.21).

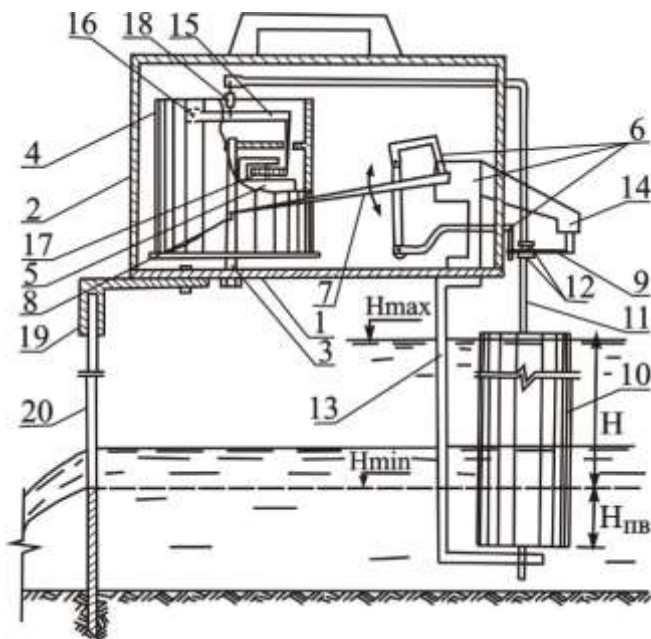


Рис. 3.21. Автоматический самописец уровня воды перед водосливами-водомерами [8]

Самописец имеет рычажный механизм 6, а также рычаг 7 с пером 8 на конце. На держателе 14 закреплена упругая металлическая пластинка 9. Поплавок 10 отличается увеличенной высотой, которая должна быть такой, чтобы его надводная часть равнялась по высоте вырезу водослива. Шток 11 имеет ограничители 12. Он вставлен в направляющие отверстия скобы 13 и держателя 14 и проходит сквозь отверстие в пластинке 9.

Свободный конец ее прикреплен к рычагу с пером. Над часовым механизмом размещено коромысло 15, закрепленное одним концом на барабане с возможностью поворота в вертикальной плоскости относительно оси 16.

Свободный конец коромысла опирается на обод маятникового колесика 17 часового механизма. Согнутая верхняя часть штока нависает над осью 3 и связана с коромыслом 15 с помощью карабина (вертлюга) 18. Самописец с помощью кронштейна 19 устанавливается на водосливе-водомере 20.

При отсутствии стока шток с поплавком висят на упругой пластинке 9, а коромысло 15 препятствует колебаниям маятника. При повышении уровня воды перед водосливом поплавок начинает всплывать, шток немного поднимает коромысло, а его конец освобождает маятниковое колесико. Часовой механизм начинает вращать барабан. Дальнейший подъем уровня приводит к увеличению архимедовой силы, которая действует на поплавок, а следовательно, и на упругую пластинку. Она деформируется, а перемещение ее конца передается перу. Запись колебаний уровня воды осуществляется в масштабе, который позволяет на стандартной ленте шириной 94 мм отразить колебания в диапазоне до 50 см, поэтому устройство компактное, затраты труда на его изготовление снижаются. При спаде уровня воды деформация пластинки уменьшается, перо опускается книзу, а механизм выключается до следующего периода стока, поэтому не требуется регулярный подзавод часового механизма устройства.

Использование принципа автоматического отключения часового механизма позволило А.Р. Зубову разработать и другое устройство, в котором вместо самописца используется только барабан 1 с часовым механизмом (рис. 3.22). Он помещается в защитном корпусе в виде полимерной или металлической трубки

2. К штоку 3 с поплавком 4 крепится рычаг 5 включения часового механизма 6. К нижнему торцу барабана приклеены две шкалы времени 7, а к малой приводной шестерне 8 (или большой) прикреплена стрелка 9. Шток имеет деления, покрыт водорастворимой краской. Трубка 2 устанавливается в теле вала 10 стоковой площадки с водосливом 11 и имеет крышку 12.

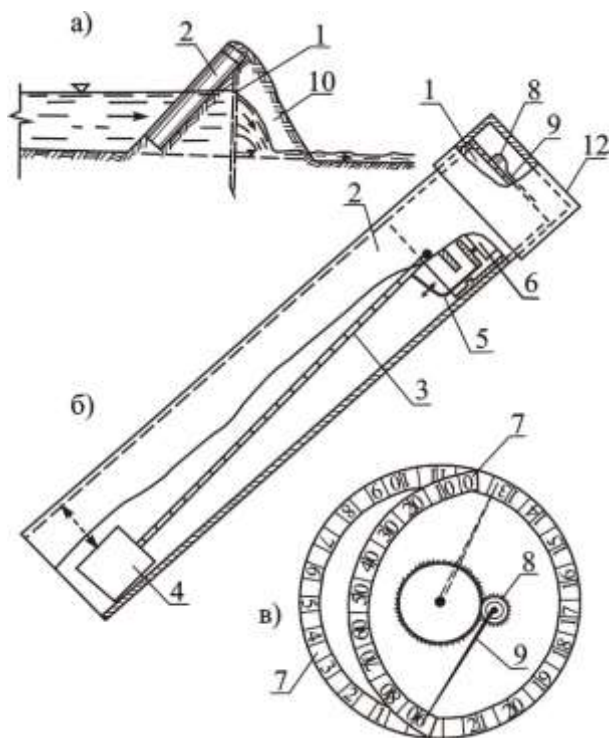


Рис. 3.22. Автоматическое устройство для измерения стока со стоковых площадок: а – поперечный разрез вала с прибором и водосливом, б – продольное сечение прибора, в – нижний торец барабана со шкалой и стрелкой в плане.

При появлении стока поплавки поднимаются, а рычаг 5 освобождает маятник. После окончания стока механизм выключается. По повороту стрелки определяют продолжительность стока, а по следу воды на штоке – максимальный напор.

Объем стока определяют как половину произведения его продолжительности на максимальный расход.

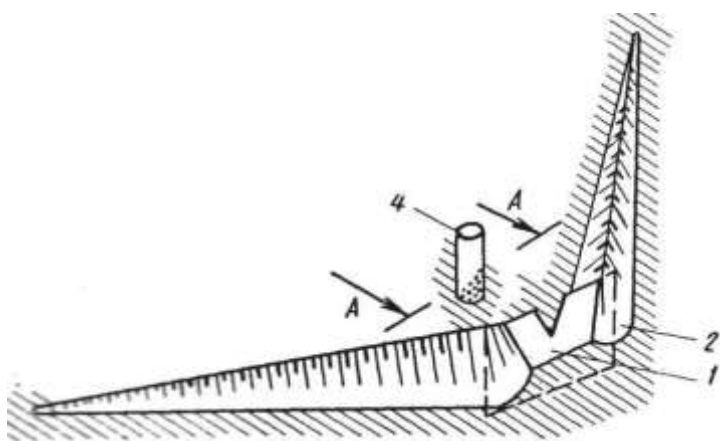
Преимуществами устройства является простота изготовления и возможность массового использования на временных стоковых площадках, неприметность, повышение точности определения продолжительности стока с 5 до 0,5-1,0 мин, т. е. в 5-10 раз, что имеет особенно большое значение для изучения ливневого стока, который отличается малой продолжительностью.

Для учета стока с малых стоковых площадок А.Р. Зубовым с соавторами разработано простое устройство,

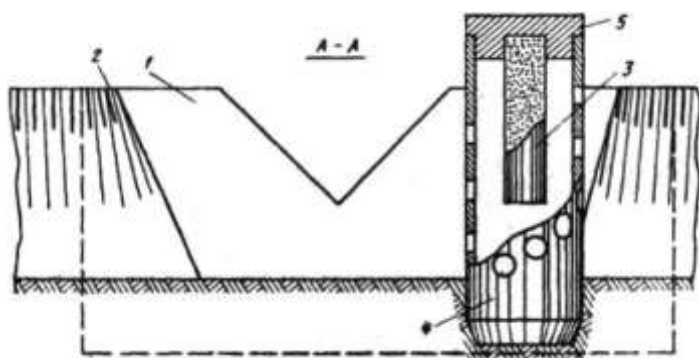
защищенное авторским свидетельством [10], показанное на рис. 3.23.

Устройство включает тонкостенный водослив-водомер 1 с треугольным вырезом, снабженный направляющими земляными валиками 2 и, в качестве элемента, регистрирующего изменение во времени напора, стержень 3 из малорастворимого вещества в защитном корпусе 4. Корпус 4 выполнен в виде отрезка металлической трубы с отверстиями для циркуляции воды, устанавливаемого вертикально в прудке перед водосливом. Верхний конец стержня 3 закреплен в крышке 5 корпуса 4, а нижний конец находится на одном уровне с «нулем» водослива 1.

Устройство работает следующим образом. Талые и ливневые воды, стекающие с исследуемой водосборной площади, направляются валиками 2 к водосливу и стекают через его вырез. На водосливе устанавливается определенный напор воды, зависящий от расхода воды в данный момент времени. Величина его сначала нарастает, а затем, достигнув своего максимума,



а)



б)

Рис. 3.23. Устройство для учета поверхностного стока по а.с. №1210068:
а) – общий вид; б) – сечение по линии А-А.

уменьшается. Стержень 3 смачивается водой и постепенно растворяется с поверхности. Продолжительность смачивания уменьшается по высоте в соответствии с гидрографом стока, поэтому степень растворения стержня по его высоте за период стока различна. Измеряя диаметр стержня штангенциркулем на различных уровнях, например, через 1 см до и после стока и вычисляя уменьшение диаметра, можно, зная скорость растворения материала стержня, определить время пребывания под водой каждого из уровней и построить график изменения во времени напора на водосливе, по которому, используя тарифовочную кривую водослива, можно построить гидрограф расхода воды.

Последний позволяет судить о динамике расхода стока воды,

определить максимальное его значение, определить продолжительность стока, его объем и слой.

Скорость растворения стержней определяют путем тарифовки опытных образцов с учетом температуры воды. Материал для стержней подбирается в зависимости от предполагаемого режима работы устройства: для учета стока ливневого или талого, или для накопления информации за длительный период. В качестве материала стержня могут быть использованы гипс, хлорид свинца, бура и другие малорастворимые соли и вещества.

Устройство на рис. 3.24, разработанное А.Р. Зубовым с соавторами [11], выполнено в виде водослива-водомера 1 с треугольным вырезом. В стенке водослива установлена мембрана 3 с отверстиями. На неподвижной оси насажен барабан 7 с часовым механизмом и водочувствительной диаграммной лентой. Барабан установлен вертикально таким образом, что образующая его поверхности вплотную прилегает к осевой образующей мембраны 3. При подъеме уровня воды над порогом водослива вода вступает в контакт через отверстия в мембране 3 с поверхностью барабана 7 и оставляет на ленте след в виде серии горизонтальных линий, огибающая которых является графиком изменения во времени напора воды на водосливе, по которому строят гидрограф стока.

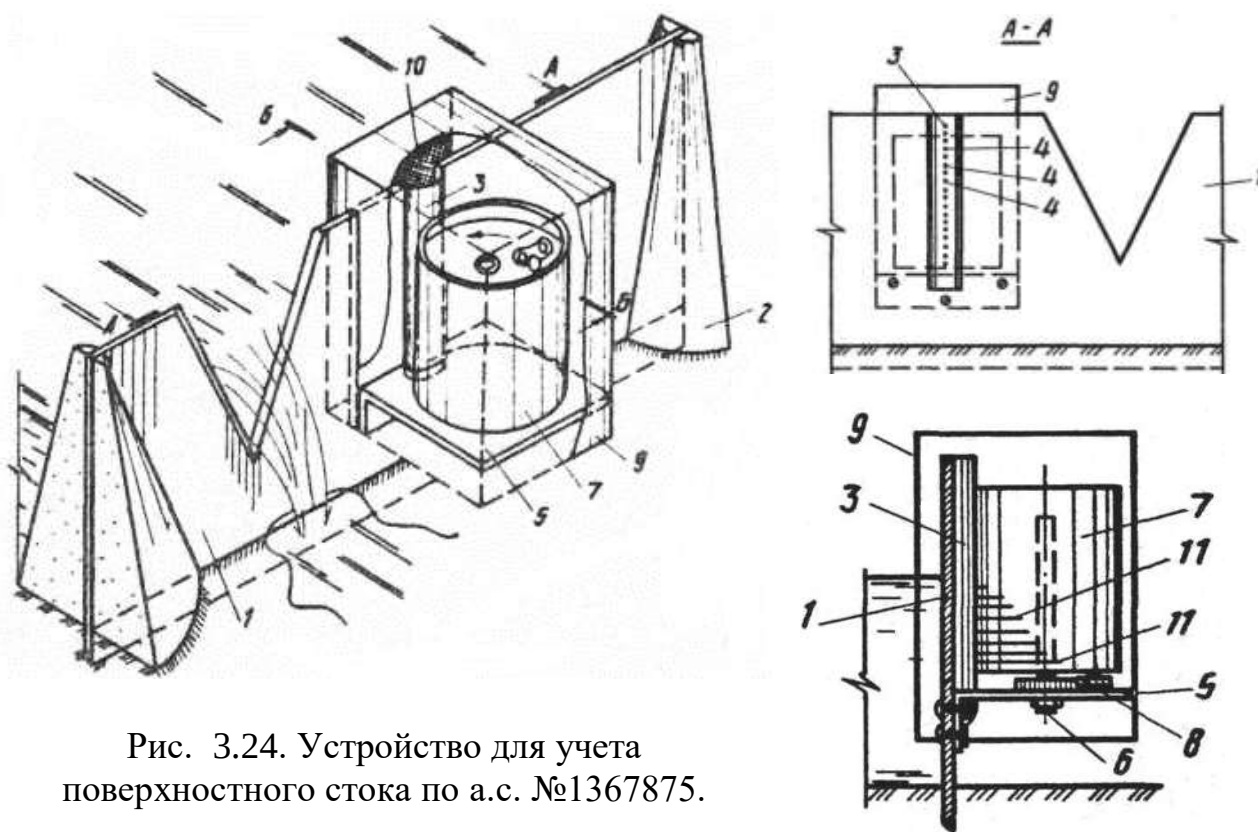


Рис. 3.24. Устройство для учета поверхностного стока по а.с. №1367875.

Методика обработки данных по напорам воды на водосливах. При отсутствии самопишущих устройств данные по напорам воды на водосливах приходится получать путем ручных измерений. Естественно при этом то, что исследователь выходит в поле позже начала стока (иногда он не прекращается и ночью) и уходит с началом сумерек, не дождавшись его окончания. При обходе большого количества удаленных водосливов, замеры получаются ежечасными или еще более редкими. Получив значения напоров, их переводят в расходы по данным тарировки или по формулам. Но как быть с отсутствующими данными? Проверенным нами приемом оказалось экстраполирование. По данным термографа (или логгера, см. раздел 5.6.2), оставляемого в поле, или по данным ближайшей метеостанции получаем график суточного хода температуры воздуха. По имеющимся данным о расходах строим график связи расхода и температуры. По нему можно восстановить отсутствующие данные по расходам, зная температуру в часы, когда замеры напора не выполнялись.

Метод рам. Простым, но информативным методом получения данных по слою стока за определенные интервалы времени является использование метровых площадок, широко применявшихся в исследованиях отдела ПЭК УНИИЗПЭ. Они представляют собой квадратные рамы, сваренные из железных пластин шириной 15 см метровой длины, поставленных на ребро. В один из углов рамы вварен патрубок длиной 20-30 см из трубы диаметром 1/2-3/4 дюйма. Во избежание нагревания солнечными лучами раму необходимо покрасить в белый цвет. Используется два варианта применения рамы – без пленки и с пленкой на дне. Рамка с осени укладывается на землю, вдавливаясь на 5 см,

рядом устанавливается «сторожок» для ее нахождения под снегом. При снегопаде снег заполняет рамку. Рядом с ней измеряется высота снега и его плотность для вычисления влагозапаса, устанавливается испаритель снега для контроля потерь снеговой влаги на испарение. Когда начинается водоотдача из снега, вода по трубке вытекает в свободно лежащий полиэтиленовый мешок, соединенный с патрубком посредством шланга. Если в рамку уложена пленка, мы можем в динамике проследить за водоотдачей из снега. Если пленки нет – получаем данные по интенсивности инфильтрации снеговой воды и водообразования. Лучше иметь оба варианта применения метровой рамы с повторностями и расположением рам на склонах различной экспозиции, с различным агрофоном и т.д. Смысл почвы таким способом определить нельзя, зато можно получить весь набор элементов водного баланса в их динамике. Метод применим и для изучения водообразования при ливнях.

Чашки Эллисона. К методам активного эксперимента можно отнести и опыт по определению эродирующей силы дождя с помощью т.н. чашек Эллисона – маленьких контейнеров с песком. Впервые эрозия, вызываемая падающими каплями воды, была измерена именно при помощи чашек Эллисона [45, 214], (рис. 3.25). Впоследствии многие исследователи применяли эти чашки, так как они просты по устройству и позволяют получать довольно точные результаты.



Рис. 3.25. Заполненные песком чашки Эллисона для измерения эрозии дождя [45]

Чашка представляет собой медный цилиндр диаметром 77 мм и высотой 50 мм, снабженный внизу тонкой и частой медной сеткой. На сетку укладывают слой обычной ваты и заполняют цилиндр песком. Чашки с песком устанавливают в поддон со слоем воды, благодаря чему в песке поддерживается постоянная влажность, близкая к насыщению.

До начала и после дождя чашки с песком высушивают и взвешивают. Поскольку условия стандартизированы, по изменению веса песка можно судить об относительном разбрызгивающем действии дождя.

В опытах по определению индекса $KE>I$ группы чашек в течение двух лет находились под открытым небом, и корреляция между разбрызгиванием песка и $KE>I$ была очень высокой, порядка $r = 0,96$.

Индекс $KE>I$ применяют в странах, где он более эффективен, чем EI_{30} . Это полная кинетическая энергия части дождя, выпадающей с интенсивностью более 1 дюйма (25,4 мм) в час, т.е. более 0,42 мм/мин.

При лабораторных исследованиях, которые описал N. Hudson [45], расчетную эрозионность дождя сравнивали с эрозией, измеренной по количеству

песка, выброшенного с брызгами капель воды из маленьких контейнеров.

На следующей стадии исследований изучался поверхностный сток, и лотки или поддоны заполняли не песком, а почвой по методу Фри [45, 216]. Длина лотка 1 м, ширина 300 мм и глубина 100 мм. Лотки устанавливали на уклоне 5%, заполняли просеянной суглинистой почвой, поддерживаемой в состоянии постоянной влажности благодаря подсоединению каждого лотка к резервуару с постоянным уровнем воды. Почва, смытая с каждого лотка, попадала в емкость, расположенную ниже. По результатам за два года получена очень высокая корреляция между $KE > 1$ и измеренными потерями почвы ($r = 0,96$).

Определение размера дождевых капель. По сведениям N. Hudson [45], величину дождевых капель первым измерял Лоу в 1892 г. Дождевые капли падали на плоские шиферные плиты, расчерченные на квадраты. Вычисление размеров капли по площади разбрызгивания — наиболее распространенный способ. На плоскую поверхность кладут гигроскопическую бумагу и равномерно посыпают ее мелким порошком водорастворимого красителя. Сухой краситель не заметен, а капля дождя вызывает появление на бумаге цветного пятна в форме круга.

Размеры капли могут быть определены по формуле $D = aS^b$, где D — диаметр капли, S — диаметр пятна, a и b — постоянные величины, определенные в лаборатории для данной гигроскопической бумаги. Этот метод использовал также Г.И.Швебс [202]. В другом широко известном методе используется мука [45]. Капли дождя улавливают в блюдо с мукой. При падении в нее каждая капля образует небольшой шарик, который при высушивании в сушильном шкафу становится твердым. В лаборатории устанавливают отношение между размерами шарика и исходной капли.

Указанными и некоторыми другими методами в разных странах, при разных типах дождя определяли величину дождевых капель. Максимальный диаметр капли равнялся примерно 5 мм. Бланшар в результате опытов в аэродинамическом туннеле установил, что капли диаметром до 4,6 мм обладают прочностью. Капли диаметром от 4,6 до 5,4 мм могут раздробляться или нет в зависимости от турбулентности падения. Капли крупнее 5 и 6 мм обнаруживаются крайне редко [45].

Пример мониторинга эрозионно-гидрологических процессов на балочных водосборах по наполнению прудов. Многолетнюю динамику стока с водосбора балки Калмыцкий яр (опыт №3) площадью 330 га в ОПХ «Ударник» (рис. 3.26) определяли путем наблюдений за уровнем воды в противоэрозионном пруду во время его наполнения и опорожнения. Крутизна склонов балки 12°, средневзвешенная длина и крутизна склонов ее водосбора соответственно 1535 м и 1,3°.

Плотина пруда (рис. 3.27), обозначенная на рис. 3.26 черным ромбиком, имеет высоту 8,5 м, в верхней части она оборудована двумя водосбросными железобетонными трубами диаметром 125 см (рис. 3.28), водоотводным каналом и рассчитана на удержание 45000 м³ воды (им соответствует слой стока, равный 13,6 мм) и пропуск талого стока с расходом 1%-ной обеспеченности.

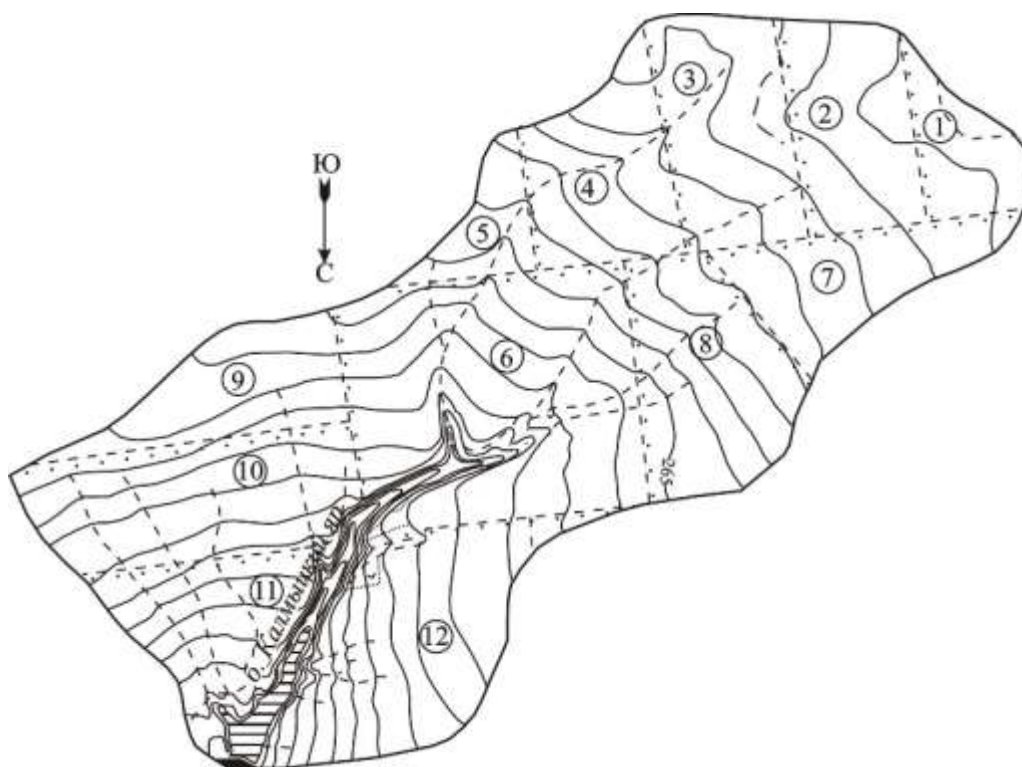


Рис. 3.26. План водосбора пруда в балке Калмыцкий яр (опыт № 2):
в кружочках - номера рабочих участков, - - - - эродирующие тальвеги ложбин,
штриховка – зона затопления при половодье и паводках.

Глубину воды в пруду определяли, используя водомерные рейки на склонах его чаши, предварительно «привязанные» друг к другу по высоте с помощью нивелира. Объем воды в пруду определяли по батиграфическим графикам (рис. 3.29), полученным в результате детальной тахеометрической съемки чаши пруда, выполненной А.Р.Зубовым и В.И.Тарасовым, и построения топографического ее плана с горизонталями через 0,5 м.

Слой стока за определенный период определяли путем деления объема стока на площадь водосбора. Объем стока определяли по формуле:

$$V_s = V_2 - V_1 + u_f F t + q t_0, \text{ м}^3,$$

где V_1 и V_2 – соответственно объем пруда в начале и в конце периода;

u_f – скорость срабатывания уровня воды в пруду за счет фильтрации, м/ч;

F – средняя площадь зеркала пруда между измерениями уровня, м²;

t – период времени между измерениями, ч;

q – расход воды через водосбросные трубы, м³/ч;

t_0 – продолжительность сброса воды в период между измерениями уровня, ч.

Скорость сработки уровня воды устанавливали по его снижению за период между моментом прекращения притока воды в пруд вечером и началом притока утром следующих суток. Расход сброса воды q определяли по таблицам пропускной способности круглых железобетонных труб в зависимости от высоты уровня воды в пруду над порогом труб (см. рис. 3.30).



Рис. 3.27. Плотина и заполненная чаша пруда в марте 2003 г. (фото Зубова А.Р.)



Рис. 3.28. Водосбросные трубы в теле плотины с линейками для замера напора воды перед ними (фото Зубова А.Р.)

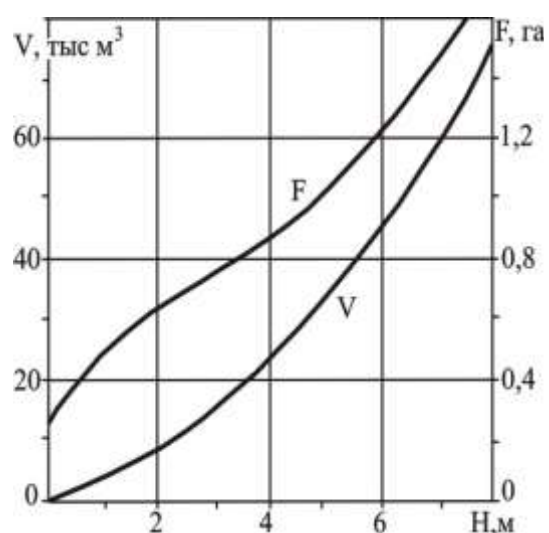


Рис. 3.29. Зависимость наполнения пруда V и площади зеркала F от уровня воды H

Наблюдение за высотой снежного покрова на водосборе пруда проводили с момента его установления до полного схода с помощью переносной рейки через 2 м по двум маршрутам на каждом рабочем участке.

Зависимость на рис. 3.30 получена по таблице 11.9 из справочника [178].

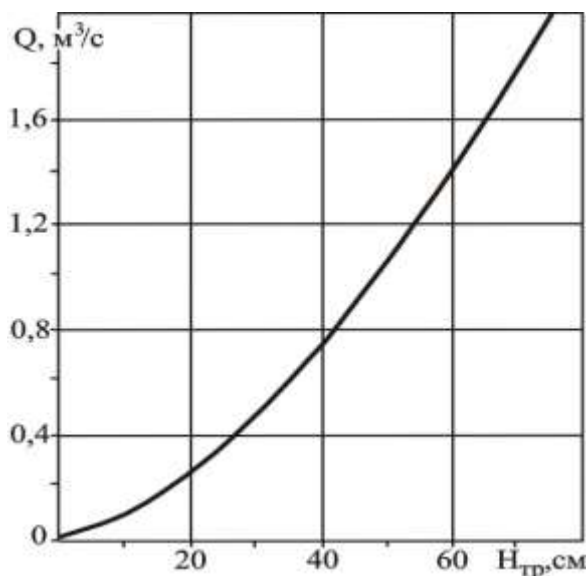


Рис. 3.30. Зависимость расхода воды Q от напора воды $H_{тр}$ перед водосбросными трубами плотины.

в устьях ложбин перед балкой и перед впадением потока на дне балки в зону затопления.

В результате многолетних наблюдений получен график динамики слоя стока с водосбора пруда за 1994-2003 гг. по суткам от начала стока (рис. 3.31).

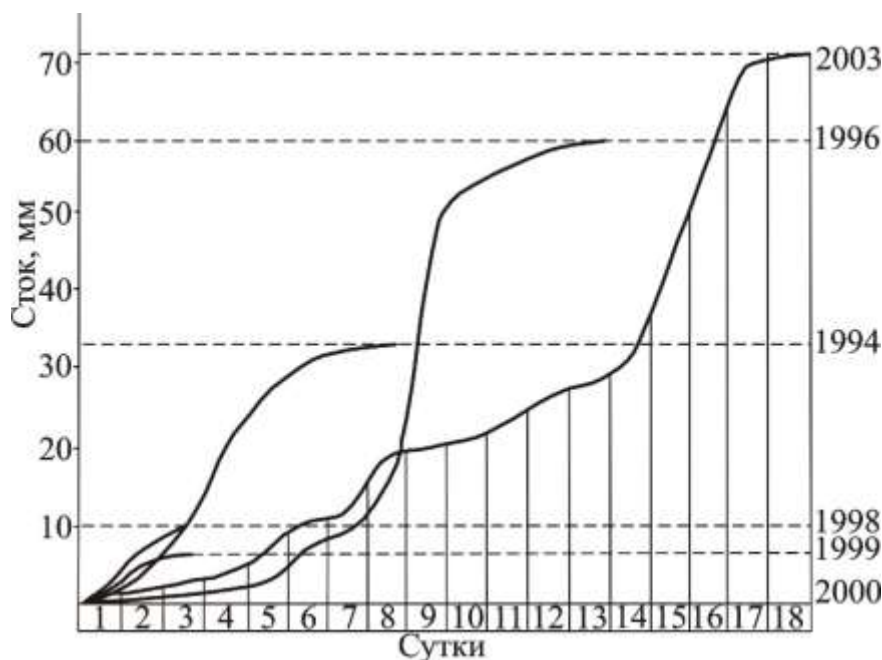


Рис. 3.31. Интегральные кривые слоя стока талых вод с водосбора пруда в балке Калмыцкий яр при снеготаянии в 1994-2003 гг.

Для контроля проводились измерения в канале, отводящем воду от труб. На дистанции длиной 5 м измеряли сечение в трех створах и скорость движения поплавков.

На водосборной площади пруда выполнялись наблюдения за потоками воды в ложбинах, впадающих в балку путем измерения скорости воды в них и площади поперечного сечения.

Такие же наблюдения выполнялись в водотоке на дне балки. Скорость воды измеряли по времени прохождения заданной дистанции и параллельно трубкой Пито.

Смыв почвы на водосборе определяли измерением водорослей по методике С. С. Соболева, путем измерения наносов, отложившихся в

3.3 Метод искусственного дождевания

В целях повышения эффективности научных исследований приходится не только оказывать влияние на естественный ход процессов эрозии почв, но и искусственно их воспроизводить, в том числе в натурных условиях. На этом принципе основаны многочисленные методы искусственного дождевания, которыми дополняют метод стоковых площадок, и метод полевых аэродинамических установок, который является основным при изучении эффективности противодефляционных мероприятий. Как отмечается в [105], строго говоря, они относятся к группе методов физического моделирования.

Искусственное дождевание получило большое распространение в эрозионно-гидрологических исследованиях. Методические подходы к нему отражены во многих трудах, в частности в методических указаниях [126].

Моделирование процесса эрозии при дождевании осложняется тем обстоятельством, что этот процесс состоит из двух процессов: отрыва, переноса и отложения почвенных частиц под действием ударов дождевых капель и размыва и смыва почвы сформировавшимся потоком воды, турбулизируемым теми же каплями. При моделировании дождя желательно было бы воспроизвести такие его характеристики, как распределение капель по размерам, скорость их падения, интенсивность дождя во времени, слой осадков, равномерность их распределения по площади.

3.3.1 Энергетические характеристики осадков

Разрушительное воздействие капель дождя на почвенные агрегаты определяется их энергией. Кинетическая энергия отдельной капли, как и любого физического тела, определяется полупроизведением ее массы на скорость падения в квадрате. Если бы все капли дождя имели одинаковую скорость падения, для определения *удельной кинетической энергии дождя* E_x , т.е. энергии, приходящейся на 1 м^2 почвы, было бы достаточно умножить массу воды, выпавшей на площади 1 м^2 на скорость капель v_k в квадрате и разделить на два.

Поскольку слою воды в 1 мм на площади 1 м^2 соответствует объем 1 литр или 1 дм^3 , ясно, что при выпадении дождя слоем $X \text{ мм}$ объем осадков, приходящийся на 1 м^2 , равен X л или $X \text{ дм}^3$, а их масса $m_X = X \text{ кг}$.

Поэтому удельная кинетическая энергия дождя $E_x = m_X v_k^2 / 2 = X v_k^2 / 2$.

Предположим, что скорость капель $v_k = 7 \text{ м/с}$, а слой осадков $X = 25 \text{ мм}$. Тогда кинетическая энергия дождя $E_x = X v_k^2 / 2 = 25 \text{ кг} \cdot (7 \text{ м/с})^2 / 2 = 612,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$.

Логично предположить, что размерности $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$ должна соответствовать единица энергии. Но чтобы это стало очевидным, преобразуем ее: $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 \cdot \text{м} = \text{масса} \cdot \text{ускорение} \cdot \text{путь} = \text{сила (в Ньютонах)} \cdot \text{путь} = \text{работа (в Джоулях)} = \text{энергия (Дж)}$. Теперь нет сомнений в том, что $612,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 = 612,5 \text{ Дж}$. А поскольку эта энергия приходится на единицу площади (1 м^2), она называется удельной и измеряется в Дж/м^2 , т.е. $E_x = 612,5 \text{ Дж/м}^2$.

Подобным способом легко найти энергию искусственного дождя, для которого типичным является одинаковый размер капель и одинаковая их скорость падения. Но естественный дождь – это сочетание капель самого

различного размера, имеющих поэтому разную массу, скорость и соответственно энергию, различающуюся в разы и даже на порядки.

Для упрощения определения энергии неоднородного дождя слоем X мм его *спектр*, т.е. диапазон размеров капель делят на несколько (z) интервалов или групп с известным средним диаметром D_{ki} по каждой (i -той) группе.

По среднему диаметру группы капель D_{ki} (как будет показано в дальнейшем) можно найти среднюю скорость падения капель группы v_{ki} .

Удельная кинетическая энергия всех капель каждой (i -той) группы E_{xi} может быть вычислена по формуле:

$$E_{xi} = (X \cdot n_i) \cdot v_{ki}^2 / 2 \text{ Дж/м}^2,$$

где n_i - часть общего слоя дождя (а значит и массы) в долях от X , приходящаяся на i -тую группу капель с условно одинаковым размером, а $X \cdot n_i$ - слой части дождя (мм) и, соответственно, масса воды (кг), приходящиеся на эту группу капель.

Тогда удельная кинетическая энергия всего дождя определится по формуле, приводимой также в [174]:

$$E_x = \sum_{i=1}^z (X \cdot n_i \cdot v_{ki}^2) / 2 = 0,5 X \cdot \sum_{i=1}^z (n_i \cdot v_{ki}^2), \quad (3.2)$$

где E_x - удельная кинетическая энергия дождя, Дж/м²; X - слой дождя, мм;

z - количество групп; n_i - часть общего слоя дождя (в долях от X), приходящаяся на i -тую группу капель с условно одинаковым размером;

v_{ki} - скорость падения капли i -ой группы, м/с.

Доля капель i -той группы n_i определяется выражением:

$$n_i = \frac{N_i P_{ki}}{\gamma V_e}, \quad (3.3)$$

где P_{ki} - вес капли i -й группы, г; N_i - количество капель в i -й группе;

γ - объемная масса воды, равная 1 г/см³;

V_e - объем воды (см³), сформированный слоем осадков X (мм) на площади 1 м², численно равный $1000X$, т.к. слою воды 1 мм на площади 1 м², как выше уже говорилось, соответствует объем 1 л = 1 дм³ = 1000 см³.

Следовательно, n_i можно выразить следующим образом:

$$n_i = \frac{N_i P_{ki}}{1000X}, \quad (3.4)$$

Важной энергетической характеристикой дождя является **удельная мощность** - величина работы капель на 1 м² поверхности за 1 секунду. Чтобы ее определить надо энергию дождя разделить на его продолжительность t в секундах. Если продолжительность дождя неизвестна, ее можно выразить через слой дождя X (мм) и его интенсивность r , измеряемую обычно в мм/мин:

$$t = 60X/r, \text{ с.}$$

Подставив последнее выражение в уравнение (3.2), получаем уравнение

удельной мощности осадков:

$$M_r = 0,0083 \times r \times \sum_{i=1}^z n_i v_{ki}^2, \quad (3.5)$$

где M_r – удельная мощность дождя, Вт/м²; r – его интенсивность, мм/мин.

Для примера, приведенного выше, с энергией дождя, равной 612,5 Дж/м², если его интенсивность, например, была равна 1,5 мм/мин, продолжительность дождя составит $t = X/r = 60 \times 25 / 1,5 = 1000$ с, а удельная мощность $M_r = 612,5$ Дж/м²/1000 = 0,613 Вт/м². В пересчете на один га мощность составит 6,13 кВт.

Использование уравнений в практике весьма затруднено сложностью определения спектра дождя. Экспериментальное изучение спектра естественных осадков и обобщение результатов уже имеющихся исследований позволило Г.И. Швебсу получить упрощенное выражение удельной мощности [173]:

$$M_r = 0,5762 \times r, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.6)$$

где r – интенсивность дождя, мм/мин.

Применение выражения (3.6) к вышеприведенному примеру дает мощность $M_r = 0,5762 \times 1,5 = 0,864$ Вт/м², что довольно близко к рассчитанным данным.

Падение дождевых капель происходит с постоянной скоростью, зависящей от диаметра капли и связанной с ним выражением, полученным нами расчетным путем для любых свободно падающих сферических частиц (раздел 4.7.3), [55]:

$$v_{ycm} = \left(\frac{4 * g * d * \rho_q}{3 * C * \rho_{ex}} \right)^{0,5} = \left(\frac{8 * g * d * \rho_q}{3 * \rho_{ex}} \right)^{0,5} = 4,486 * (d * \rho_q)^{0,5}, \quad (3.7)$$

где v_{ycm} – установившаяся скорость падения частицы, м/с; D – диаметр частицы, приведенной по форме к шару, м; C – коэффициент лобового сопротивления, равный для шара 0,5; ρ_q – плотность частицы, равная для капель воды 1000 кг/м³; ρ_{ex} – плотность воздуха, равная 1,3 кг/м³.

Подставив в (3.7) значение плотности воды, получаем уравнение установившейся скорости падения капель при выражении D в мм: $v_{ycm} = 4,486 * D_K^{0,5}$.

Используя формулу и разработанный алгоритм, описанный в разд. 4.6.3, мы рассчитали значения предельной скорости v_{ycm} падения капель разного размера и высоты их падения до достижения скорости, равной 99% от v_{ycm} (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Зависимость высоты ускоренного падения и установившейся скорости и энергии капель от их диаметра

Диаметр капли D , мм	Установившаяся скорость падения v_{ycm} , м/с	Высота ускоренного падения, м	Масса капли m , г	Энергия капли E_x , 10 ⁻⁶ Дж	Энергия дождя слоем 1 мм, Дж/м ²
5	10,03	18,0	0,065450	3292	50,00
4	8,97	13,5	0,033510	1348	40,23
3	7,77	10,8	0,014137	427	30,19
2	6,34	6,3	0,004190	84,2	20,10
1	4,49	3,2	0,000524	5,28	10,08

Рассчитанные скорости падения капель близки к значениям, приведенным в

работе Г.И. Швевса [202]. Для капель диаметром 2, 3, 4 мм расхождение не превышает $\pm 3,5\%$, но для 1 и 5 мм результаты нашего расчета выше на 10%.

Нами получено и уравнение скорости капель для интервала 0-95% от $v_{уст}$:

$$v = 0,921 \cdot D^{0,41} \cdot \ln(H) + 3,638 \cdot D^{0,203}, \quad (3.7a)$$

где D – диаметр капель, мм; H – высота падения, м.

Как следует из табл. 3.2, кинетическая энергия капли диаметром 5 мм превосходит энергию капли диаметром 1 мм в 623 раза. А энергия дождя из капель диаметром 5 мм больше энергии дождя из капель диаметром 1 мм в 5 раз.

Поэтому для расчета энергетических характеристик дождя необходимо знать спектр дождя, т.е. распределение осадков по диапазонам диаметра капли.

Важной закономерностью спектра является увеличение части больших – наиболее опасных капель и, соответственно, среднего диаметра капли с ростом интенсивности выпадения осадков. Так, средний диаметр капель дождей с $r = 0,02-0,03$ мм/мин равен приблизительно 1 мм, с $r = 2-4$ мм/мин – около 3 мм, максимальный – 5,5-5,8 мм. Таким образом, чем больше интенсивность дождя, тем выше его мощность и эродирующее действие на почву [172].

Согласно [95], средний диаметр капель можно найти по формуле Мейсона:

$$d_k \approx 2,2 \cdot r^{0,21}.$$

Как отмечается в [172], Г.И. Швевс выделил такие категории осадков по результатам их влияния на почву без растительного покрова:

I. Интенсивность осадков $r < 0,004$ мм/мин, уд. мощность $M_r < 2,4 \cdot 10^{-4}$ Вт/м², – осадки способствуют агрегации почвы, а ее разбрызгивания нет;

II. $r = 0,004 - 0,25$ мм/мин, $M_r = 2,4 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-1}$ Вт/м² – эрозионная деятельность незначительна, но имеет место слабая дезагрегация частиц почвы;

III. $r = 0,25 - 1,6$ мм/мин, $M_r = 0,12 - 0,88$ Вт/м² – значительное разрушение и разбрызгивание почвы, пропорциональные M_r ;

IV. $r > 1,6$ мм/мин, $M_r > 0,88$ Вт/м² – значительное разрушение и разбрызгивание почвы, уменьшение ее водопроницаемости.

3.3.2 Конструкции дождевальных установок, разработанных в СНГ и за рубежом

При моделировании дождей используют серийные дождевальные машины или элементы их конструкции, например, КДУ-42, КДУ-55, применявшуюся в исследованиях В.В. Сластихина для дождевания стоковых площадок длиной до 120 м по склону и шириной 10 м (рис. 3.32) [53]. В.С. Федотов в 1964 году создал агрегат искусственного дождевания (АИДа), позволяющий проводить изучение эрозионных процессов на стоковых площадках площадью от 100 до 1200 м², основанный также на применении установки КДУ-55 (рис. 3.33). Агрегат включает в своем составе поливомоечную машину ПМ-20, используемую как источник автономного водоснабжения установки и насосную станцию для подачи воды из водоема, и два автоприцепа для перевозки установки и лабораторного оборудования (рис. 3.34), а также специальные исследовательские установки. Моделирование дождей производят на стоковых площадках. Однако в большинстве случаев воспроизвести естественный дождь по всем его характеристикам оказывается невозможным. В связи с этим

моделирование обычно проводят по удельной мощности дождя (N , Вт/м²).

В зависимости от принципа получения капель искусственного дождя дождевальные установки бывают *капельными* и *насадковыми*. В капельных установках капли создаются с помощью отверстий в дне сосуда с водой, нитей, выпускаемых из отверстий, капиллярных трубок и медицинских игл, вставляемых в отверстия в дне таких сосудов. Такие установки воспроизводят равномерный, однородный крупнокапельный дождь. Мелкокапельный дождь создают в два этапа: сначала создают крупнокапельный дождь с помощью указанных установок, а затем дробят его на специальной сетке, натягиваемой на высоте 0,5 м над поверхностью почвы.

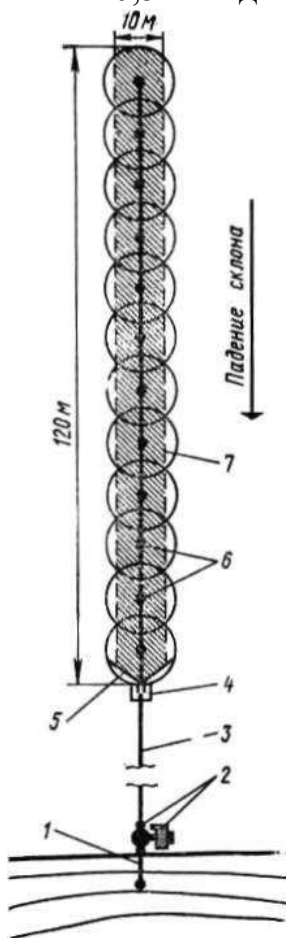


Рис.3.32. Стоковая площадка размером 10х120 м, орошаемая дождевальным крылом короткоструйной дождевальной установки [53]:

1 – водозабор,
2 – насосная станция,
3 – напорный трубопровод,
4 – водомерный ящик,
5 – водонаправляющие стенки стоковой площадки, 6 – дождевальные насадки КДУ, 7 – граница учетного участка

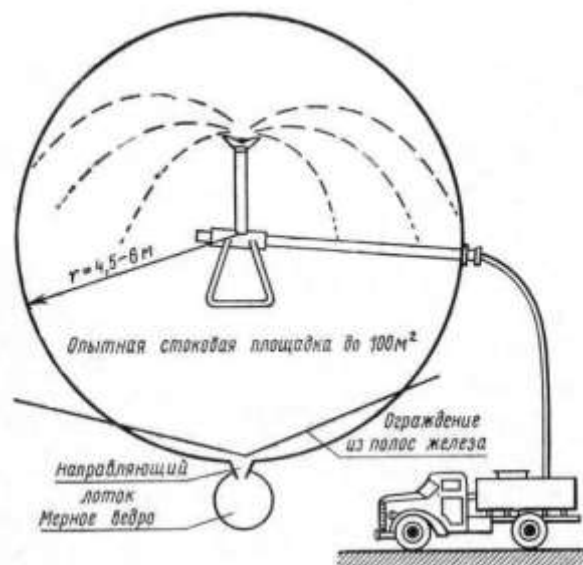


Рис. 3.33. Применение агрегата искусственного дождевания для изучения противоэрозионной стойкости почв в опытах В.С. Федотова [53]



Рис. 3.34. Агрегат искусственного дождевания (АИДа), разработанный В.С.Федотовым [53]

Насадковые дождевальные установки бывают трех видов: *струйные*, *дефлекторные* и *центробежные*. Они позволяют получать искусственный дождь высокой интенсивности, характеризующийся широким спектром размеров капель. Однако этот спектр отличается от природного. Кроме того, скорость падения капель отличается от скорости падения дождевых капель. Как отмечается в [53], такие установки неравномерно распределяют дождь по поверхности, поэтому конструкторы исследовательских установок продолжают

работу над устранением указанных недостатков.

Многочисленные исследования во многих республиках бывшего СССР проводились с помощью экспериментальной дождевальной установки ЭДУ-60, разработанной в Молдавском НИИ почвоведения и агрохимии В.М.Сахаровым, прототипом которой стала установка конструкции Одесского гидрометеорологического института. В результате модернизации ЭДУ-60 впоследствии В.М. Сахаровым был создан ее вариант УСДУ-67 – универсальная стоково-дождевальная установка (рис. 3.35). Она позволяет создавать дождь в диапазоне от морозящего до очень сильного ливня со слоем осадков от 5 до 250 мм. Площадь дождевания может варьировать от 1 до 10 м² [53].

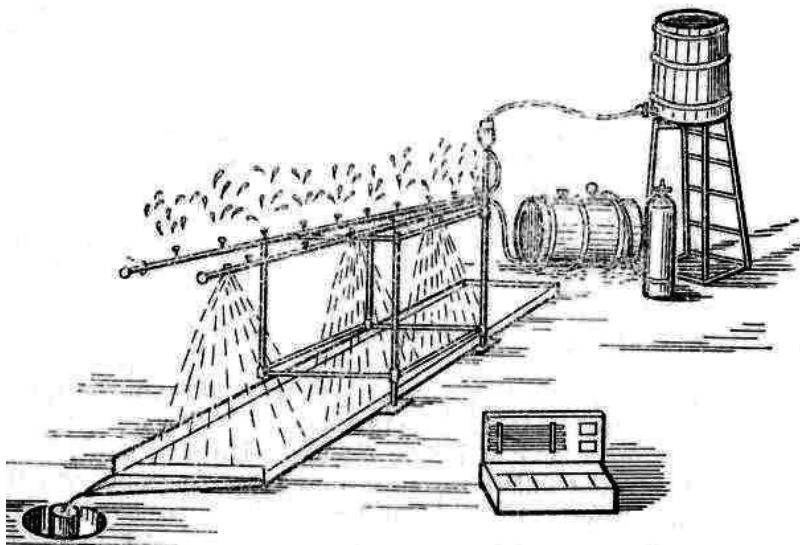


Рис. 3.35. Схема усовершенствованной дождевальной установки УСДУ-67 [53]

По аналогии с установкой ОГМИ на кафедре гидрологии Украинского института инженеров водного хозяйства Я.А.Мольчаком [132] была сконструирована дождевальная установка, позволяющая вести наблюдения при минимальном количестве экспериментаторов. Ее схема показана на рис. 3.36.

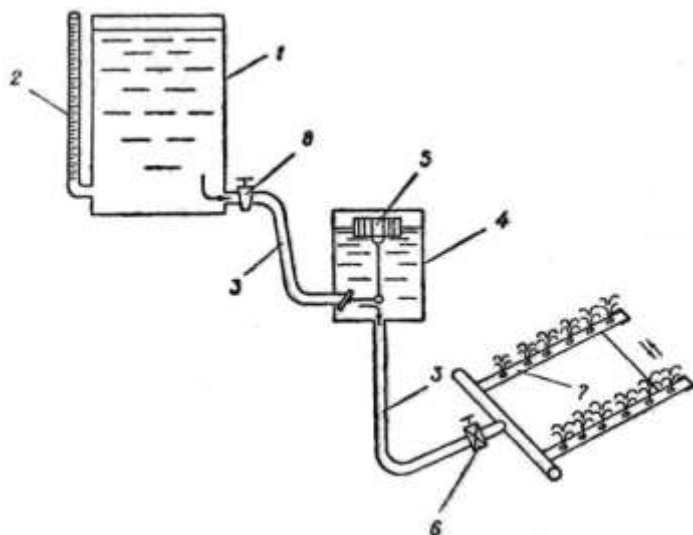
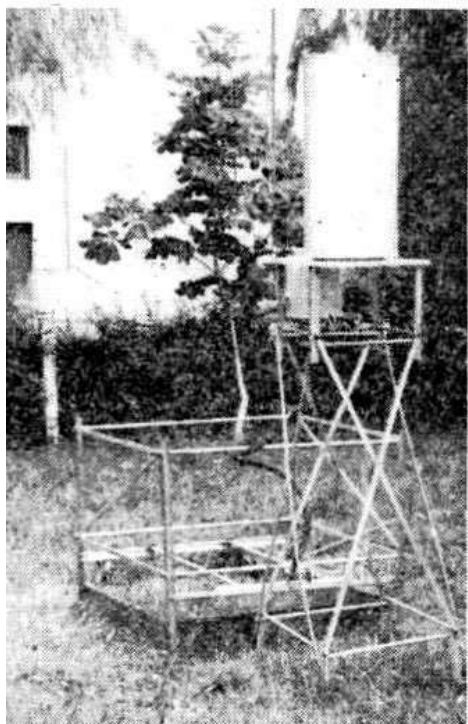


Рис. 3.36. Общий вид и принципиальная схема установки Я.А.Мольчака [132]: 1 – питающий бак, 2 – водомерное стекло, 3 – подающая трубка, 4 – напорный бачок, 5 – поплавок сифонного типа, 6 – вентильный кран, 7 – дождевальная рама

Дождевальная установка позволяет создавать большой диапазон интенсивности дождя (от 0,2 до 4,0 мм/мин). Изучение потерь ливневых вод проводили на площадках, имевших однообразный уклон и характерные, по возможности, для склонов микрорельеф и растительный покров. Во время опытов фиксировали время появления луж от начала дождя, начало стока, конец стока, конец впитывания.

Известна и установка Козлова [32], вода на которую подается путем распыления в воздухе струи, формируемой опрыскивателем (рис. 3.37).

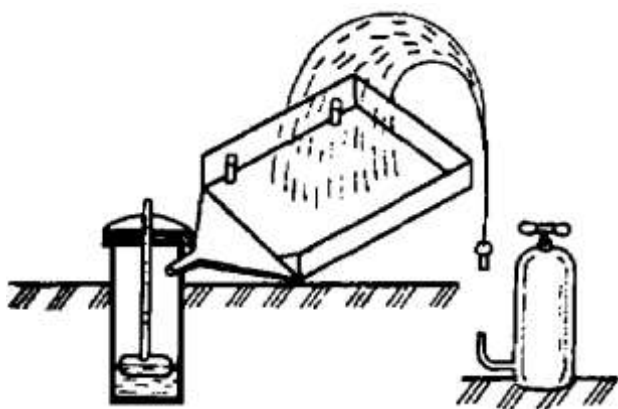


Рис. 3.37. Установка Козлова [32]

Аналогичное устройство имела и установка, применявшаяся в исследованиях лаборатории моделирования эрозионных процессов УНИИЗПЭ, руководимой А.Б. Лавровским, на основании которых им была разработана его известная модель эрозии. Разница в несколько больших размерах площадки и в том, что вода подавалась струей, формируемой с помощью насоса и устройства, подобного брандспойту.

На рис. 3.38 показаны стоковые площадки и дождевальная установка (*rainfall simulator*), применяемая в Южном Лимбурге (Нидерланды) для изучения эрозионных процессов методом искусственного дождевания, стокоприемное оборудование. В полном виде элементы площадок, оборудование и установку в работе можно увидеть на сайте Dr. F.J.P.M.Kwaad [222].



Рис. 3.38. Стоковые площадки с дождевальной установкой, использованные при разработке модели LISEM (фрагмент фотографии F.J.P.M.Kwaad [222]).

3.3.3 Дождевальная установка, разработанная в УНИИЗПЭ

Коллективом отдела противозрозионных комплексов (ПЭК) Украинского НИИ защиты почв от эрозии (УНИИЗПЭ, г. Луганск) в 1981-1984 гг. выполнялось моделирование ливневой эрозии на полях ОПХ «Ударник» с помощью дождевальной установки, разработанной под руководством Н.М.Шелякина. Установка описана в работе Головченко И.Н. [42] и состоит из четырех сборных дождевальных штанг (внутренний диаметр 1/2") с дождевальными насадками через 0,5 м (рис. 3.39), системы шлангов и трехходового крана с манометром.

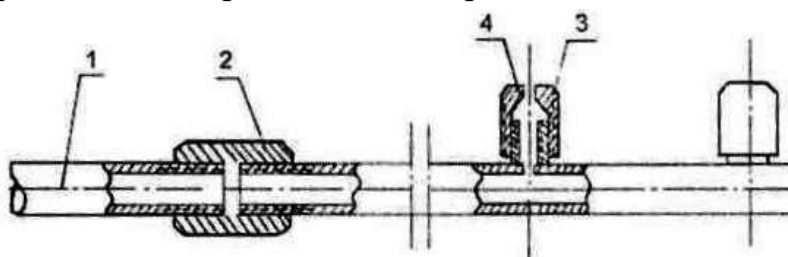


Рис. 3.39. Фрагмент дождевальной штанги:
1 – стальная труба;
2 – соединительная муфта; 3 – дождевальная насадка; 4 – отверстие

Дождевальная установка монтируется над стоковой площадкой шириной 4 м и длиной до 15 м с металлическими ограничительными бортиками сверху и сбоку, направляющими бортиками снизу, подводящими сток к водосливу-водомеру (рис. 3.40).

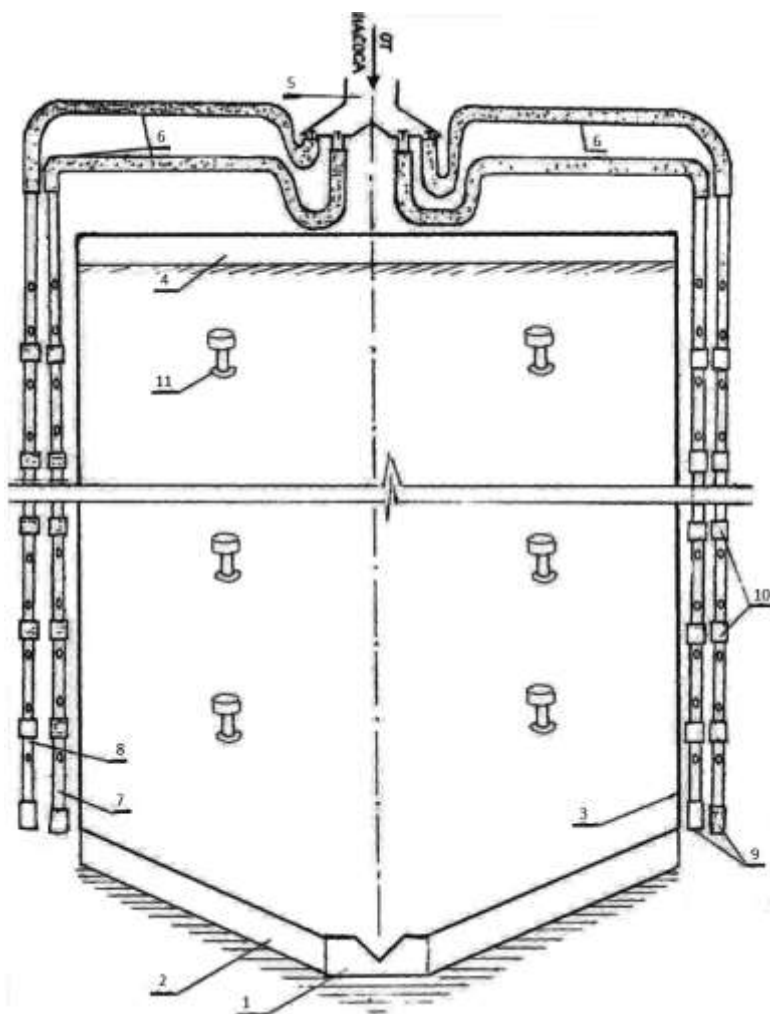


Рис. 3.40. Схема дождевальной установки конструкции УНИИЗПЭ (рисунок сделан А.Р.Зубовым с использованием элементов рисунка из работы [43]):
1 – водослив-водомер;
2 – направляющий бортик;
3 – боковой бортик;
4 – верхний бортик;
5 – трехходовой кран;
6 – шланги;
7, 8 – малая и большая дождевальные штанги;
9 – концевые заглушки;
10 – соединительные муфты;
11 – осадкомеры Давитая.

Дождевальные штанги устанавливаются попарно вдоль длинных сторон площадки на высоте 30-35 см от поверхности почвы с помощью штыревых стоек, заглубляемых в землю. Конструкция крепления позволяет менять наклон оси насадок путем поворота штанг вокруг своей оси и фиксировать нужное положение зажимными винтами, имеющимися на каждой стойке (рис. 3.41-3.43).

Длину площадок изменяли от 5 до 15 м, соответственно площадь менялась от 20 до 60 м². Вода подавалась в штанги под давлением с помощью сборного пожарного шланга длиной до 300 м от гидранта, специально врезанного в трубопровод, ведущий от насосной станции, расположенной на берегу Роскошнянского пруда, к участку орошаемого земледелия хозяйства «Ударник».

Через насадки с отверстиями диаметром 1,5 и 2,5 мм вода из штанг под давлением поднималась в виде струй на высоту до 7,5-8 м, распылялась и в виде капель размером до 5 мм падала, равномерно покрывая всю стоковую площадку.

Нужное давление на входе в установку контролировалось по манометру и задавалось с помощью задвижки гидранта. Меняя положение рукояти трехходового крана в работу включали поочередно пары штанг с размером отверстий в насадках диаметром 1,5 и 2,5 мм, а затем обе пары вместе. Интенсивность дождя за счет этого изменялась по ступенчатому графику: 9 минут – 0,8 мм/мин; 5 мин. – 1,7; 4 мин. – 3,5; 5 мин. – 1,7; 9 минут – 0,8 мм/мин.

Общий слой ливневой части осадков (свыше 0,5 мм/мин) был около 50 мм и по расчетам [122] соответствовал ливням 10%-ной обеспеченности.



Рис. 3.41. Дождевальная установка, подготовленная к работе
(фото Зубова А.Р.)



Рис. 3.42. Предварительное увлажнение почвы дождем малой интенсивности (фото Зубова А.Р.).



Рис. 3.43. Работа с предмаксимальной интенсивностью дождя, равной 1,7 мм/мин (фото Зубова А.Р., 1984 г.)

Эксперименты 1981-1984 гг. выполнялись сотрудниками отдела противоэрозионных комплексов УНИИЗПЭ, руководимого Н.М. Шелякиным:

С.О. Алиевым, Ю.Н. Мельниковым, А.Р. Зубовым, Ю.И. Колесниковым, В.В. Михайловым, В.Ф. Грининой, Л.М. Заика, Е.В. Емец, С.Г. Зуевой и др. под научным руководством В.А. Белолипского и по спланированным им схемам.

Исследования показали, что в весенне-летний период в Донбассе наиболее стокообразующим фоном в почвозащитном севообороте являются посевы яровых колосовых культур (ячмень, однолетние травы). В 1984 году изучались следующие виды зяблевых обработок в динамике развития ярового ячменя:

1. Плоскорезное рыхление КПГ-250 на 20-22 см (контроль).
2. Плоскорезное рыхление на 14-16 см + щелевание на 40-42 см.
3. То же + кротование на 50-55 см.
4. Плоскорезное рыхление на 20-22 см вдоль склона.
5. Вспашка на 20-22 см.

Плоскорезное рыхление и щелевание выполнялось в направлении горизонталей, кротование (рис. 3.44) – под углом к ним в пространстве между валами-канавами как водоотводящий прием.

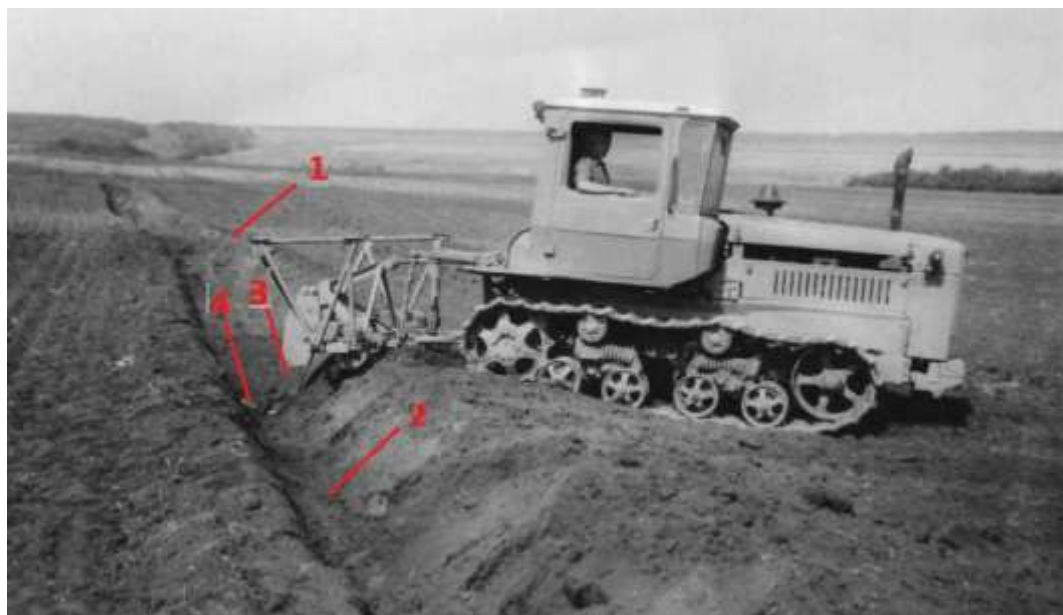


Рис. 3.44. Нарезка кротовин кротователем КТД-А из полости вала-канавы (фото Зубова А.Р.): 1 – гребень вала; 2 – дно канавы»; 3 – нож кротователя; 4 - дренаж

На основании результатов опытов, обработанных В.А. Белолипским и С.В. Зуевой математико-статистическим методом Брандона [211], было получено уравнение регрессии, описывающее влияние почвенных, метеорологических, топографических и др. факторов на формирование стока Q (мм) [18]:

$$Q = 8,983 \cdot 10^{-7} \cdot X_1^{3,65} \cdot X_2^{4,35} \cdot X_3^{2,48} \cdot X_4^{-0,43} \cdot X_5^{-0,53} \cdot X_6^{0,7} \cdot X_7,$$

где X_1 – интенсивность впитывания агрофона, мм/мин;

X_2 – эрозионный индекс дождя; X_3 – влажность почвы в слое 0-20 см, %;

X_4 – емкость нанорельефа поверхности пашни, м³/га;

X_5 – проективное покрытие почвы растительностью, %;

X_6 – длина склона, м; X_7 – его крутизна.

Результаты исследований [18, 57] свидетельствуют о высокой эффективности кротования как агротехнического мероприятия. Если на фоне плоскорезной обработки на 20-22 см в период всходы-кущение (проективное покрытие 31-34%) сток был наибольшим – 7,3 мм, а на фоне плоскорезной обработки с щелеванием несколько меньшим – 6,8 мм, то на фоне плоскорезной обработки с щелеванием и кротованием он уменьшился до 1,64 мм – на 78%.

Стокорегулирующая роль кротования объясняется повышением водопроницаемости почвы за счет глубокого вертикального и горизонтального дренирования почвы. Водопроницаемость почвы, как видно из уравнения регрессии, является решающим фактором формирования ливневого стока. При увеличении проективного покрытия по мере развития растений показатели стока снижаются, а при увеличении влажности почвы до 26-32% сток на плоскорезной обработке увеличивается до 19,7 мм, на плоскорезной обработке вдоль склона за счет снижения емкости микрорельефа сток возрастает до 44,7 мм.

Расположение обработки по склону имеет место и при контурно-параллельной организации территории – на элементарных водосборах ложбин. За счет наложения основного (уклон местности) и вторичного (уклон склонов ложбин к линии их тальвега) уклонов в пределах ложбин и их водосборов возрастает крутизна водосборной поверхности, и это наряду со снижением емкости микрорельефа способствует резкому усилению стока и эрозионных процессов на ложбинистых склонах.

Таким образом, можно сделать вывод, что в условиях Донбасса для зарегулирования ливневого стока необходимо наряду с приемами почвозащитной агротехники использовать ПЭГТС, стокорегулирующие лесные полосы с гидротехническим усилением, причем особое внимание следует уделять надежности этих объектов в ложбинах, где формируется более интенсивный сток и происходит его концентрация по тальвегам.

Таблица 3.3

Поверхностный сток на посевах ярового ячменя, мм

Агрофон (обработка почвы)	Крутизна склона, град	Влажность почвы (0-20 см)		
		19-25%		26-32%
		проективное покрытие, %		
		30-40	41-50	41-50
Плоскорезная на 20-22 см (контроль)	3,8-5,0	7,3	2,13	19,7
Плоскорезная на 14-16 см + щелевание на 40-42 см	3,8-5,0	6,8	2,05	15,3
То же + кротование	3,8-5,0	1,6	0,88	8,9
Плоскорезная на 20-22 см вдоль склона	5,1-8,0	24,8	13,5	44,7
Вспашка на 20-22 см	3,8-5,0	7,1	2,10	19,0

Усовершенствования методики дождевания с использованием установки конструкции УНИИЗПЭ, выполненные в отделе ПЭК.

1. Поскольку длина стоковой площадки (15 м) не позволяет получить достоверные значения стока и смыва на большей длине склона, предложено моделировать эрозионное действие водного потока на требуемой длине склона с использованием дождевальной установки совместно с устройством,

позволяющим имитировать подток воды с вышележащего склона [44].

Сущность предложенного метода заключается в поочередном дождевании элементарных участков склона по всей его длине с подливом воды в объеме стока с вышележащего участка. Исследование начинают с дождевания самого верхнего участка склона. При этом определяют интенсивность дождя, отмечают время начала стока, величину стока и мутность воды за каждые пять минут. Затем приступают к дождеванию следующей, идущей ниже по склону площадки, с подливом объема воды, равного объему стока с вышележащей площадки. Подлив производят специальным устройством, позволяющим поддерживать требуемую интенсивность подтока воды и ее мутность. Началом подлива является время появления стока на предыдущей площадке.

Результаты исследований, выполненных на фоне поверхностных обработок после ярового ячменя (почва-чернозем обыкновенный, склон крутизной 2-3°) по данному методу, показали следующее. При ливне слоем 116-120 мм (интенсивность 1,48-1,55 мм/мин) на фоне лушения почвы БИГ-3 с увеличением длины склона происходит уменьшение слоя стока с 42,8 мм на 15-метровой площадке до 21,9 мм на 45-метровой, т.е. наблюдается обратная зависимость (коэффициент, корреляции $R=0,96$). Такая же закономерность замечена и на фоне дисковой обработки вдоль склона. На фоне дискования, выполненного поперек склона, отмечалось увеличение слоя стока с 9,8 до 11,5 мм [43].

2. Недостатком описанной выше установки являлась привязанность к трубопроводу, способному обеспечивать подачу воды с требуемым напором и расходом. Он был исправлен тем, что на объекты стала вывозиться трактором К-700 спаренная цистерна общей емкостью 8 м³, установленная на шасси грузовика ГАЗ-51, а для подачи воды из нее в установку стала использоваться мотопомпа.

3. В 1986 году Ю.И. Колесников установил на заднюю подвеску трактора ДТ-25 «Владимирец» центробежный насос, работающий от вала отбора мощности, и применил двухколесную цистерну емкостью 1,8 м³. Размеры площадки были уменьшены до 3 x 5 м. Это сделало установку автономной и мобильной, стало возможным выезжать даже на крутосклонные участки кормовых угодий. Личный опыт А.Р. Зубова работы с установкой совместно с Ю.И. Колесниковым подтверждает возможность работы с ней даже вдвоем.

3.3.4 Дождевальная установка конструкции ЛИАПП

Как уже говорилось в разделе 1.1, при формировании поверхностного стока различают межручейковую и ручейковую эрозию. Первая происходит при стекании воды слоем, соразмерным по высоте с почвенными агрегатами. Именно от количества свободной воды, формирующейся в таких условиях, и способности почвенных частиц к отделению зависит размер стока и его дальнейшая эрозионная работа в ручейковой сети.

При ширине стоковой площадки, равной 4 м, как это было в опытах с установкой УНИИЗПЭ (раздел 3.3.3), на ней имеются условия для формирования обоих видов эрозии, сходных с естественными до определенной длины склона, - при условии использования подтока воды. В этом состоит выгодное отличие дождевальной установки УНИИЗПЭ от многих вышеописанных. Но трудности 90-

х годов заставили многих ученых искать менее трудоемкие методы исследований, сосредоточившись на раздельном изучении вышеуказанных видов эрозии.

Этому способствовала разработка новой дождевальной установки в бывшем УНИИЗПЭ, переименованном в 1992 году в Институт охраны почв УААН, который, будучи закрыт в 1997 г., вошел в три сохранившиеся лаборатории (в их числе и лаборатория защиты почв от эрозии) в новообразованный (на базе Луганской государственной опытной с.-х. станции в п. Металлист) Луганский институт агропромышленного производства (ЛИАПП) УААН.

Разработке установки предшествовал опыт работы к. с.-х.н. Тарасова В.И. с ее прототипом [212] в период стажировки в Аргентине (Институт почв, Буэнос-Айрес). Выявленные недостатки установки позволили ему сконструировать новую (рис. 3.45).

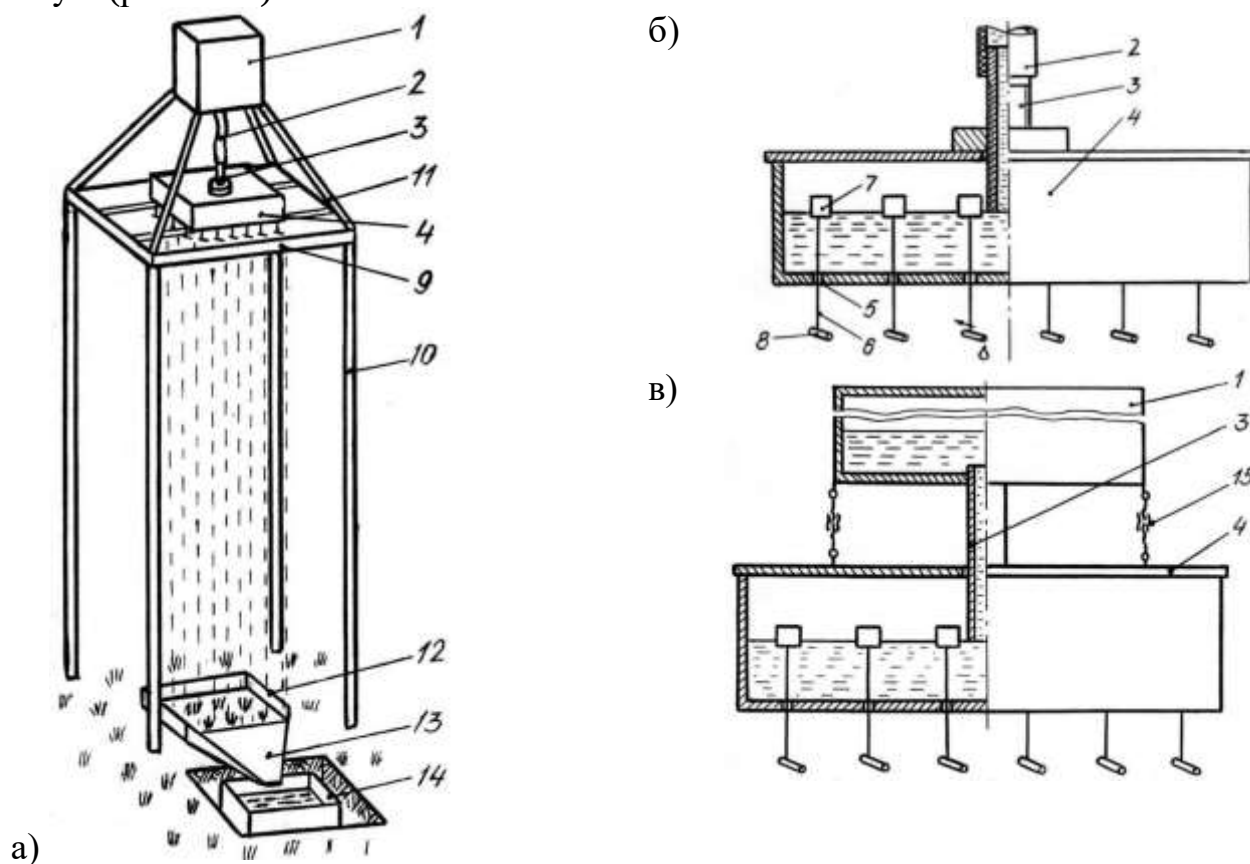


Рис. 3.45. Общий вид установки конструкции ЛИАПП (а); варианты сопряжения резервуара и дождевателя (б и в)

Дождевальная установка защищена патентом Украины [145]. Она состоит из герметичного резервуара 1, шланга 2, регулирующего штуцера 3, дождевателя 4 с отверстиями 5 в дне, через которые пропущены каплеобразователи в виде нитки 6 с поплавком 7 на верхнем конце и наклоненным стержнем 8 на нижнем конце, несущей конструкции, которая состоит из опорной рамки 9, четырех стоек 10 и кронштейна 11. Диаметр отверстий 1 мм, а длина нитей каплеобразователя превышает максимально возможный уровень воды в дождевателе 4. Из резервуара 1 вода поступает по шлангу 2 с штуцером 3 на конце в дождеватель 4. Через отверстия 5 в его дне капли воды стекают по нитям 6 и стержням 8 и падают на стоковую площадку, ограниченную металлической рамкой 12

размером 0,5 x 0,5 м. Перед отрывом - при стекании вдоль стержня 8 капли придают ему горизонтальный импульс, стержень раскачивается в разных направлениях, вследствие чего обеспечивается равномерное распределение капель по площадке, в отличие от прототипа.

При снижении уровня воды в дождевателе 4 ниже торца штуцера 3 в резервуар 1 поступает воздух, поэтому из него вытекает порция воды, восстанавливая заданный уровень, обеспечивающий необходимую интенсивность дождя.

Регулирование интенсивности дождя (в прототипе его не было) осуществляется перемещением штуцера вверх или вниз при вращении фиксирующей гайки, накрученной на его резьбовую часть (рис. 3.48 а). Вода, не впитавшаяся в почву, и смытый ею мелкозем через лоток 13 поступают в стокоприемную емкость 14, что позволяет измерять величину поверхностного стока воды и потерь почвы от межручейковой эрозии.

Подача воды из резервуара в дождеватель может осуществляться и без шланга (рис. 3.48 б). В этом случае верхний конец штуцера вмонтирован в резервуар, который устанавливают непосредственно на крышку дождевателя. Регулирование напора воды в последнем выполняется путем регулирования положения резервуара по высоте относительно дождевателя с помощью, например, винтовых стоек 15 или прокладок различной толщины. Такое техническое решение позволяет уменьшить габариты установки.

Эффект от использования разработанной дождевательной установки заключается в упрощении исследований, для которых достаточно 2-3 исполнителей, повышении их информативности и достоверности их результатов.

В ходе опытов, проводившихся сотрудниками лаборатории защиты почв от эрозии ЛИАПП в 2000-2003 гг. под руководством А.Р. Зубова, имитировался дождь различной обеспеченности, интенсивностью от 0,5 до 3,5 мм/мин на площади 0,25 и 0,0625 м², высота дождевания 2 и 1,5 м, диаметр капли 4,7 мм.

В одном из экспериментов, результаты которого приводятся для примера, исследовалось влияние на формирование жидкого и твердого стока следующих факторов: крутизна склона, проективное покрытие, влажность и объемная масса почвы. План эксперимента предусматривал дождевание 36 узловых точек, охватывавших все виды угодий. График дождя ступенчатый: первые 10 мин - 10 мм (интенсивность дождя 1 мм/мин), следующие 10 мин - 30 мм (3 мм/мин), третьи 10 мин - 10 мм. Высота дождевания 1,5 м, размер площадки 25 x 25 см.

Обработка результатов дождевания показала, что в наибольшей степени на формирование стока и смыва почвы влиял агрофон. Результаты анализа данных с площадок на разных агрофонах, объединенных в 6 групп, без учета различий во влажности почвы, проективном покрытии, уклонах и других факторах, приведены в табл. 3.4. Наиболее эрозионно-опасным агрофоном были пропашные культуры, что является следствием как низкой противоэрозионной стойкости почвы, так и их довольно значительной стокоформирующей способности. На отвальной пахоте формировался самый слабый сток, поэтому она не стала наиболее опасным агрофоном, хотя, бесспорно, ее противоэрозионная стойкость тоже низкая.

Данные табл. 3.4 свидетельствуют, что в период ливневой активности (май

– август) поверхность почвы характеризуется открытостью после уборки зерновых и силосных культур.

Таблица 3.4

Интервалы варьирования факторов в экспериментах с дождеванием

Номер узловых точек	Элемент ландшафта, агрофон	Крутизна склона, град	Проективное покрытие, %	Влажность почвы, %	Объемная масса почвы, г/см ³
1-5	Пропашные культуры	1,5-7	0-100	7,2-9,8	1,14-1,32
6-10	Стерня яровых зерновых	2-7	2-40	4,5-6,5	1,20-1,36
11-15	Многолетние травы	2-8	20-80	9,7-13,1	1,18-1,53
16-18	Отвальная обработка	2-6	1-2	13,2-28	1,00-1,02
19-24	Дискование на 8-10 см	2-7	0-30	6,4-43,3	1,00-1,23
25-29	Естеств. кормовые угодья	1,5-12	10-90	7,9-12,2	1,09-1,45
30-32	Полотно дороги	2-7	1-5	9,5-9,6	1,29-1,39
33-36	Лесные полосы	2-7	0-90	8,0-14,0	0,92-1,28

Таблица 3.5

Сток и смыв почвы на разных агрофонах и элементах агроландшафта

Элемент агроландшафта, агрофон	Слой стока, мм	Коэффициент стока	Смыв почвы, т/га	Относительная эрозионная опасность
Полотно дороги	22,5	0,450	4,70	3,05
Естественные кормовые угодья	13,8	0,280	0,06	0,04
Многолетние травы	12,6	0,250	0,09	0,06
Стерня яровых зерновых	10,0	0,200	0,33	0,21
Пропашные	8,5	0,170	1,54	1,00
Дискование трав и пропашных	6,8	0,140	0,99	0,64
Отвальная пахота	5,0	0,100	0,59	0,38
Лесные полосы	1,8	0,036	0,13	0,08

Послеуборочное рыхление почвы приводит к уменьшению проективного покрытия растительными остатками от 3-5% после дискования до 1% после пахоты. Плотность почвы уменьшается на 0,23-0,32 г/см³. Вследствие этого стокоформирующая способность снижается в 1,4-2,5 раза на фоне уменьшения почвозащитной способности агрофонов в 1,6-12 раз. При увеличении проективного покрытия от 0 до 100% смыв почвы, в среднем по агрофонам, уменьшался на 63%. Важным фактором стока и смыва была влажность почвы.

Опасность для устойчивости ландшафта создают кормовые угодья и многолетние травы при их размещении выше эрозионно-нестабильных фонов, так как на них формируется наибольший сток.

Эрозионный индекс осадков. Ввиду существенных различий параметров дождя, создаваемого разными установками, между собой и их отличия от параметров естественного дождя (по скорости падения капель, спектру дождя, графику изменения интенсивности) важно уметь сопоставлять все виды дождя.

Для этого используют *эрозионный индекс дождя*: EI_{30} (в модели USLE) или $R = EI_{30}/100$ и $R = EI_{10}/100$, для которых в МГУ им. М.В. Ломоносова разработано районирование европейской части СССР [53, рис. 37, 38]. Множитель E – это

общая энергия дождя; I_{30} или I_{10} – его средняя интенсивность за интервал продолжительностью 30 или 10 мин с наибольшей интенсивностью.

В нашем случае $I_{10} = 3$ мм/мин. По формуле 3.7 а, зная диаметр капель $D=4,7$ мм и высоту их падения $H=1,5$ м, определяем их скорость: $v = 5,7$ м/с. По формуле 3.2 определяем удельную кинетическую энергию дождя: $E = 0,5 \cdot X \cdot v^2 = 0,5 \cdot 50 \cdot 5,7^2 = 812$ Дж/м². Тогда $R = EI_{10} = 812 \cdot 3/100 = 24,4$. В модели USLE индекс будет иным, поскольку в ней используются другие единицы: дюйм, дюйм/с, дюйм/ч, акр.

3.3.5 Методика определения параметров противэрозионной стойкости почв на основе модели водной эрозии WEPP

Деление поверхности склона на зоны ручейковой (*rill*) и междручейковой эрозии (*interrill*) является основой идеологии модели Water Erosion Prediction Project (WEPP) [215], описанной С.Ю.Булыгиным и соавт. [27]. А для оценки эрозионной устойчивости почвы в модели используют три параметра:

- критическое давление (напряжение) сдвига потока (τ_p , Па);
- коэффициент ручейковой эрозионной стойкости (K_r , с/м);
- коэффициент междручейковой эрозионной стойкости (K_i , г*с/м⁴).

Определения этих параметров проводят эмпирически - по результатам полевых экспериментов.

Изучение междручейковой эрозии. Для определения параметров эрозионной устойчивости почвы для междручейковой водной эрозии в работе С.Ю. Булыгина и соавт. [27] рекомендовано использовать вышеописанную установку. Изготовленная в ЛИАПП по просьбе д.с.-х.н. Булыгина, она была использована в опытах Института почвоведения и агрохимии им. А.Н. Соколовского в Харьковской области, а позднее в исследованиях, проводившихся под руководством академика НААН Тарарико А.Г. в Киевской области.

Формула определения параметров эрозионной устойчивости почвы для междручейковой эрозии, используемой в модели WEPP, согласно [27] имеет вид:

$$D_i = K_i \cdot I^2 \cdot S_f$$

где D_i - интенсивность междручейковой эрозии, кг/м²*с; K_i - эмпирический коэффициент междручейковой эрозионной устойчивости почвы; I – интенсивность дождя, м/с.

Показатель S_f характеризует влияние уклона поверхности и рассчитывается по формуле: $S_f = 1,05 - 0,85 \cdot e^{-4 \sin \alpha}$, где α – крутизна склона, град.

Повторность опытов трехкратная. Дождевание выполняется по плювиограмме типичного для данной территории дождя 10% обеспеченности (вероятности превышения). Все время дождя делится на четыре периода, равные по длительности. Для каждого периода рассчитывается средняя интенсивность дождевания. Для определения параметров ливня 10% обеспеченности для конкретного региона Украины следует пользоваться картосхемой эрозионной ливневой опасности [26, 27], таблицами 2.10 «Параметры и форма кривых типичных ливней разной вероятности превышения (%)» и 2.11 «Плювиограммы типичных ливней разной обеспеченности по регионам» ([27]).

Согласно [27] перед первым режимом проводится "промывка" площадки, то есть первый период начинается с момента, когда возникает сток.

В каждом периоде дождевания осуществляется отбор образца воды на мутность (M) в поллитровые емкости. Определяется общий объем (V) стока. Измеряется уклон поверхности.

В дальнейшем проводится вычисление величины интенсивности междручейковой эрозии (удельного расхода смываемой почвы, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$):

$$D_i = M \cdot V / (S \cdot T),$$

где S - площадь стоковой площадки, м^2 ; T - длительность дождевания.

Определение коэффициента междручейковой эрозионной устойчивости почвы (K_i) выполняется графическим методом. По полученным данным строится график, на вертикальной оси которого откладываются значения величин междручейковой эрозии (S), а на горизонтальной - произведение интенсивности дождя во второй степени на фактор рельефа: $I^2 \cdot S_f$.

На график наносятся данные по всем повторностям эксперимента. Коэффициент междручейковой эрозионной устойчивости определяется, согласно [27], как тангенс угла наклона линии графика к оси ОХ. Поскольку ее наклон зависит и от масштабов осей, считаем нужным уточнить, что определять следует не тангенс в буквальном смысле, а угловой коэффициент как отношение ординаты произвольной точки линии к ее абсциссе, выраженной, как и ордината, в размерностях осей. Таким образом, K_i определяет рост междручейковой эрозии относительно влияния факторов дождя и рельефа.

Изучение ручейковой водной эрозии. Определение параметров эрозионной устойчивости почвы для ручейковой эрозии согласно [27] осуществляется с помощью активного полевого эксперимента – путем моделирования ручейковой эрозии напуском воды по искусственным бороздам без привнесения энергии капель дождя (по методике модели WEPP).

Формирование борозды происходит так: на почву кладется доска длиной 3 м, шириной 0,15 м и 0,03-0,05 м толщиной. По бокам доску засыпают почвой, которую потом немного смачивают водой и утрамбовывают. После этого доску осторожно снимают. В результате создается искусственная борозда, при этом ее дно остается в первичном естественном состоянии. Высота бортов не должна превышать 5 см, и быть менее 2 см.

В нижнем конце борозды устанавливается водонаправляющий желоб для приема стока. За желобом выкапывается яма, в которую устанавливают емкость для измерения объема стока (расходов воды).

Моделирование ручейковой эрозии проводится в 3-х повторностях. Каждая повторность эксперимента выполняется на одной искусственной борозде. В каждой повторности подача воды в борозду осуществляется в четырех разных по интенсивности режимах ее расхода. Интенсивности стока могут колебаться в диапазоне от 0,2 л/с до 3 л/с.

В каждом режиме осуществляются:

- 4 измерения скорости стока методом окрашивания водных струй;
- 3-х разовый отбор образцов воды на мутность в поллитровые емкости;

- 3-х разовое измерение расходов воды объемным методом.

В дальнейшем проводится усреднение для характеристики каждого режима одним усредненным значением каждого показателя.

Обработка результатов экспериментов ведется по следующему алгоритму:

1) Определяют скорость потока (v , м/с) по формуле: $v = L/t_1$; где L – длина борозды, t_1 – время прохождения расстояния L окрашенной водой, с. Полученная величина скорости умножается на коэффициент 0,6, отображающий неравномерность скорости потока по его ширине.

2) Определяют расход воды (Q , м³/с): $Q = V/t_2$, где V – объем емкости, м³; t_2 – время наполнения мерной емкости, с.

3) Рассчитывают площадь живого сечения потока (ω (м²): $\omega = Q/v$;

4) Рассчитывают смоченный периметр потока (m): $\chi = b + 2h$, где b – ширина потока, м; h – его глубина, равная ω/b .

5) Рассчитывают гидравлический радиус потока (m): $R = \omega/\chi$;

6) Сдвиговое давление потока (τ , Па) определяется по уравнению: $\tau = \rho g R S = \rho g (v^2/C^2)$, где ρ – плотность воды (1000 кг/м³); $g = 9,81$ м/с², S – уклон поверхности, C – коэффициент Шези.

Коэффициент Шези определяется из значения коэффициента Дарси-Вейсбаха (f) по формуле: $C = 8/f^{1/2}$.

Коэффициент f определяется по формуле Шоу: $f = 8 \cdot g \cdot R \cdot S \cdot (v^2/C^2)$.

7) Рассчитывается удельный расход воды (м²/с): $q = Q/b$;

8) Рассчитывается удельный расход смываемой почвы (кг/м²*с): $q_s = q \cdot M$, где M – мутность потока, кг/м³.

По полученным данным строится график, на вертикальной оси которого откладываются значения удельных расходов почвы, а на горизонтальной – значение давления сдвига потока. Критическое сдвиговое давление (τ_c) потока определяется как значение абсциссы пересечения прямой линии с осью ОХ, а коэффициент ручейковой эрозионной устойчивости (K_r) характеризуется «тангенсом» угла наклона прямой к оси ОХ. Таким образом, физический смысл τ_c заключается в значении сдвигового давления потока, при котором начинается процесс интенсивного выноса почвы, а K_r определяет его интенсивность [27].

Кроме эмпирического определения критического давления сдвига авторы [27] рекомендуют его определение с помощью значения критической донной размывающей скорости ($V_{др\omega}$), определяемого по формуле М.С.Кузнецова (1.6, раздел 1.2.2). Зная ее, выражаем R , используя формулу Шоу, приравняв скорость V значению $V_{др\omega}$, т.е. $R = (V_{др\omega}^2 \cdot f) / (8g \cdot S)$.

Для почвы без живых растительных остатков f , согласно [27], равен 1,1. Тогда $\tau = \rho g R S = \rho g S (V_{др\omega}^2 \cdot f) / (8g \cdot S) = 138,75 \cdot V_{др\omega}^2$.

Главными параметрами, определяющими $V_{др\omega}$ по формуле (1.6) являются средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов и связность агрегатов. Первый параметр определяют методом мокрого просеивания на ситах по методу Савинова. Связность агрегатов авторы [27], ссылаясь на М.С.Кузнецова и соавт. (1988), рекомендуют определять по значению гидравлической связности ($C_{гс}$) методом размыва образца почвы струей воды. Данный метод описан в разделе 4.1.

3.3.6 Моделирование дождевого стока как фактора эрозионных и оползневых явлений на поверхности породных отвалов угольных шахт Донбасса

Исследования проводились Ю.И. Макаришиной в процессе выполнения ею диссертационной работы под руководством проф. Зубовой Л.Г. - на типичном для Луганской области недействующем породном отвале № 1 шахты поселка Сутоган [77]. Отвал имеет высоту 35 – 45 м. Эксплуатация отвала закончилась в 70-е годы прошлого века. В 80-е годы проведена его рекультивация, горнотехнический этап которой заключался в срезке конусной верхушки, биологический – в посадке на склонах саженцев древесных культур.

С западной стороны к отвалу № 1 примыкает породный отвал № 2, который также переформировывался со срезкой верхушки, нанесением плодородного слоя и высадкой саженцев. Отвал № 2 имеет высоту 20 – 30 м.

На данный момент на склонах и плоской верхушке растет, в основном, акация белая (*Robinia pseudoacacia*). Травянистый покров на отвале неоднороден и представлен типичными для степной зоны растениями: пырей ползучий, березка полевая, подорожник ланцетолистный, горошек мышиный и др.

Моделирование ливневых осадков выполнялось с помощью переносной дождевальной установки (рис. 3.46), изготовленной Ю.И. Макаришиной по образцу вышеописанного имитатора дождя, разработанного в ЛИАПП [146].

Дождевание проводилось на плоской верхушке и склоновой части отвала.



Рис. 3.46. Дождевальная установка на отвале (фото Ю.И. Макаришиной)

Вариантами опыта на верхушке были такие участки: без растительности – вариант 1.1; с древесной растительностью – вариант 1.2; с травянистой растительностью – вариант 1.3.

Вариантами на откосах были участки: на теле оползня (северный склон) – вариант 2.1; по линии отрыва тела оползня (поверхности скольжения) – вариант 2.2; на ненарушенном участке северного склона (контроль) – вариант 2.К.

График дождя приняли ступенчатым (табл. 3.6) с приближением к плювиограммам типичных дождей обеспеченностью 5, 10, 20 и 30 %, разработанным в ННЦ «Институт почвоведения и агрохимии им. А. Н. Соколовского» НААН для эрозионного района 2f [27], к которому относится опытный объект.

Таблица 3.6

Планируемые условия проведения опыта

Обеспеченность Р, %	Фаза дождя	Продолжительность, мин.	Слой осадков, мм	Интенсивность дождя, мм/мин		Напор в дождевателе установки, мм
				средняя за фазу	средняя за дождь	
5	1	15	17,4	1,16	2,01	5
	2	15	30,0	2,00		15
	3	15	34,7	2,31		20
	4	15	38,7	2,58		25
	Весь дождь	60	120,8			
10	1	9	2,5	0,28	1,35	1
	2	9	10,4	1,16		5
	3	9	14,8	1,64		10
	4	8	18,5	2,31		20
	Весь дождь	35	47,2			
20	1	6	3,3	0,53	1,20	1
	2	6	7,0	1,17		5
	3	7	10,3	1,47		8
	4	7	11,5	1,64		10
	Весь дождь	26	32,1			
30	1	7	3,7	0,53	1,01	1
	2	7	7,3	1,04		4
	3	8	11,8	1,47		8
	Весь дождь	22	22,8			

Для создания требуемой интенсивности дождя в дождевателе установки поддерживался соответствующий напор (табл. 3.6) согласно графика (рис. 3.47), полученного в результате тарировки установки.

Опыты проведены в трехкратной повторности. Для каждой интенсивности дождя определяли объем жидкого стока, рассчитывали мутность стока и смыв породы в пересчете на один гектар. Результаты приведены в табл. 3.7.

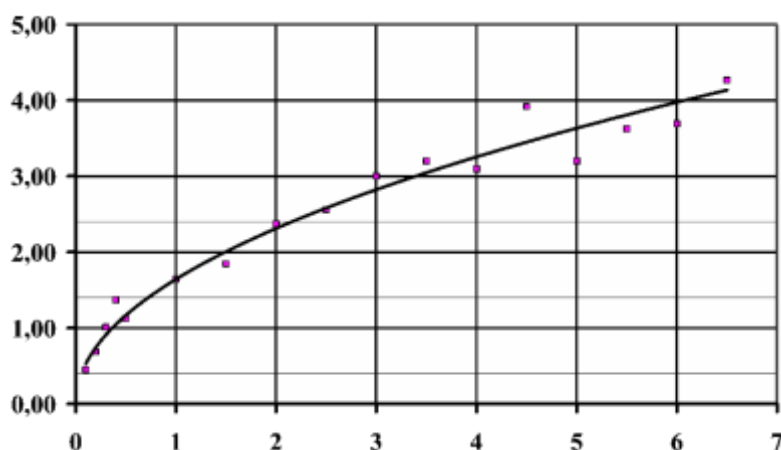


Рис. 3.47. График тарировки дождевателя установки (по оси абсцисс – напор в см, по оси ординат – интенсивность дождя, мм/мин)

Водно-физические свойства отвальной породы изучали по общепринятым методикам: объемную массу – методом режущего кольца Качинского; влажность – термостатно-весовым методом по слоям высотой 10 см; водопроницаемость – методом заливки трубок длиной 100 мм, заглубленных в грунт на 5 см с поддержанием слоя воды высотой 5 см – и это **пример правильного подхода к**

опытам с дождеванием, когда водопроницаемость определяют отдельно, а не по разности осадков и стока, который, как известно, зависит от осадков.

Почти на всех исследуемых участках, кроме тела оползня, сток формировался при выпадении слоя осадков высотой не менее 46 мм, т. е. осадков обеспеченностью не выше 10 %.

Таблица 3.7

Характеристика стока и смыва по вариантам опыта

Геоморфологическая, ботаническая и почвенная характеристика				Метеорологические условия и эрозионно-гидрологические характеристики опытов				
Вариантов опыта	стоковых площадок			слой осадков, мм	скорость впитывания осадков, мм/мин	слой стока, мм	коэффициент стока	смыв породы, т/га
	уклон, град	объемная масса, г/дм³	интенсивность фильтрации, мм/мин					
Без растительности	Плоская вершина							
	1,5	1,44	0,95	120	1,81	11	0,09	0,25
	2,0	1,53	0,81	46,4	1,24	2,9	0,06	0,11
	2,0	1,55	0,79	32	1,23	0,0	0,0	0,00
Древесная	1,0	1,25	0,97	120	1,91	5,5	0,05	0,02
	1,0	1,24	0,95	46,4	1,26	2,2	0,05	0,02
	1,0	1,34	0,92	32	1,23	0,0	0,0	0,0
Травянистая	0,5	1,22	1,67	120	2	0,0	0,0	0,0
	0,5	1,21	1,69	46,4	1,33	0,0	0,0	0,0
	0,5	1,23	1,61	32	1,23	0,0	0,0	0,0
Ненарушенный склон (контроль)	Северный склон							
	2,0	1,2	0,97	120	1,84	9,4	0,08	0,03
	2,0	1,22	0,92	46,4	1,24	2,9	0,06	0,05
	2,0	1,21	0,94	32	1,21	0,5	0,02	0,08
	2,0	1,2	0,95	25,6	1,16	0	0	0
Тело оползня	3,0	1,22	0,91	120	1,81	12	0,1	0,03
	3,0	1,21	0,92	46,4	1,22	3,9	0,08	0,06
	3,0	1,23	0,89	32	1,15	2,1	0,07	0,05
	3,0	1,24	0,86	25,6	1,14	0,5	0,02	0,06
Поверхность скольжения	4,0	1,51	0,63	120	1,68	19	0,16	0,05
	4,0	1,55	0,64	46,4	1,22	3,6	0,08	0,05
	3,0	1,58	0,55	32	1,2	0,7	0,02	0,08
	4,0	1,62	0,52	25,6	1,16	0	0	0

Разработчиками методики [27] предложено условно считать, что обеспеченность 10% имеют осадки, выпадающие ежегодно, но не чаще одного раза в год (100 раз за 100 лет). Это может оказаться верным, если считать обеспеченностью количество случаев выпадения данного слоя осадков от общего количества осадков более 0,1 мм за тот или иной период года, например, за апрель- октябрь и т. д. В классическом же понимании обеспеченность заданного слоя осадков – это количество случаев выпадения таких осадков за 100 лет. Таким образом, осадки 10%-ной обеспеченности в трактовке авторов [27], это осадки обеспеченностью, равной 100% в классическом понимании.

Но этот нюанс не меняет главного вывода исследований: ливневый сток на плоской вершухе отвалов при отсутствии растительности происходит ежегодно и характеризуется слоем стока не менее 2,9 мм. А при осадках 5%-ной

обеспеченности (один раз в два года) он достигает высоты 11 мм.

Как видно из табл. 3.7, на участке с древесной растительностью, где почва укрыта листовым опадом, максимальный сток был вдвое меньшим, а на участке с травяным покровом сток вообще не зафиксирован ни при каком слое осадков.

На склоновой части отвала наибольший сток (19 мм) при осадках 10%-ной обеспеченности наблюдался на поверхности скольжения тела сдвига. Коэффициент стока (отношение слоя стока к слою осадков) здесь достигал значения 0,16. На всех склоновых вариантах сток возникал уже при осадках обеспеченностью 20%. Значительно меньшие коэффициенты стока получены на контрольном участке и теле оползня.

Установлено, что наибольшую стокорегулирующую способность имеет травянистая растительность. Древесная растительность также способствует уменьшению стока, но намного меньше, что в первую очередь связано с влиянием растительности на плотность почв, повышением их водопроницаемости и защитным действием на поверхность почвы или породы. Эти выводы подтверждены при многофакторном анализе связи слоя стока со слоем осадков (X_1), водопроницаемостью породы (X_2), крутизной склона (X_3), который был выполнен по методу Брандона [211] с использованием компьютерной программы «Фактор», разработанной в УНИИЗПЭ старшими научными сотрудниками Ф.Д. Зеленским и В.П. Голубцовым.

Полученная математическая модель имеет вид: $Y = Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3$, где Y – слой стока; Y_1 , Y_2 , Y_3 – уравнения-множители, которые содержат независимые переменные X_1 , X_2 , X_3 , расположенные в порядке уменьшения их влияния на Y (табл. 1.53).

Из трех уравнений лишь первое дает слой стока в натуральном виде, другие два выполняют роль уточняющих коэффициентов, благодаря введению которых коэффициент корреляции последовательно растет с 0,76 до 0,98 (табл. 3.8).

Исходя из того, что второе место по влиянию на размер стока имеет интенсивность фильтрации воды в породу, определенная методом трубок, можно объяснить отсутствие стока на участке с травой не только наименьшей крутизной склона, но и наибольшей фильтрацией, которая при осадках обеспеченностью 10% даже превышает интенсивность впитывания воды (1,69 против 1,33).

Таблица 3.8

Формирование математической модели по методу Брандона

Факторы (независимые переменные)	Уравнения функций-множителей	Увеличение коэффициента множественной корреляции, R	Интервалы варьирования факторов
Слой осадков X_1 , мм	$Y_1 = -2,38 + 0,1X_1$	0,76	25,6 – 120
Интенсивность фильтрации воды в породу X_2 , мм/мин.	$Y_2 = 1,990 - 1,095X_2$	0,92	0,52 – 1,69
Крутизна склона X_3 , град.	$Y_3 = 2,122 - 1,531X_3^{-0,5}$	0,98	0,5 – 3,5

Самую низкую фильтрационную способность имеет поверхность скольжения – почти вдвое ниже других участков без растительности. Можно допустить, что именно наличие таких прослоек в теле отвала в совокупности с

подтоком воды с верхушки стало причиной катастрофического оползня на исследуемом объекте в начале XX в. и многих других случаев.

Корреляционную связь между объемом смыва породы и слоем осадков в целом по всем участкам обнаружить не удалось. Смыв породы на большинстве участков не превышал 0,1 т/га. Это вполне понятно, ведь на стоковых площадках имеет место лишь зарождение стока и межручейковая эрозия. Значительно большей угрозой является концентрация стока на стокоформирующих участках в ручьи и слияние последних, что приводит к появлению катастрофических размывов на крутых склонах конических отвалов и самых настоящих оврагов и оползней на склонах отвалов с плоской верхушкой вследствие наличия большой стокообразующей площади. А это означает катастрофическое загрязнение непосредственно прилегающей к ним территории, которая в одной только Луганской области на 28 % является местом проживания 8 тыс. чел.; а на 38 % которой расположены приусадебные участки и на 18 % – пашня [73, 76].

Выводы по подразделу:

1. Исходя из полученных данных можно констатировать, что высота слоя ежегодного стока влаги ливневых осадков с отвалов и объем стока с каждого гектара их поверхности могут достигать 19 мм и 190 м³ воды, которая при концентрации ее стекания в определенном направлении способна к большому разрушительному действию. Более точное прогнозное оценивание стока можно осуществить с помощью разработанной математической модели.

2. Для предотвращения деформационных явлений на поверхности терриконов под воздействием стока воды нужно, во-первых, отказаться от практики срезания верхушек на тех из них, которые уже не представляют угрозы воспламенения; во-вторых, тщательнее выполнять работы по горизонтальному планированию плоских верхушек отвалов; в-третьих, обязательным условием экологической безопасности отвалов является не только их техническая, но и биологическая рекультивация; в-четвертых, необходима разработка и внедрение технических мероприятий по безопасному отведению влаги атмосферных осадков с плоских верхушек отвалов и террас на их склонах в гидрографическую сеть.

В работе [71] описаны разработанные нами новые способы биологической рекультивации терриконов.

3.4 Метод активного полевого эксперимента в изучении эрозионно-гидрологического процесса

3.4.1 Метод напуска (метод привлеченного стока), разработанный Е.А. Гаршиным и соавт.

Как отметил Е.А.Гаршинев в монографии «Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация» [39], при многих достоинствах стоковые площадки имеют и недостатки, главным из которых является практически полная зависимость исследователя от погодных условий, определяющих слой и интенсивность стока. Возможности проведения активного эксперимента существенно расширяются при использовании подтока (напуска) по методу, разработанному им совместно с Пружиной М.К., Картамышевым Н.И. и др.,

защищенному авторским свидетельством СССР № 886766. Сущность метода, согласно [39] состоит в том, что необходимая для эксперимента вода с полевого склона - стокообразующего фона (СФ) сначала собирается в прудке вала, а затем подается в требуемых количествах на опытные делянки (ОД).

На рис. 3.48 и 3.49 приводятся принципиальная и типовая схемы выполнения эксперимента и размещения вариантов опыта для оценки эрозионно-гидрологических характеристик в зоне снежных шлейфов, межполосном пространстве протяженностью соответственно $L_{шл}$ и $L_{мп}$, в лесополосе [39].

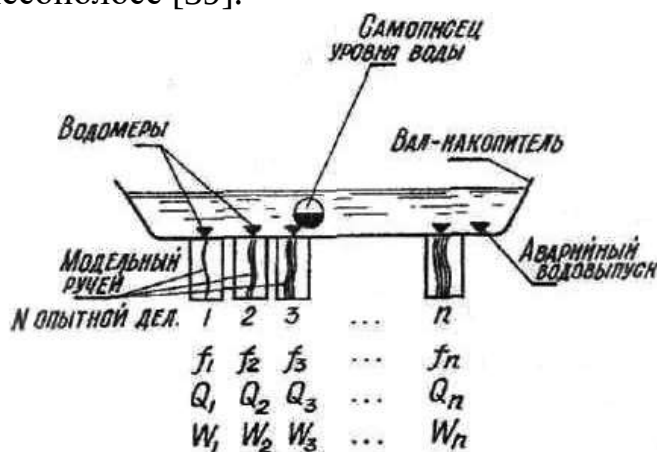


Рис. 3.48. Принципиальная схема полевого моделирования ЭАП [39]

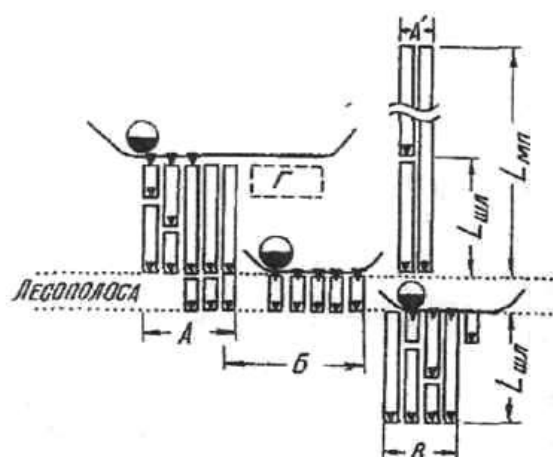


Рис. 3.49. Типовое размещение опытных делянок для оценки роли лесополосы

Для осуществления метода напуска (известного еще как «метод привлеченного стока») согласно описанию в [39] вдоль нижней границы СФ (стокообразующего фона) - по верхней границе ОД (опытных делянок) или по верхней опушке насаждения создают горизонтальный вал-накопитель с выемкой в верхней части склона и шпорами на концах (см. рис. 3.48). Его устраивают односторонней напашкой плантажным плугом или плугом с увеличенным на последнем корпусе отвалом, бульдозером, грейдером. Высота вала и максимальная глубина выемки 0,4-0,5 м. Целесообразно совмещение сухого откоса вала с верхней границей лесного насаждения. Если при этом граница насаждения не горизонтальна, то земляной вал допустимо устраивать переменной высоты (максимум до 1,0-1,2 м), но в любом случае с горизонтальным гребнем.

В тело вала по верхним границам ОД площадью $f_1...n$ устанавливают тонкостенные водосливы (треугольные или с прямоугольным вырезом) так, чтобы их пороги были строго на одном уровне. Высота выреза 0,2 м, а длину порога прямоугольных водосливов принимают кратной 0,02 м. Это обеспечивает при соотношении размеров порогов, например, 2:4:8... подачу на опытные делянки ОД расходов $Q_{1...n}$ в соотношении 1:2:4.... . Количество водосливов соответствует количеству ОД, на которые они должны подать воду.

Аналогичные водосливы устанавливают по нижним границам ОД.

При сложившихся гидрометеорологических условиях за период стока на ОД подают объемы воды V_i или слой стока S_i в соотношении 1 : 2 : 4..., что имитирует работу того или иного варианта опыта в условиях разной водности весен. При использовании треугольных водосливов тот же эффект достигается установкой одного, двух и т.д. водосливов.

Ширина ОД в опытах по оценке силы факторов эрозии принимается равной 1 м; по оценке эффективности агротехнических и лугомелиоративных приемов - 1,5-2,0 м, гидротехнических и лесомелиоративных приемов - 2-5 м.

Длина ОД (L), используемой для оценки факторов эрозии, эффективности агротехнических и лугомелиоративных приемов, равна 10 м, для оценки работы гидротехнических сооружений - длине ожидаемого прудка, при размещении ОД в лесной полосе с целью оценки ее стокорегулирующей роли равна ширине насаждения или кратна ширине междурядий, если ширина насаждения изучается как фактор.

Требуемая площадь стокоформирующего фона (в га) определяется количеством воды, которое планируется подать на опытные делянки, по формуле:

$$F_{\text{сф}} = 0,0001 \frac{BL \left(\sum_{i=1}^n (S_i \times k) \right)}{S} \quad (3.8)$$

где B - ширина одной ОД, м; L - длина ОД; S - расчетный ожидаемый слой стока на склоне с СФ, мм; S_i - слой планируемого напуска воды на i -ю ОД, мм; n - количество вариантов опыта; k - повторность вариантов.

Полученную площадь СФ целесообразно увеличить на 10-20% для компенсации потерь воды на фильтрацию в прудке перед валом-накопителем.

С другой стороны, площадь СФ (водосборная площадь) определяется ее длиной по склону $L_{\text{сф}}$, по максимуму равной длине склона $L_{\text{скл}}$ и ее шириной $B_{\text{сф}}$, определяемой, как минимум длиной вала $L_{\text{в}}$. То есть $F'_{\text{сф}} = L_{\text{скл}} * L_{\text{в}}$.

Минимальная длина вала определяется суммарной шириной ОД и «защиток» между ними.

Из двух значений $F_{\text{сф}}$ можно получить требуемое значение ширины СФ: $B_{\text{сф}} = (1,1 \div 1,2) F_{\text{сф}} / L_{\text{скл}}$. Если окажется, что она больше минимальной длины вала, то его длину надо увеличить устройством водоподводящих валов.

По типовой схеме (см. рис. 3.49), согласно [39], опыт закладывают с разными вариантами, объединяемыми в несколько блоков. В блоке А выполняют оценку роли верхних, в блоке В - нижних снежных шлейфов, в блоке Б - самого лесного насаждения. В блоке Г размещают варианты для оценки факторов ЭАП при моделировании в режиме стабильного подтока. Блок А включает стандартные стоковые площадки, предназначенные для получения критериев перехода от метода напуска к стандарту.

В зависимости от целей и этапа исследований опыты в блоках А и В закладывают на одном агрофоне или в севообороте (целесообразно иметь фоны озимых, стерни, многолетних трав), а также с разными вариантами воздействия на водопоглощение и кольматацию в лесополосах (блок Б).

Участок для закладки стационарного опыта должен отвечать обычным требованиям типичности (репрезентативности) почвенных условий, крутизны и формы склона, таксационных показателей насаждений и других характеристик, если они сами не являются предметом изучения.

В любом случае участок должен обеспечивать возможность размещения ОД и иметь достаточную площадь СФ для получения заданных в эксперименте объемов (расходов) воды.

Опытные делянки обваловываются вдоль нижней и продольных границ земляными валами обычно высотой 0,15-0,20 м; в опытах с гидротехническими устройствами высота валиков должна превышать рабочую высоту земляного вала над будущим зеркалом прудка на 0,15 м. Ширина «защиток» 1-5 м.

Регистрацию напоров на всех верхних водосливах осуществляют одним самописцем «Валдай», ГР-38 или переоборудованными термографами [40] с отметками на ленте самописца горизонта порога каждого водослива.

Для исключения переполнения прудка и прорыва вала в его теле устраивают аварийный водосброс шириной 1,0-1,5 м таким образом, чтобы обеспечить перелив через него воды при достижении на водосливах напора 0,15 м. Порог водосброса, как и тело вала, засевают травосмесью злаков и трав и для надежности покрывают весной полиэтиленовой пленкой, рубероидом или другим материалом. Травосмесью засевают и выемку перед валом.

При необходимости проведения экспериментов с заданным расходом независимо от суточного хода стока для напуска применяют трубки-сифоны (см. рис. 3.50). Использование одновременно нескольких (2-3 и более) сифонов позволяет осуществить напуск при разных грациях расходов. Для стабилизации расходов через сифоны применяют двухступенчатую подачу воды на ОД с использованием промежуточной емкости.

Вспомогательный сифон 1 первой ступени служит для подачи расхода из емкости вала-распределителя в промежуточную емкость 2. Она стабилизирует расходы, подаваемые основными (второй ступени) сифонами 3 на ОД. Стабилизацию расходов обеспечивают подачей в емкость 2 расхода $Q_{ВХ}$, заведомо большего суммарного выходного расхода $Q_{ВЫХ}$ системы основных сифонов. Это приводит к переполнению емкости 2 и сбросу избыточного расхода $Q_{ИЗБ}$ через верхнюю кромку емкости. Разность $Q_{ИЗБ} = Q_{ВХ} - Q_{ВЫХ}$ должна быть минимальной при наименьшем рабочем уровне воды в емкости вала-накопителя. Это обеспечивает минимальные колебания уровня воды в емкости 2 и высокую стабильность расходов из основных сифонов. С помощью фильтра 4 предотвращается поступление крупных частиц суспензии из прудка на ОД.

Е.А.Гаршинев с коллегами предложил также методический подход, созвучный идеологии WERP, прийдя к нему независимо от ее разработчиков. Это метод модельных ручьев (МР), описанный им в работе [39], по своей сути являющийся моделированием ручейковой эрозии (рис. 3.50).

При экспериментах с фиксированными трассами модельных ручьев (МР) их русла задают с помощью ограничителей 5 и рек 6 (дерево, дюралевый уголок и т.п.) с поролоновыми прокладками-уплотнителями 7, копирующими

микрорельеф поверхности ОД и исключая потерю воды на фильтрацию под рейки за пределы русла МР. Рейки фиксируют забиваемыми в почву стальными стержнями длиной 300-400 мм и накладками 9. Подачу $Q_{\text{вых}}$ в верхнем створе МР и вывод суспензии в учетную емкость 10 осуществляют лотком из полиэтиленовой пленки.

В замыкающих створах МР на поролоновую 7 и полиэтиленовую 11 прокладки устанавливают П-образную или прямоугольную рамку 12. Вывод суспензии в учетную емкость осуществляют с помощью лотка 13. При малых перепадах между основанием и нижним концом лотка (при малых уклонах) в качестве учетной емкости используют полиэтиленовый пакет. Техника экспериментов, выполняемых в естественных ручьях (ЕР), примерно такая же.

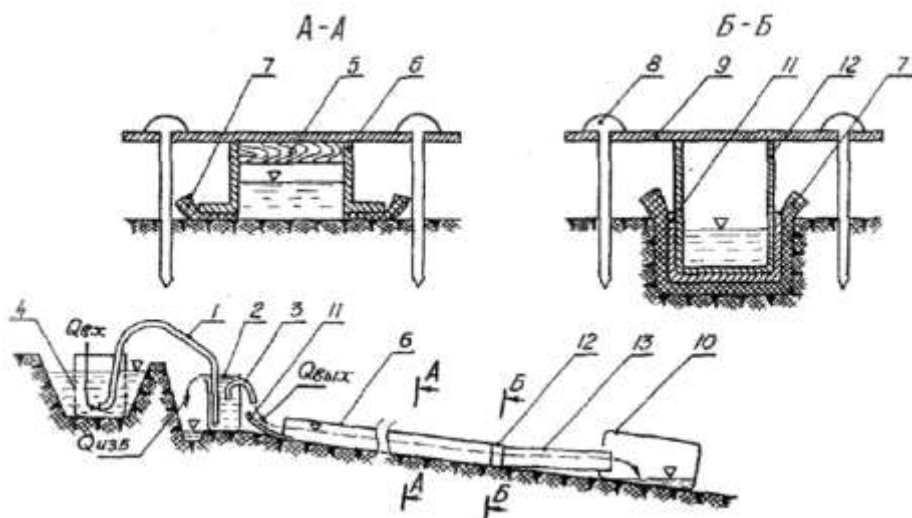


Рис. 3.50. Схема напуска воды в модельный ручей

Средняя скорость течения измеряется электрометрическим методом при напуске в МР или ЕР электролита (раствора NaCl) с помощью резиновой груши. Для этого, согласно [39], используют стандартный люксметр, переоборудуемый путем замены, как мы полагаем, фотоэлемента на элемент питания постоянного тока по схеме на рис. 3.51.

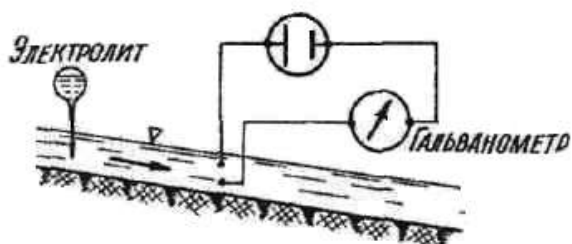


Рис. 3.51. Схема измерения скорости течения в ручье с помощью переоборудованного люксметра

Момент прохождения электролита через учетный створ фиксируется по отклонению стрелки гальванометра, свидетельствующему о замыкании цепи.

Использование мультивибратора позволяет, кроме того, применять для этой цели звуковой сигнал. Образцы суспензии объемом 0,5 л отфильтровывают на месте. Фильтры

помещают в конические полиэтиленовые перфорированные обоймы, устанавливаемые прямо в снег или подвешиваемые на проволоочные кольца. Фракционный состав суспензии оценивают отбором образцов почвенными

ситами с размером отверстий 0,25; 0,50; 1 мм. Градиентные измерения температуры почвы, воды, снега и воздуха выполняют серийными термометрами ТЭТ-2, ТМ-4 и термографами.

Размеры русел ручьев и водных потоков, согласно [39], определяют масштабной линейкой, а также фиксируют на фотопленке стереокамерами типа «Спутник» для последующих фотограмметрических работ.

В работе [39] отмечены особенности метода напуска, испытанного в ОПХ ВНИИЗиЗПЭ, использование которых существенно расширяет возможности экспериментатора, а по информативности приближает его к методу лабораторных гидравлических лотков:

1. Наличие стокообразующего фона (уплотненная пашня, залежные участки, кюветы дорог и т.п.) и возможность подвода воды со склона практически неограниченной площади позволяют собрать в прудке вала воду в достаточном количестве даже в маловодный год, что особенно актуально для тех (южных) районов, где ощутимый сток с зяби формируется редко и могут быть подряд 5-6 лет без стока с зяби. В таких условиях получение стокорегулирующей оценки лесополос или противоэрозионной роли агротехнических приемов связано с огромными затратами времени и средств. Кроме того, сложно подавать воду с помощью насосной станции из прудов или ручьев в балках. Этот способ.

2. Наличие горизонтального вала-накопителя, собирающего воду, нивелирует условия подачи воды на ОД, что практически исключает естественную вариацию характеристик талого стока (расходов, объемов, коэффициентов), неизбежную при использовании традиционных стоковых площадок и обусловленную неоднородностями почвенных условий рельефа склонов, изменением экспозиции и т.п. Кроме того, значительно снижаются требования к конфигурации стокообразующего склона и его линейным размерам, а также к размерам ОД, которые можно сильно уменьшить.

3. Использование целой системы водосливов, осуществляющих напуск воды на ОД, позволяет не только давать оценку водопоглощения, стока и эрозии в наперед выбранном по желанию экспериментатора диапазоне расходов, но и задавать очень большие расходы, имитирующие весны экстремально высокой водности. Это особенно важно в ПЭЛМ. Как было установлено еще в 1968 г., водопоглощение в лесных насаждениях связано со слоем подтока [39]. При реальной ширине межполосного пространства (300-600 м) или длине полевого склона (до 800-1000 м и более), примыкающих часто к прибалочному или балочному насаждению, достаточную нагрузку водой ОД методом комбинированных стоковых площадок осуществить чрезвычайно трудно. Напуск эту проблему снимает. Кроме того и технически регистрация напоров на целой серии водосливов упрощается, поскольку выполняется синхронно единственным самописцем.

Как свидетельствует Гаршинев Е.А., метод напуска значительно расширяет и возможности дождевания. В сочетании с подтоком оно позволяет выяснить некоторые важные моменты в теории ЭПП и ЭАП при ливнях, в частности давать

дифференцированную оценку ударному действию дождевых капель и гидродинамическому эффекту водного потока.

Для изучения водопоглощающей способности лесополос В.С.Федотовым,

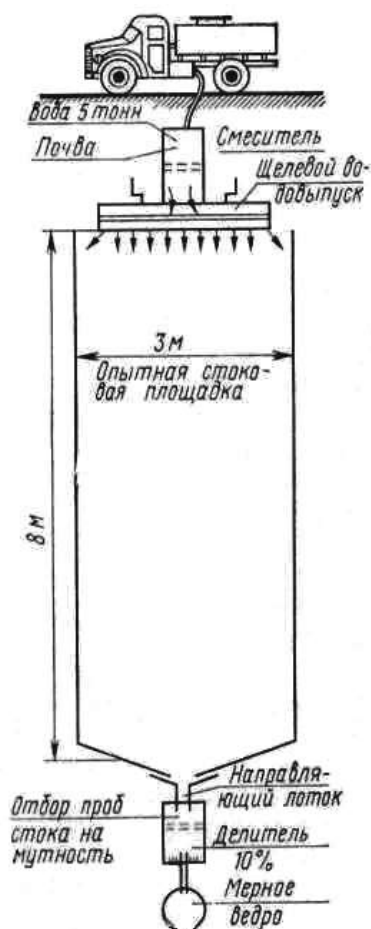


Рис. 3.52. Оборудование стоковой площадки для изучения водопоглощающей способности лесной полосы методом подтока [53]

согласно [53], применялся искусственный подток воды, содержащей твердый сток (рис. 3.52).

Чтобы имитировать твердый и жидкий сток с поля, вода из автоцистерны ПМ-20 подавалась в лоток-смеситель. Туда же через каждые 2 мин высыпалось 15 кг почвы. Струей воды почва размывалась и смесь мутностью 45 г/л через порог смесителя поступала в щелевой водовыпуск, из которого равномерно распределялась по ширине стоковой площадки, расположенной в лесной полосе. После прохождения через изучаемую лесную полосу сток учитывался объемным методом. По разнице расходов воды на входе и выходе из площадки определялось водопоглощение, а по снижению мутности стока – кольматирующая способность лесной полосы.

3.4.2 Использование метода привлеченного стока в исследованиях УНИИЗПЭ

Изучение водопоглощения в лесных полосах методом подтока легко организовать, поскольку почти всегда в результате сползания почвы при пахоте перед верхней опушкой поперечносклоновых лесных полос формируется *напашь*, называемая еще *агротехнической террасой* (агротеррасой). Ее возникновение имеет то отрицательное следствие, что вода не проходит в ЛП, а при наличии небольшого продольного уклона стекает вдоль нее. Для преодоления этого недостатка нами разработаны способы, защищенные авторскими свидетельствами и патентами [4-7, 9, 142]. В ложбинах вода концентрируется и все-же входит в ЛП, но с повышенным расходом. На опыте №4, к тому же, вдоль полевой дороги образовался желоб. Делая прокоп в валу напашь и поперечный валик с пологими откосами на полевой дороге, мы направили воду под полог лесной полосы. Расходы воды определялись с

помощью водосливов-водомеров, установленных в одной из ложбин (рис. 3.53).



Рис. 3.53. Водослив-водомер на входе в лесную полосу (слева) и водосливы на ее выходе в период талого стока в марте 1985 года (фото Зубова А.Р.)

Средний расход поглощения в потоке через ЛП 22.03.85 г. составил 0,042 л/с, площадь потока была 8,8 м², интенсивность поглощения была равна 0,27 мм/мин или 16,2 мм/час (табл. 3.9).

Для сравнения приводим данные водопоглощения мерзлой почвы в прудке вала-террасы на опыте №4 в ОПХ «Ударник» (рис. 3.54), которая определялась по скорости сработки воды в их прудках после окончания стока. В среднем за 3 дня 22-24.03.1985 г. по трем валам она была равна 0,056 мм/мин или 3,37 мм/час.

Таблица 3.9

Расчет поглощения стока в лесной полосе

Время, час	Расход потока воды, л/с			Средняя площадь потока в ЛП	Интенсивность водопоглощения, мм/мин
	на входе в ЛП	на выходе из ЛП	Расход поглощения в ЛП		
12	0,55	0,51	0,040		0,27
14	0,69	0,64	0,050		0,34
16	0,80	0,71	0,090		0,61
17	0,58	0,56	0,020		0,14
18	0,31	0,30	0,010		0,07
В среднем	0,59	0,54	0,042	8,8	0,27



Рис. 3.54. Вал-терраса и прудок воды перед ним (фото Л.Г.Зубовой)

Как видим, водопроницаемость в лесной полосе (16,2 мм/час) в 4,8 раз выше чем в среднем по валам-террасам (3,37 мм/час), что объясняется влиянием более высокой оструктуренности почвы в лесополосе и меньшим ее промерзанием.

Изучение стокорегулирующей роли микротеррас на залесенном терриконе. Методом напуска изучено влияние микротеррас с саженцами и травяного покрова на сток и смыв почвы с террикона шахты им. 60-летия Советской Украины ПО Лисичанскуголь, залесенного проф. Зубовой Л.Г. совместно с А.Р. Зубовым. Высота террикона 50 м, крутизна склонов 37°.

На рис. 3.55 показан фрагмент террикона, залесенный по предложенной технологии, защищенной авторским свидетельством на изобретение [12].

Опыт включал три варианта: с травяным покровом, с микротеррасами через 2 м и контрольный вариант без травяного покрова и микротеррас (табл. 3.10).

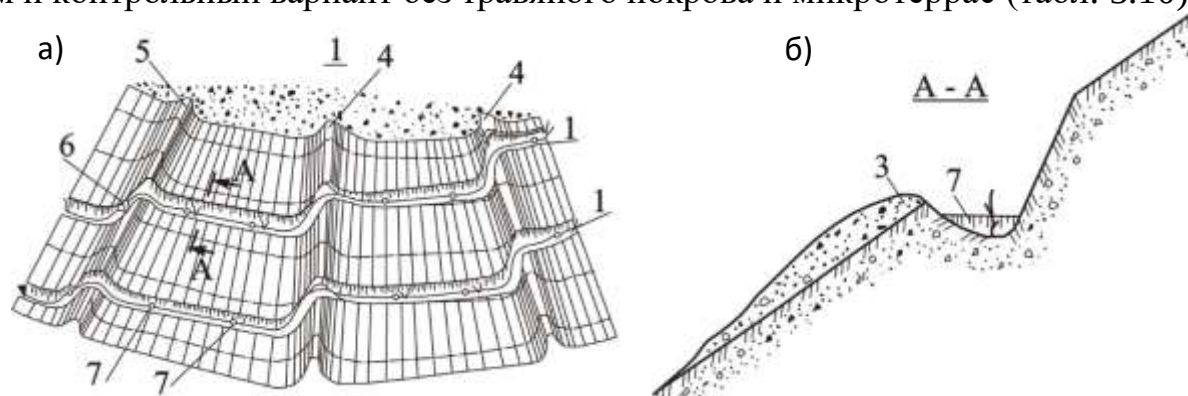


Рис. 3.55. Фрагмент склона террикона с промоинами и микротеррасами (а), разрез А-А поперек микротеррасы (б): 1 – полотно микротеррасы; 3 – отсыпанный вынутый грунт; 4 – дно промоины; 6,7 – перемычки

Размещение микротеррас шириной 30-40 см, созданных вручную, состоящих из выемочной части и насыпи 3, показано на рис. 3.55 а. В отличие от способа Киевского национального аграрного университета (авторы проф. Логгинов Б.И. и

др.), их размещают с уклоном, а в местах пересечения с промоинами 4 микротеррасы прокладывают по их откосам и дну по спиралевидной линии.

Вдоль склона закладывались площадки размером 20 x 200 см. Вдоль длинных сторон они ограничивались металлическими бортиками, в нижней части размещался водоприемный лоток, сверху – дозирующее устройство. На протяжении 30 мин на каждую площадку подавались 50 л воды с расходом 0,028 л/с. Слой водоподачи составил 125 мм, что соответствует осадкам 1%-ной вероятности превышения.

Таблица 3.10

Эрозионно-гидрологические показатели при моделировании стока на терриконе

Вариант площадки	Слой стока, мм	Коэффициент стока	Скорость впитывания воды, мм/мин	Средняя мутность стока, г/л	Смыв почвы, т/га
с травяным покровом	35	0,28	2,85	42	14,7
с микротеррасой	61	0,49	2,03	43	26,3
контрольный	72	0,57	1,70	137	98,3

Почва на терриконе характеризуется малой противозерозионной стойкостью. Минимальный объем стока (14 л) наблюдался на участке с травяным покровом, а на участке с микротеррасами он был в 1,2 раза меньше, чем на контрольном, скорость впитывания же была в 1,2 раза большей. Микротеррасирование уменьшило смыв почвы с площадок в 3,7 раза.

Таким образом, разработанные мероприятия оказывают важное влияние на улучшение водного режима: задерживают сток, снижают смыв почвы и породы, накапливают влагу, т. е. обеспечивают защиту склонов от эрозии, а прилегающей территории - от загрязнения продуктами эрозии.

3.5 Методика вероятностной оценки слоя ливневых осадков

Существующие методики расчета систем почвоохранных мероприятий базируются на прогнозировании потерь почвы от стока талых и ливневых вод определенной обеспеченности (вероятности превышения заданного значения).

Так, прогнозные расчеты потерь почвы от стока талых и ливневых вод, выполненные авторами методики [27] для Лесостепи и Степи Украины с использованием модифицированной С.Ю.Булыгиным модели Ц.Е.Мирцхулавы, включают, в частности, расчет ливневых осадков 10%-ной обеспеченности. Как показано выше, существуют различные трактовки этого понятия, из-за которых остается неясным, что понимать под осадками 1, 5, 20...50% обеспеченности, для которых в [26, 27] приводятся параметры региональных плювиограмм.

Учитывая вышесказанное, мы разработали алгоритм определения обеспеченности осадков той или иной высоты на примере Луганской области, описанный в монографии [70]. Его окончательными результатом стали табл. 3.11, в которой рассчитаны значения обеспеченности $P\%$ для дискретных значений слоя осадков (20, 30, ... мм) - вначале для каждого месяца теплого периода, а затем – по сумме этих обеспеченностей рассчитана обеспеченность

каждого дискретного значения слоя осадков относительно 100 годов наблюдений.

Таблица 3.11

Расчет обеспеченности Р% слоя осадков, выпадающих в ливнеопасный период года относительно 100 лет наблюдений

Слой осадков, мм	Месяцы и обеспеченности слоев осадков							Суммарная Р, %
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
20	13	27,7	46,5	51,0	50,0	30,0	24,0	242
30	3,5	9	18,5	19,3	20,8	10,0	7,6	88,7
40	1,5	3,8	8,0	9,0	9,5	4,3	3,0	39,1
50	0,71	1,8	4,0	5,1	4,9	2,1	1,05	20,1
60	0,36	1,0	2,25	3,0	3,0	1,25	0,65	11,5
70	0,22	0,62	1,5	1,85	1,85	0,82	0,39	7,25
80	0,15	0,38	0,96	1,25	1,3	0,51	0,28	4,83
90	0,09	0,26	0,69	0,91	0,95	0,35	0,20	3,45
100		0,19	0,47	0,66	0,72	0,25	0,15	2,43
110		0,14	0,35	0,47	0,52	0,19	0,11	1,80
120		0,10	0,26	0,36	0,40	0,15		1,27
130			0,20	0,29	0,32	0,12		0,92
140			0,17	0,22	0,25			0,64
150			0,14	0,19	0,21			0,54

Суммарная обеспеченность 242% для слоя осадков 20 мм в табл. 3.11 означает 242 дождя слоем не менее 20 мм за 100 лет (без указания на месяц выпадения), т.е. 2,42 случая в среднем за год. Однако для отдельных месяцев обеспеченность данного слоя осадков будет меньше. Для удобства пользования результатами расчета (итоговая колонка) составлена кривая обеспеченности осадков без привязки к конкретному месяцу относительно 100 лет наблюдений (рис. 3.56).

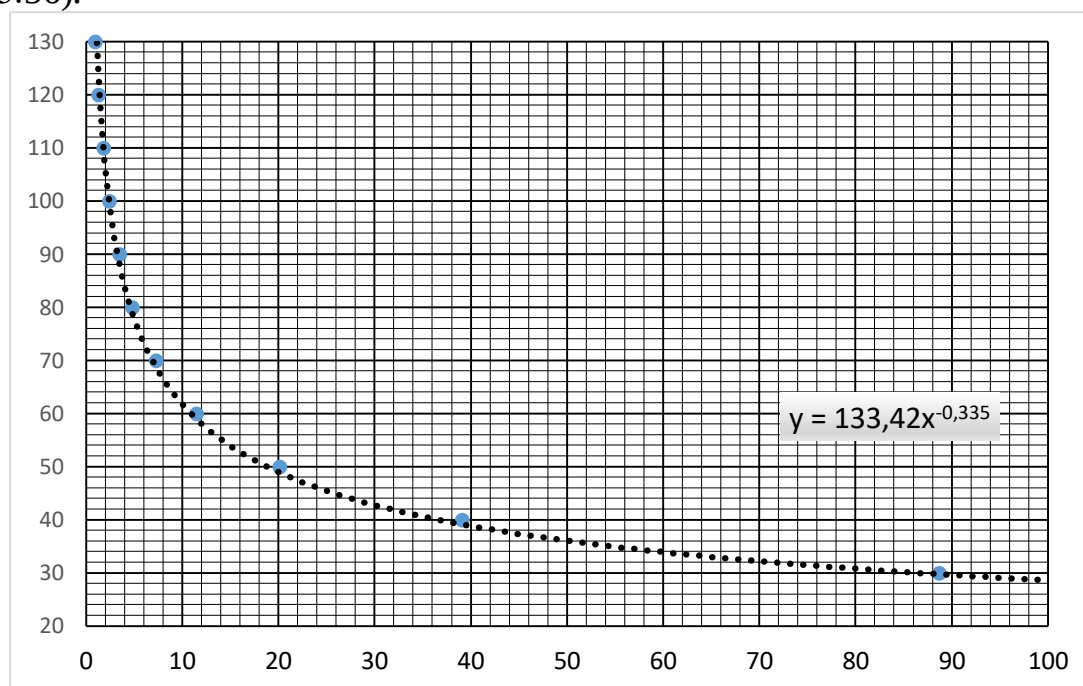


Рис. 3.56. Кривая обеспеченности (ось абсцисс) заданных слоев жидких осадков (ось ординат) для ливнеопасного периода года в целом

Значение разработки состоит в том, что, имея по какой-либо из известных моделей эрозии зависимость смыва почвы для культур севооборота от количества осадков при конкретных топографических, почвенных, агротехнических условиях, можно, получив для данной местности кривую обеспеченности осадков, определить среднемноголетний суммарный годовой смыв почвы от ливней и расчетное значение обеспеченности, при которой смыв равен суммарному среднемноголетнему. Алгоритм определения описан в монографии (Зубов, Зыков, Тарарико, 2010, [72]).

3.6. Моделирование ветровой эрозии в натурных условиях

Примеры методов и оборудования, используемых в исследованиях ученых США для активного изучения ветроэрозионных процессов на естественных и искусственных агрофонах представлены на рис. 3.57 и 3.58, взятых с сайта [225].

На рис. 3.57 показана передвижная аэродинамическая установка, включающая разборную аэродинамическую трубу достаточно большого сечения и нагнетающий вентилятор, работающий от двигателя, установленного на специальном шасси, буксируемом трактором, а как вариант работающий от его вала отбора мощности. Для учета эолового материала, выносимого с изучаемой площадки с естественным агрофоном, использованы 2 пылеуловителя в выходном сечении трубы (см. подраздел 2.9).



Рис. 3.57. Передвижная полевая аэродинамическая установка [225]

На рис. 3.58 показан стационарный лабораторный аналог установки и работа исследователя по подготовке искусственного растительного покрова в сочетании с мульчирующим слоем.



Рис. 3.58. Стационарная лабораторная аэродинамическая труба с нагнетающей турбиной, трубками Пито и двумя пылеуловителями [225]

Для контроля скорости воздушного потока в различных точках сечения трубы в обоих вариантах установки аналогично с измерением скорости воды использованы трубки Пито, соединенные гибкими трубочками с дифференциальным микроманометром, предназначенным для измерения в них скоростного напора воздуха (рис. 3.59).

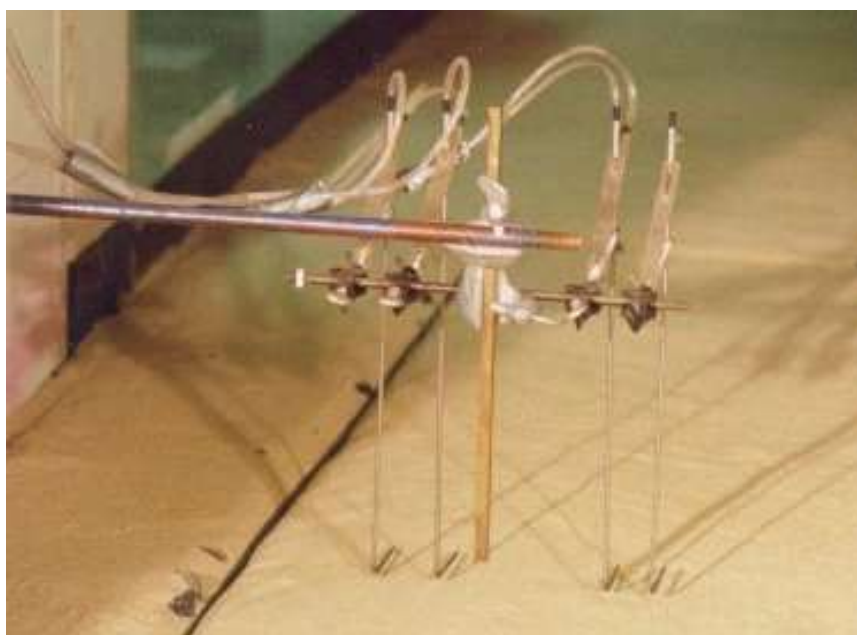


Рис. 3.59. Аэродинамические трубки Пито [225]

РАЗДЕЛ 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

К лабораторным методам изучения эрозии относятся прямые опыты с моделированием водно- и ветроэрозионных процессов в специальных установках – лотках, лабораторных дождевальных и аэродинамических установках, а также исследование эрозионной прочности почвы по методу Г.В. Бастркова.

Более отдаленное отношение к моделированию имеют *косвенные* методы определения противоэрозионной стойкости почв по их водно-физическим свойствам и показателям макро- или микроструктуры [95, 172].

4.1 Определение противоэрозионной стойкости почв методом размыва струей воды

Противоэрозионная стойкость почв по Г.В. Бастркову, согласно [27], зависит от эрозионной прочности почв и горных пород — их способности оказывать сопротивление силовому воздействию движущейся воды и комплексу внешних факторов. Этот параметр определяется отношением мощности горизонтальной струи диаметром 2,5 мм к скорости размывания образца почвы, помещенного в металлический цилиндр диаметром 10 см.

Согласно [27] параметр C_y^H в формуле М.С.Кузнецова (1.6) зависит от гидравлической связности $C_{гс}$:

$$C_y^H = 0,2KC_{гс} \text{ при } KC_{гс} \leq 0,15; C_y^H = 0,17(KC_{гс} - 0,15) \text{ при } KC_{гс} > 0,15;$$

где K – коэффициент однородности почвы по сцеплению, $K = 0,5$;

$$C_{гс} = 16(UD/(H+20D))^2, \text{ где } U \text{ – скорость вылета воды из сопла; м/с;}$$

D – диаметр сопла, м; H – глубина линейного размыва.

Длительность эксперимента (τ) - 10 минут.

Для определения $C_{гс}$ в [27] рекомендуют использовать прибор «Малыш», позволяющий изучать процессы размыва почв как нарушенного, так и ненарушенного строения. Для этого почву помещают в металлический цилиндр, который устанавливают на стенде, после чего проводится ее размыв. Вода подается через шланг, который в лабораторных условиях подключается к водопроводу. На приборе есть манометр, позволяющий устанавливать необходимое для эксперимента давление воды. Одновременно с началом размыва водой образца почвы включается секундомер, и измеряется время полного размыва почвы на всю длину цилиндра. После этого рассчитывается прочность почвы (R_x) по Г.В. Бастркову (1980).

Главные параметры прибора: диаметр сопла 2,5 мм, площадь сечения $S = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; длина цилиндра (L) - 11 см; мощность струи (N) - 1 Вт; давление (P) = $0,32 \text{ атм/см}^2 = 0,31 \text{ кН/м}^2$.

Скорость U определяют так: $U = N/F$, где $F = PS = 0,31 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 \cdot 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 0,15 \text{ Н}$. Таким образом, учитывая, что $N = 1 \text{ Вт}$: $U = 1/0,15 = 6,7 \text{ м/с}$.

Эрозионная прочность почвы (R_x) определяется как отношение мощности

размывающей струи (N) к скорости размыва почвы (V):

$R_x = N/V = N/(L/t_1) = Nt_1/L$, где t_1 – продолжительность размыва.

Соответственно, $t_1 = R_x L/N$.

В дальнейшем рассчитывается глубина линейного размыва (H): $H = L \cdot t/t_1 = TN/R_x$. А $C_{гс} = 16(UDR_x/(tN + 20R_x D))^2$.

Учитывая, что для прибора «Малыш» $N = 1$ Вт, а $U = 6,7$ м/с, получают:

$C_{гс} = 16(6,7DR_x/(t + 20R_x D))^2 = 718,2(DR_x/(t + 20R_x D))^2$ [27].

4.2 Принцип действия и устройство эрозионного лотка

Для моделирования эрозионных процессов применяют эрозионные лотки. Средний эрозионный лоток, используемый на кафедре эрозии почв факультета почвоведения МГУ (рис. 4.1), представляет собой устройство с замкнутым циклом водопотребления, предназначенное для определения величины смыва с поверхности почвенного образца при разных значениях характеристик водного потока. Устройство состоит из собственно лотка (1), имеющего в поперечном сечении форму прямоугольника, системы подачи в лоток чистой воды, системы отвода и очистки от примесей отработанной воды и вспомогательных устройств для регулирования и измерения параметров водного потока в лотке и извлечения и учета смытой с поверхности образца почвы [95].

Согласно [95], исследуемый образец почвы помещают в камеру (2) так, чтобы его поверхность первоначально находилась в одной плоскости с дном лотка (11). Если это образец нарушенного сложения, то ванночку с ним опускают в камеру сверху вниз. Если это образец ненарушенного сложения, то кассету с ним (10) задвигают в камеру (2) снизу-вверх с помощью винтов. Затем с помощью винтов, встроенных в дно приемной камеры (2), выдвигают монолит из кассеты так, чтобы его поверхность была выше плоскости дна лотка на величину примерно равную $0,7d$, где d — средний размер отрываемых потоком отдельностей почвы. При этом поверхность образца должна оставаться параллельной плоскости дна лотка. Поскольку размер отрываемых потоком частиц почвы обычно неизвестен, превышение выбирают равным примерно 1–1,5 мм. Дно лотка может наклоняться, поворачиваясь относительно оси (12) [95].

Вода в лоток подается из питающего бака с помощью насоса через трубопровод и успокоитель (9). Для изменения расхода воды пользуются краном (7), а для измерения расхода расходомером (8). Вода из успокоителя попадает в лоток, движется по его дну, взаимодействует с почвой и через трубопровод (17) попадает в бак-отстойник (18). Параметры бака-отстойника подобраны таким образом, чтобы через отверстие (19) из бака сливалась чистая вода, а частички почвы оседали на наклонную поверхность дна. Отработанная и очищенная вода по трубопроводу (20) снова поступает в питающий бак, а затем и в лоток [95].

После окончания опыта воде в баке (18) дают отстояться, а затем сливают ее через отверстие (21), открыв кран (22). Остатки воды из бака (18) сливают с помощью сифонного водослива. Почву, смытую с поверхности образца и осевшую на дне бака-отстойника, смывают водой из шланга через отверстие (4) в ванночку (5), а из нее с помощью промывалки переносят в алюминиевый

стаканчик [95].

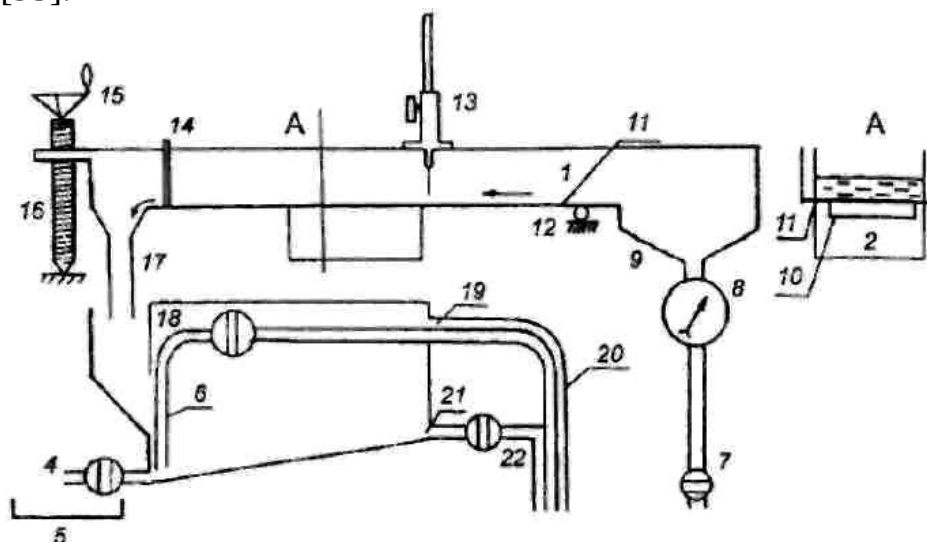


Рис. 4.1. Схема среднего эрозионного лотка [95]

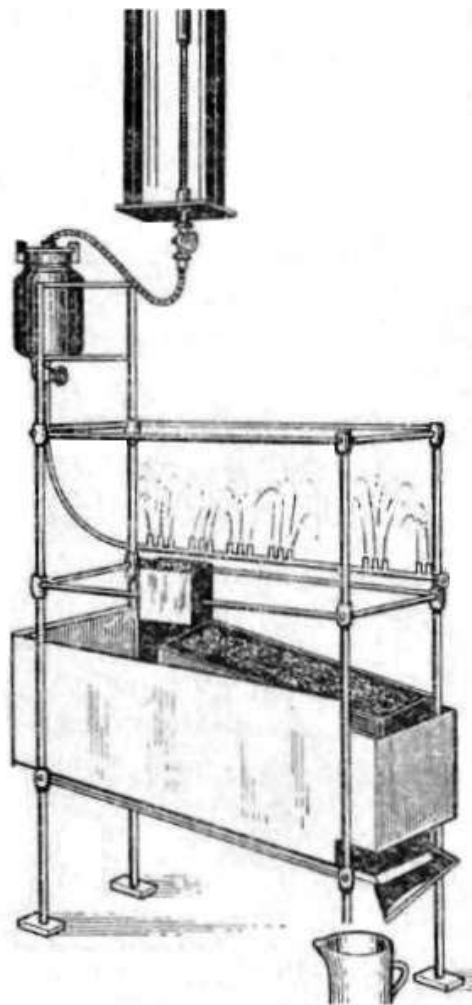
Воде в стаканчике дают отстояться, затем осторожно сливают ее избыток, а остаток выпаривают на песчаной бане. После этого стаканчик с почвой взвешивают и определяют количество смытой с образца почвы. Опыты ведут при постоянной глубине потока в рабочей части лотка, равной примерно 20 мм. Расход воды в лотке может изменяться от 0 до 5 л/с. Изменения глубины потока при заданном расходе добиваются путем изменения наклона лотка, достигаемого вращением штурвала (15) винтовой опоры лотка (16), а также открытием шторки (14). Шероховатость поверхности образца измеряют с помощью мерной иглы (13), имеющей три степени свободы. Общее требование к эрозионным гидравлическим лоткам состоит в том, чтобы входная часть лотка была бы в 8-10 раз больше его ширины и в 40 раз больше глубины потока. Эти условия обеспечивают установившийся (т.е. не изменяющийся во времени) режим течения воды в лотке. Моделирование в лотке ведется в масштабе 1:1, т.е. $\delta_L = 1$, поэтому в соответствии с уравнением $\delta_V = \delta_L^{0,5}$ масштаб скоростей $\delta_V = 1$, а коэффициент пересчета получаемой в результате моделирования размывающей скорости на натурные условия равен 1 [95].

На большом и среднем гидрологических лотках на факультете почвоведения Московского университета М.С. Кузнецов и В. Я. Григорьев провели большие исследования по выявлению размывающих скоростей потоков.

4.3 Искусственное дождевание в лабораторных условиях

В лабораторных дождевальных установках путем воссоздания дождя изучается воздействие его капель на почвенные агрегаты, на формирование стока и смыва. Проводится дождевание почвенных монолитов, а также дождевание с одновременным напуском воды, имитирующим подток стекающей воды с вышерасположенного участка склона.

Существует много разновидностей таких установок, в качестве примера можно привести одну из них, описанную в учебнике М.Н. Заславского [53], разработанную В.М.Сахаровым (рис. 4.2).



На дождевальной установке в лаборатории экспериментальной геоморфологии Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова проведены важные исследования по выявлению механизма оврагообразования. В течение ряда лет изучение эрозии в лабораторных условиях проводил Г.В. Бастраков.

В лабораторных условиях изучается водопрочность структурных агрегатов, влияние химического состава, физико-химических и физических свойств почв на их противозэрозионную устойчивость.

Как отмечается в [53], в эрозиоведении применяется много специфических методов исследований. Необходимо их совершенствование с тем, чтобы они обеспечивали получение объективных результатов, отражающих закономерности проявления эрозионных процессов и эффективность изучаемых противозэрозионных мероприятий.

Рис. 4.2. Дождевальная установка конструкции В.М. Сахарова [53]

Полевая дождевальная установка конструкции В.И. Тарасова, описанная в подразделе 3.3.4, может служить и как лабораторная. С этой целью были изготовлены лотки меньшего размера (0,25 x 0,25 м), заполняемые в поле монолитами грунта с ненарушенным строением или в лаборатории – насыпным грунтом с последующим уплотнением. Для работы с монолитами требуется много лотков, а их транспортировка с поля затруднена, особенно с отдаленных объектов в ходе экспедиционного обследования большой территории. Поэтому такое применение установки менее информативно, чем непосредственно в поле.

4.4 Лабораторная установка для изучения миграции веществ в почвенном профиле при эрозионно-гидрологических процессах

Чтобы решить проблему обеспеченности нужным количеством образцов для лабораторных исследований в ЛИАПП был разработан метод, основанный на применении лабораторной установки, защищенной патентом № 63224 А «Лабораторная установка для изучения миграции веществ в почве при эрозионно-гидрологических процессах» (Зубов, Тарасов, Михайлов, 2004 [146]), (рис. 4.3). Разработана и другая установка ([144]).

Установка [146] имеет лоток 1 с регулируемым наклоном, кассету 2 для почвенного монолита, составляемую из металлических режущих колец,

соединенных при помощи резиновых колец.

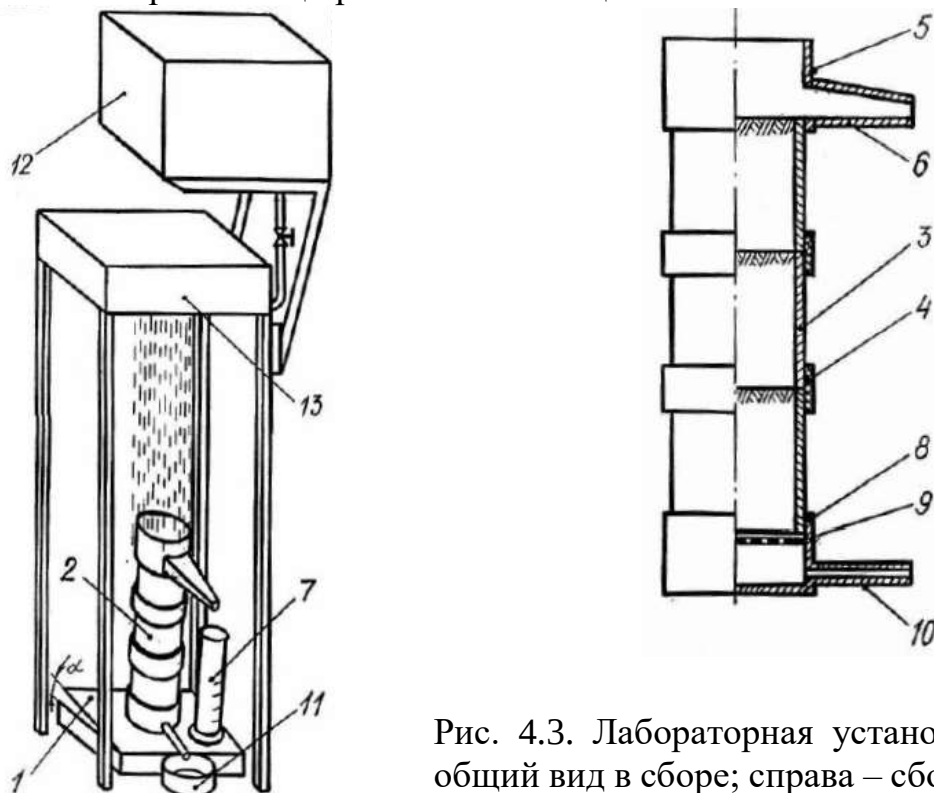


Рис. 4.3. Лабораторная установка: слева – общий вид в сборе; справа – сборная кассета

Сверху на кассету одевается кольцо 5 с водоотводным лотком 6. Для сбора поверхностного стока служит емкость 7. Оборудование для учета внутрипочвенного стока представлено съемным дном 8 с поддерживающей сеткой 9 и водоотводной трубкой 10, а также емкостью 11 для сбора фильтрата. Для имитации жидких осадков служит дождеватель 13, вода в который подается из резервуара 12. Как и в установке конструкции В.И. Тарасова, дождеватель имеет дно с отверстиями, в которые пропущены нити с каплеобразователями. Отличие состоит в площади дна (64 см^2) и количестве каплеобразователей (4 шт).

Как пример применения установки приведем исследования, проводившиеся в 2007 году аспиранткой Зубова А.Р. Еременко А.А. совместно с сотрудниками лаборатории защиты почв от эрозии ЛИАПП, руководимой в то время к.с.-х.н. Тарасовым В.И. Результаты описываемых исследований отражены в аспирантском отчете и диссертационной работе А.А. Еременко.

Исследовалось стокообразование, смыв и разбрызгивание почвы, перемещение тяжелых металлов с фильтратом в почвенных образцах.

Ход работы. Почвенные монолиты высотой 10 см отбирались послойно из почвенных горизонтов 0-10, 10-20 и 20-30 см в цилиндры с двумя съемными крышками (диаметр 80 мм, высота 100 мм, объем 500 см^3). Место отбора (исследуемые агрофоны): сад, отвальная вспашка, рожь, лесополоса, подсолнечник, озимая пшеница в опытном хозяйстве ЛИАПП «Металлист».

Из колец складывались кассеты и дождевались с высоты 73 см.

В ходе дождевания на поверхность каждого почвенного образца подавался объем воды, равный 475-600 мл, формирующий слой осадков 95-120 мм. Согласно рис. 3.56, такому слою осадков соответствует обеспеченность 1-3%

(повторяемость 1-3 раза за 100 лет или 1 раз в 33-100 лет). Интенсивность осадков менялась в пределах 1,14 – 2,09 мм/мин.

В процессе дождевания возникал поверхностный сток, происходило разбрызгивание падающих капель вместе с частицами почвы, истечение воды, фильтрующейся через колонку. Сток и фильтрат профильтровывались через предварительно взвешенные фильтры с помощью прибора ГР-60. Разбрызгиваемые частицы отлагались на стенках специального плексигласового корпуса, имеющего вид усеченной опрокинутой пирамиды. Затем они смывались с помощью спринцовки, высушивались и взвешивались.

Результаты исследований представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Показатели осадков, стока, фильтрации влаги и потерь почвы при стоке и разбрызгивании капель в экспериментах с лабораторной установкой

Агрофон	Повторность	Интенсивность осадков, мм/мин	Слой, мм				Кэфф. стока	Влажность почвы в слое 0-30 см, %	Вынос почвы, т/га	
			осадков	стока	фильтрата	поглощения			при стоке	при разбрызгивании
Отвальная вспашка	1	2,09	120	11	62	47	0,092	29,4	0,14	7,04
	2	1,14	98	10	19	69	0,102	26,4	0,26	10,14
	3	1,21	90	8	20	62	0,089	24,6	0,14	5,14
	В среднем	1,48	102,7	9,7	31,3	59,3	0,095	26,8	0,18	7,44
Рожь	1	1,70	101	9	23	69	0,089	21,8	0,14	7,78
	2	1,23	100	14	26	60	0,14	22,7	0,12	6,64
	3	1,28	95	12	33	50	0,126	20,3	0,14	8,02
	В среднем	1,40	98,7	11,7	27,3	59,7	0,12	21,6	0,13	7,48
Лесо-полоса	1	2,17	106	3	33	70	0,028	20,2	0,02	4,48
	2	1,28	102	2	38	62	0,020	21,2	0,00	0,60
	3	1,73	105	5	38	62	0,048	23,1	0,00	2,32
	В среднем	1,73	104,3	3,3	36,3	64,7	0,032	21,5	0,007	2,47
Подсол-нечник	1	1,71	100	9	58	33	0,09	21,1	0,20	9,82
	2	1,46	103	11	71	21	0,107	26,6	0,18	3,40
	3	1,62	104	8	73	23	0,077	28,6	0,22	8,60
	В среднем	1,60	102,3	9,3	67,3	25,7	0,091	25,4	0,20	7,27
Озимая пшеница	1	1,39	102	9	45	48	0,088	24,4	0,14	9,48
	2	1,36	96	13	41	42	0,135	24,1	0,24	12,44
	В среднем	1,38	99	11	43	45	0,112	24,3	0,19	10,96

Как видим, несмотря на большой слой и интенсивность осадков, вынос почвы со стоком был очень мал, хотя значения стока были достаточны для формирования потерь почвы, измеряемых тоннами с гектара. Для образцов, отобранных с полевых агрофонов, смыв варьировал в интервале 0,12-0,26 т/га, а в лесной полосе отсутствовал вовсе. Был очень мал и коэффициент стока. Гораздо большим было разбрызгивание почвы. Только в лесной полосе оно в среднем равнялось 2,47 т/га, а на остальных фонах в среднем по вариантам изменялось от 7,27 т/га до 10,96 т/га без явно выраженных закономерностей.

Сравнительно малый сток может быть объяснен высоким слоем фильтрации воды – до 73 мм из 104 мм поданной. Отмечается закономерность увеличения фильтрации при более высокой влажности почвы. Фильтрация может

свидетельствовать о высокой некапиллярной пористости, связанной, возможно, с растрескиванием образцов при их отборе, с известным по литературе краевым эффектом просачивания воды вдоль стенок [101] и др.

Такая аномалия, как малый смыв, говорит о том, что данный метод **нельзя** рассматривать как способ оценки потерь почвы в целом на полях с различными культурами севооборота. Потери почвы от стока **нельзя подменять** потерями от разбрызгивания - ведь, как отмечалось в подразделе 1.2.2, его роль в перемещении почвы вдоль склона невелика. Не учитываются при оценке стока данным методом емкость нанороельефа, проективное покрытие, длина склона.

Реальная роль данной установки – оценивать противоэрозионную стойкость почв, энергию искусственного дождя (как в чашках Эллисона, но в лабораторных условиях), изучать водопроницаемость почв в связи с режимом осадков.

Важное назначение установки, заложенное в ее названии [146] – это изучение фильтрационных процессов и миграции химических элементов по почвенному профилю. Краткие результаты этой работы, выполненной Еременко А.А., для примера приведены на рис. 4.4. Полученный фильтрат анализировали на содержание тяжелых металлов. Предварительно был выполнен анализ используемой для дождевания воды естественных осадков, отобранных в промышленной зоне Луганска. Как видим, наибольшее содержание в дождевой воде имели Mn и Zn, наименьшее V, Cu, Pb. Но изменение состава дождевых вод при фильтрации, как видим на рис. 4.4, происходило по-разному.

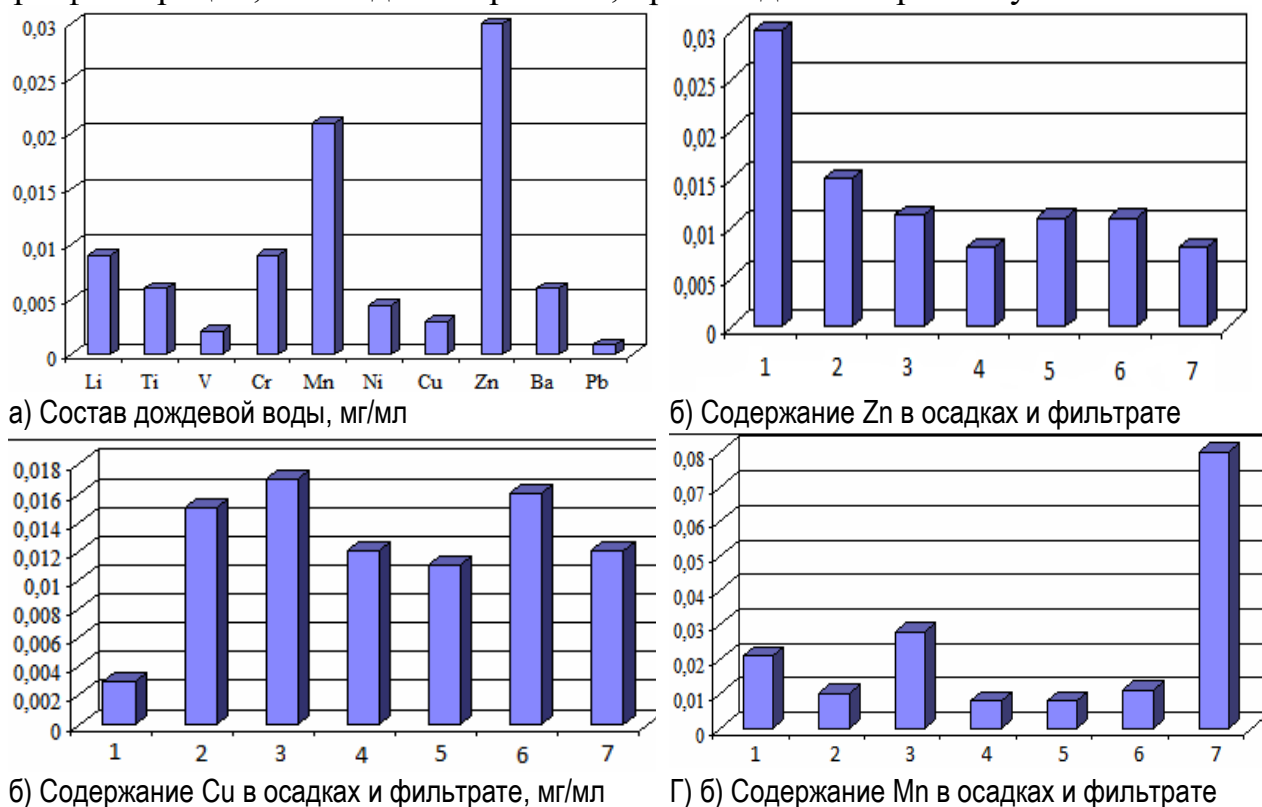
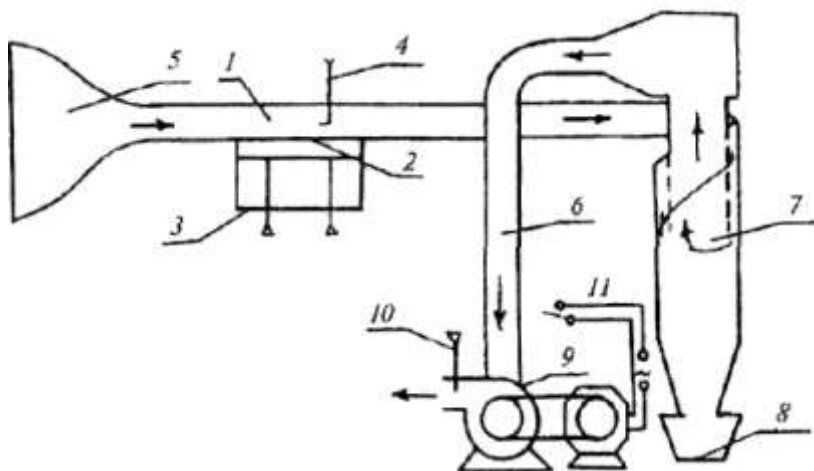


Рис. 4.4. Диаграмма состава дождевой воды (а) и содержания различных элементов в дождевой воде (1) и фильтрате из образцов с различных угодий: 2 – сад; 3 – вспашка; 4 – рожь; 5 – лесополоса; 6 – подсолнечник; 7 - озимая пшеница.

4.5 Устройство и принцип работы аэродинамической установки, используемой в исследованиях МГУ им. М. В. Ломоносова

Аэродинамическая установка, используемая на кафедре эрозии почв факультета почвоведения МГУ (рис. 4.5) и описанная в учебнике [95], состоит из рабочей части закрытого типа (1), воздухопроводов (6), вентилятора (9), циклона-пылеуловителя (7) и выключателя (11) мотора вентилятора.



Направление движения воздушного потока в установке показано стрелками. Воздушный поток взаимодействует с образцом почвы (2), расположенным в рабочей камере. При этом, если скорость его достаточна, происходит отрыв отдельных частиц почвы, они подхватываются потоком и уносятся по воздухопроводу (6) в циклон (7).

Рис. 4.5. Схема аэродинамической установки [95]

В циклоне воздух движется по спирали с большей скоростью. При этом частички почвы, влекаемые потоком, под действием центробежной силы отжимаются к стенкам циклона. Кроме того, на них действует сила тяжести, направленная вертикально вниз. В результате частички почвы движутся в циклоне по спирали вблизи его стенок и накапливаются в поддоне (8), откуда их извлекают и взвешивают с точностью до 0,001 г [95].

Поток, очищенный от частиц почвы, по воздухопроводам попадает в вентилятор, а оттуда через систему воздухопроводов и входную камеру (5) — снова в рабочую камеру. Таким образом, воздушный поток циркулирует в установке.

Воздушный поток в установке создается центробежным вентилятором (9) с электромотором мощностью 10 кВт. Скорость воздушного потока в установке прямо пропорциональна разности давления за задвижкой (10), установленной на выхлопной трубе вентилятора, и перед входом в вентилятор: $\Delta P = P_2 - P_1$. Мотор, и вентилятор работают с постоянными угловыми скоростями, поэтому скорость воздушного потока регулируют с помощью задвижки (10). Максимальная скорость воздушного потока на оси рабочей камеры установки равна 24 м/с.

Входная камера установки имеет сложную форму, позволяющую таким образом изменить поток, что в рабочей камере скорость потока в каждом сечении, перпендикулярном оси установки, практически постоянна. И только в пристеночной области она уменьшается с приближением к стенке или поверхности почвы. При этом степень уменьшения пропорциональна шероховатости стенки или почвенной поверхности.

Длина рабочей камеры 2,25 м. В сечении она имеет форму квадрата со

стороной 0,25 м. Боковые стенки рабочей камеры прозрачны, что позволяет вести визуальные наблюдения и фиксировать процесс на пленку. Почвенный образец помещается в рабочую камеру с помощью подъемного устройства (3) вручную снизу-вверх в прорезь в дне рабочей камеры. Соединение ванночки, содержащей почву, с краями прорези в дне рабочей камеры герметично [95].

Образцы исследуемой почвы нарушенного сложения помещают в ванночки размером 62,5 x 17,5 см, глубиной 2,5 см. Подъемное устройство позволяет вести работу и с монолитными образцами. Однако это возможно только, если образцы в поле взяты в специальные металлические кассеты. Установка позволяет изучать влияние физических свойств почвы на ее противодефляционную стойкость. Скорость потока измеряют с помощью микроманометра типа ММН и зонда, представляющего собой комбинированную трубку Пито—Прандтля (4). Зонд можно перемещать в плоскости перпендикулярной потоку в двух направлениях, что позволяет измерять поле скоростей вблизи почвенной поверхности.

Моделирование в аэродинамической трубе, как и в эрозионной лотке, ведется в масштабе 1:1, т.е. $\delta_L = 1$, поэтому в соответствии с уравнением $\delta_v = \delta_L^{0,5}$ масштаб скоростей $\delta_v = 1$, а коэффициент пересчета получаемой в результате моделирования скорости начала массового движения частиц на натурные условия равен 1 [95].

4.6 Аэродинамическая установка, разработанная в ВНУ им. В. Даля

Используя вышеописанную установку как прототип, нами в Восточно-украинском национальном университете им. В. Даля (Луганск) была разработана и изготовлена лабораторно-полевая аэродинамическая установка, защищенная патентом [147]. Она содержит рабочую камеру 1, воздухопроводы 2 и 3, компрессор 4, пылеуловитель 5 (рис. 4.6).

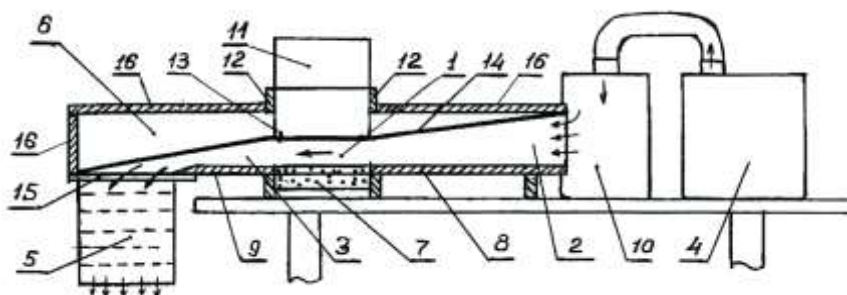


Рис. 4.6. Лабораторная аэродинамическая установка [147]

Установка изготовлена из двух листов оргстекла 6, между которыми (с разрывом для размещения кюветы 7 длиной 160 мм с образцом почвы или породы) сделаны две плоские вставки 8 и 9, образующие дно подводящего 2 и отводящего 3 воздухопроводов. В подводящий воздухопровод 2 подается воздух из распределительной камеры 10, в которую он нагнетается компрессором 4. Потолок рабочей камеры выполнен в виде прямоугольного деревянного поршня 11, перемещающегося между двумя вертикальными направляющими 12 и имеющего снизу металлическую скобу 13, удерживающую резиновую ленту 14 с возможностью ее горизонтального перемещения относительно нижней грани

поршня. Концы ленты соединены с началом подводящего и с концом отводящего воздухопроводов, а сама лента служит потолком воздухопроводов. При перемещении поршня вверх-вниз меняется высота камеры, а значит и площадь ее поперечного сечения. За вставкой 9 под горизонтальной крышкой 15 с вырезом для входа боковых стенок 6 прикреплен пылеуловитель 5 в виде стандартной колонки почвенных сит с размером ячеек 10, 5, 3, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,1 мм и нижним тканевым дном. Для придания конструкции установки большей прочности между её боковыми стенками 6 с торца и сверху сделаны вставки 16.

Работает установка следующим образом. В разъем между пластинами 8 и 9 вставляется кювета 7 с образцом почвы или горной породы. Поршень устанавливается в самое высокое положение. Включается компрессор мощностью 0,6 кВт, нагнетающий воздух в распределительную камеру 10, из которой тот поступает в подводящий воздухопровод 2. Скорость воздушного потока V под поршнем над образцом равна Q/S , где Q – расход воздушного потока, а S – площадь его поперечного сечения, равная произведению ширины камеры B на ее высоту H . Задавая различные значения высоты расположения поршня, меняют скорость потока над образцом на определенный промежуток времени, после чего снимают колонку сит и взвешивают порции частиц каждого из интервалов размеров: >10, 10-5, 5-3, 3-2, 2-1, 1-0,5, 0,5-0,25 и менее 0,25 мм. Затем повторяют опыт с этим же образцом или меняя его на новый, но с другой скоростью потока. В результате получают зависимость интенсивности выноса частиц каждого диаметра от скорости потока – от критической до ураганной.

Возможны два варианта применения установки в экспедиционных условиях: 1) в постоянной или временной лаборатории, оснащенной источником электрического тока; 2) непосредственно на изучаемом полевым или техногенном объекте. При размещении установки в лаборатории используют кюветы, наполненные грунтом нарушенной или ненарушенной структуры, доставленные с объекта исследований. Во втором случае установку кладут непосредственно на грунт, предварительно забив в него металлическую рамку и выполнив выемку грунта под выступающие части установки. В качестве компрессора используют бензиновый садовый ветродув. На данное техническое решение подана дополнительная заявка на патент.

Поскольку скорость воздушного потока в камере регулируется путем изменения ее высоты, для тарирования установки вначале определяли расход потока Q объемным методом – по времени наполнения полиэтиленовой оболочки с известным объемом (250 л), прикрепляемой снизу к ситам. Скорость потока в рабочей камере определяли по формулам, приведенным выше. Результаты тарирования представлены на рис. 4.7.

Данная установка была использована для моделирования в лабораторных условиях процесса ветровой эрозии на терриконах [73]. Для опытов использована отвальная порода со склона плоского отвала бывшей шахты им. П. Л. Войкова ПАО «Лисичанскуголь».

Начальным этапом экспериментов по изучению закономерностей дефляции на породных отвалах стало установление зависимости интенсивности выноса

частиц породы различного размера с поверхности насыпного образца, находящегося в несвязном состоянии, от скорости воздушного потока.

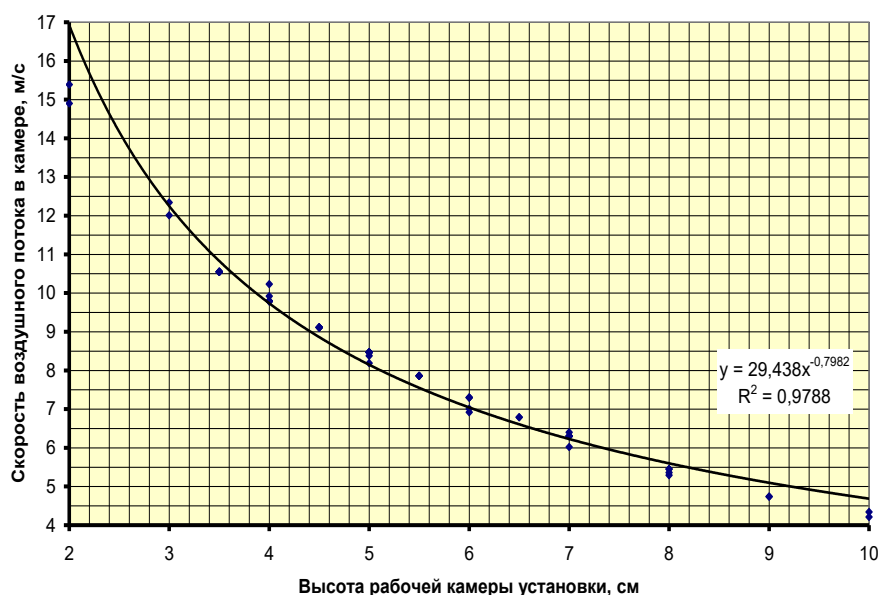


Рис. 4.7. Тарировочная кривая зависимости средней скорости воздушного потока в рабочей камере установки от ее высоты

Продолжительность каждого опыта равнялась 60 с. Образцы породы вначале с помощью почвенных сит разделялись на отдельные фракции. Каждая фракция насыпалась в кювету, которую затем взвешивали на весах ВЛКТ-500 с точностью до 0,01 г. После каждого опыта кювету повторно взвешивали и определяли потерю массы в результате дефляции.

В ходе опытов с каждой фракцией породы поэтапно увеличивали скорость воздушного потока в рабочей камере от 3-4 до 14-15 м/с. Несмотря на наличие тарировочной кривой, в каждом опыте дополнительно контролировали среднюю скорость воздушного потока в камере путем определения времени наполнения полиэтиленовой оболочки объемом 250 л.

Полученные средние по высоте камеры значения скорости ветра приводили к ее значению на высоте оси камеры, используя табл. 4.9. Затем с помощью номограммы (рис. 4.12) приводили полученные уточненные значения скорости к ее значению на высоте 10 м. Промежуточные и итоговые результаты опытов представлены в табл. 4.2. На основании данных таблицы построен график зависимости интенсивности выноса частиц различного размера от скорости ветра, регистрируемой на метеостанциях (рис. 4.8).

Таблица 4.2

Результаты опытов по моделированию ветровой эрозии породы

№ опыта	Высота камеры Н _к , см	Масса образца, г		Потеря массы Δm, г	Интенсивность дефляции		Расход воздуха Q, л/с	Скорость потока, м/с	
		до опыта, m ₁	после опыта, m ₂		г/мин	т/га·ч		средняя в камере	на высоте 10 м
фракция 5 – 7 мм									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4,0	247,10	247,10	0,00	0,00	0,00	19,8	11,0	26,3
2	3,0	247,10	245,25	1,85	1,85	182,6	18,9	14,0	33,7

<i>фракция 2 – 3 мм</i>									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10,0	242,90	242,85	0,05	0,05	4,9	25,8	5,7	10,5
2	9,0	242,85	242,85	0,00	0,00	0,0	22,7	5,6	10,5
3	8,0	242,85	242,80	0,05	0,05	4,9	23,6	6,6	12,7
4	7,0	242,80	242,80	0,00	0,00	0,00	23,2	7,4	14,5
5	6,0	242,80	242,75	0,05	0,05	4,9	21,7	8,1	16,3
6	5,0	242,75	242,70	0,05	0,05	4,9	21,4	9,5	19,7
7	4,0	242,70	241,38	1,32	1,32	130,3	18,9	10,5	23,0
8	3,0	241,38	233,90	7,48	7,48	738,1	19,4	14,4	33,5
<i>фракция 1 – 2 мм</i>									
1	10,0	244,95	244,85	0,10	0,10	9,9	23,2	5,2	9,2
2	9,0	244,85	244,70	0,15	0,15	14,8	23,8	5,9	10,6
3	8,0	244,70	244,50	0,20	0,20	19,7	23,2	6,4	11,7
4	7,0	244,50	241,10	3,40	3,40	335,5	22,3	7,1	13,3
5	6,0	246,10	228,75	17,35	17,35	1712,1	21,4	7,9	15,2
<i>фракция 0,5 – 1 мм</i>									
2	11,0	242,20	241,95	0,25	0,25	24,7	25,3	5,1	8,5
3	10,0	241,95	241,90	0,05	0,05	4,9	23,4	5,9	10,0
4	9,0	241,90	241,20	0,70	0,70	69,1	24,8	6,1	10,5
5	8,0	241,20	239,47	1,73	1,73	170,7	23,8	6,6	11,6
6	7,0	236,20	233,90	2,30	2,30	227,0	22,5	7,2	12,8
<i>фракция 0,25 – 0,5 мм</i>									
1	11,0	254,50	254,40	0,10	0,10	9,9	16,0	3,2	5,2
2	10,0	254,27	254,15	0,12	0,12	11,9	16,1	3,6	5,9
3	9,0	254,15	253,90	0,25	0,15	14,8	15,5	3,8	6,3
4	8,0	253,90	253,72	0,18	0,18	17,8	15,0	4,2	7,1
5	7,0	253,72	253,42	0,30	0,30	29,6	13,9	4,4	7,6
6	6,0	253,42	251,15	2,27	2,27	224,0	13,5	5,1	8,1
7	5,0	251,15	246,15	5,00	5,00	493,4	13,4	5,9	10,9
<i>фракция 0,1 – 0,25 мм</i>									
1	11,0	239,45	238,91	0,54	0,54	53,3	19,87	4,01	7,47
2	10,0	238,91	238,75	0,32	0,32	31,6	19,22	4,27	8,06
3	9,0	238,75	238,51	0,48	0,48	47,4	18,38	4,54	8,74
4	8,0	238,51	237,98	1,06	1,06	104,6	18,12	5,03	9,85
5	7,0	237,98	237,33	1,3	1,30	128,3	17,61	5,59	11,19
6	6,0	237,33	235,32	4,02	4,02	396,8	15,32	5,67	11,67
7	5,0	235,32	229,35	11,94	11,94	1179	13,48	5,99	12,8
8	4	239,36	210,06	58,6	58,60	5784	11,69	6,49	14,43
9	3	244,68	190,92	107,52	107,52	10612	21,51	9,56	22,5
<i>фракция менее 0,1 мм</i>									
1	11,0	240,55	240,48	0,14	0,14	13,8	19,2	3,88	5,89
2	10,0	240,48	240,44	0,08	0,08	7,90	19,67	4,37	6,74
3	9,0	240,44	240,40	0,08	0,08	7,90	19,53	4,82	7,53
4	8,0	240,40	240,35	0,1	0,1	9,87	19,62	5,45	8,54
5	7,0	240,35	240,33	0,04	0,04	3,95	19,83	6,30	10,13
6	6,0	240,33	240,27	0,12	0,12	11,84	19,69	7,29	11,92
7	5,0	240,27	240,10	0,34	0,34	33,6	19,38	8,61	14,34
8	4	240,10	239,59	1,02	1,02	100,7	18,42	10,23	17,51
9	3	239,59	238,54	2,1	2,1	207,3	16,85	12,48	22,08

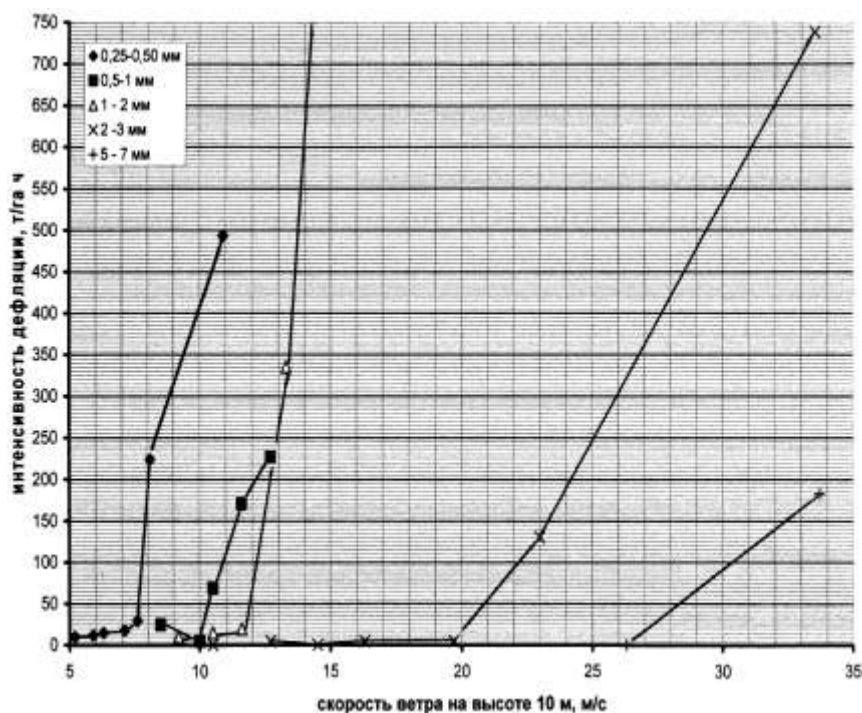


Рис. 4.8. Эмпирическая зависимость интенсивности дефляционного выноса различных фракций терриконовой породы от скорости ветра

Эксперименты подтвердили закономерности, полученные в результате исследований У. Чепила [213] и Г. П. Глазунова [42], выполненных в США и в России для различных почв. Как отмечает Л.Ф. Смирнова [176], У. Чепил выделил два предела критических скоростей: нижний, при котором начинается перемещение самых подвижных частиц (слабая дефляция) и верхний, при котором перемещается большая часть почвенных частиц (сильная эрозия).

Наши исследования, выполненные для отвальной породы, позволили получить обе критические скорости в зависимости от среднего размера частиц различных фракций породы и показали, что вынос частиц любого размера начинается при некотором значении скорости потока (нижняя критическая скорость $V_{кр1}$) и характеризуется вначале плавным, а затем резким возрастанием при достижении верхней критической скорости $V_{кр2}$ (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Показатели дефляционной опасности различных фракций породы

Показатели	Фракции породы, мм						
	<0,1	0,1-0,25	0,25-0,5	0,5-1	1-2	2-3	5-7
$V_{кр1}$, м/с	5,89	7,47	5,2	8,5	9,2	10,5	26,3
$d_{кр1}$, т/га·ч	13,82	53,3	9,9	24,7	9,9	4,9	0
$V_{кр2}$, м/с	14,34	9,9	7,6	10,5	11,7	19,7	не установлена
$d_{кр2}$, т/га·ч	33,56	104,6	29,6	69,1	19,7	4,9	не установлена
$V_{макс}$, м/с	22,08	22,5	10,9	12,8	15,2	33,5	33,7
$d_{макс}$, т/га·ч	207,27	10612	493,4	227	1712	738,1	182,6

Примечания: $d_{кр1}$ и $d_{кр2}$ – интенсивности дефляционного выноса фракций породы, соответствующие нижней и верхней критическим скоростям;

$V_{макс}$ и $d_{макс}$ – максимальная скорость потока, достигнутая в экспериментах, и соответствующая ей интенсивность выноса.

Для фракций отвальной породы размером до 2 мм первая критическая скорость находится в интервале от 5 до 9,2 м/с, а вторая – от 7,6 до 11,7 м/с. Соотношение между скоростями изменяется от 1,27 до 1,52, а в среднем равно 1,4, что соответствует обобщенным данным, полученным Л.Ф.Смирновой [176]. Как видим в табл. 4.6, наименьшие значения обеих критических скоростей имеют место для частиц породы размером 0,25-0,5 мм, а при уменьшении или увеличении размера частиц обе скорости становятся больше. Эта необычная, казалось бы, закономерность характерна, как свидетельствуют исследования [31, 213, 176 и др.], и для почвенных частиц, однако минимум скоростей имеет место при размере частиц 0,1 мм. Л.Ф. Смирнова объясняет эту закономерность тем, что между мелкими частицами действуют поверхностные силы сцепления, кроме того они находятся в вязком ламинарном приповерхностном слое воздуха высотой 0,05 см, в котором нет турбулентности.

Как свидетельствует табл. 4.3, дефляционный вынос породы при экстремальных скоростях ветра характеризуется катастрофическим размером – до 10612 т/га ч. Как можно предположить, в реальных условиях от такого катастрофического пыления терриконов окружающую среду защищает то, что легколетучие фракции довольно быстро покидают поверхность отвала, а остаются на ней более крупные, инертные фракции. Кроме того, в естественных условиях поверхность отвалов находится в разрыхленном состоянии относительно короткое (хотя и измеряемое годами) время – в период отсыпки. Именно этот период и является наиболее опасным для окружающей среды, а в последующем поверхность самоуплотняется и «цементируется» в результате чередования периодов увлажнения и высыхания и становится менее податливой к дефляции.

Закономерности процесса дефляции отвальной породы, находящейся в связанном состоянии, и количественная оценка ее выноса с единицы площади поверхности отвалов за сезоны и год в целом.

Следующим этапом стали эксперименты с образцами породы не разделенной на фракции. Наполнялись кюветы четырьмя способами (табл. 4.4): 1) с разравниванием поверхности без уплотнения; 2) с разравниванием и уплотнением; 3) с разравниванием без уплотнения, но с чередованием увлажнения и последующего высыхания на протяжении 10 дней; 4) с разравниванием, уплотнением и с чередованием увлажнения и высыхания; 5) с уплотнением и увлажнением в результате ударного действия капель.

Целью способов 3-5 была имитация естественного процесса формирования связности отсыпаемой на отвал породы.

Расчет скорости ветра на высоте флюгера выполнялся с использованием уравнения (4.1), в котором параметр шероховатости z_0 рассчитывался по формуле, разработанной Ю.И.Васильевым [31]:

$$z_0 = (0,0055d_e + 0,004)d_e^{0,4}, \quad (4.1)$$

где d_e – эквивалентный диаметр частиц породы, равный в нашем случае 3 мм; поэтому $z_0 = 0,03$.

Полученные зависимости интенсивности выноса частиц породы с поверхности образцов представлены графически на рис. 4.9.

Таблица 4.4

Условия проведения опытов со смешанными образцами и их результаты

№ опыта	Высота камеры Н _к , см	Масса образца, г		Потеря массы Δт, г	Интенсивность выноса частиц		Расход воздуха Q, л/с	Скорость потока, м/с	
		до опыта, т ₁	после опыта, т ₂		г/мин	т/га·ч		в камере	на высоте 10 м
Сцементированный неуплотненный образец									
1	10	254,44	254,40	0,04	0,04	3,95	18,95	4,21	7,2
2	9	254,40	254,38	0,02	0,02	1,97	19,19	4,74	8,2
3	8	254,38	254,37	0,01	0,01	0,99	19,05	5,29	9,3
4	7	254,37	254,37	0,00	0,00	0,00	18,97	6,02	10,8
5	6	254,37	254,35	0,02	0,02	1,97	18,93	7,01	12,9
6	5	254,35	254,19	0,16	0,16	15,79	18,42	8,19	15,5
7	4	254,19	253,85	0,34	0,34	33,56	17,86	9,92	19,64
8	3	253,85	251,49	2,36	2,36	232,9	16,22	12,01	24,6
9	2	251,24	239,76	11,48	11,48	1133,1	13,85	15,39	33,7
Несцементированный уплотненный образец									
1	10	261,28	261,25	0,03	0,03	2,96	19,53	4,34	7,4
2	9	261,25	261,23	0,02	0,02	1,97	19,2	4,74	8,2
3	8	261,23	261,23	0	0	0,00	19,28	5,36	9,5
4	7	261,29	261,23	0,04	0,04	5,92	20,16	6,40	11,5
5	6	261,23	261,20	0,03	0,03	2,96	18,69	6,92	12,7
6	5	261,20	261,17	0,03	0,03	2,96	18,85	8,38	15,8
7	4	261,17	260,84	0,33	0,33	32,57	18,41	10,23	20,0
8	3	260,84	258,83	2,01	2,01	198,4	16,66	12,34	25,3
9	2	258,83	243,58	15,25	15,25	1505,2	13,41	14,90	32,6
Несцементированный, неуплотненный образец									
1	11	268,69	268,59	0,1	0,1	9,87	19,84	4,01	6,80
2	10	268,59	268,55	0,04	0,04	3,95	19,61	4,36	7,46
3	9	268,55	268,48	0,07	0,07	6,91	19,35	4,78	8,39
4	8	266,69	266,44	0,25	0,25	24,68	19,04	5,29	9,3
5	7	266,44	266,25	0,19	0,19	18,75	19,03	6,04	10,9
6	6	266,25	265,76	0,49	0,49	48,36	18,95	7,02	12,9
7	5	265,76	264,68	1,08	1,08	106,60	18,56	8,25	15,7
8	4	264,68	261,64	3,04	3,04	300,05	17,04	9,47	19,5
9	3	261,64	258,36	3,28	3,28	323,74	14,95	11,07	22,8
10	2	258,36	254,18	4,18	4,18	412,57	11,59	12,88	28,4
Сцементированно-уплотненный образец (1 повторность)									
1	8	264,05	264,00	0,05	0,017	1,68	19,05	5,45	9,6
2	7	264,00	263,89	0,11	0,037	3,65	18,97	6,3	11,3
3	7	263,89	263,80	0,09	0,03	2,96	18,97	6,3	11,3
4	7	263,80	263,75	0,05	0,017	1,68	18,97	6,3	11,3
5	6,5	263,75	263,70	0,05	0,017	1,68	18,95	6,79	12,4
6	6	263,70	263,60	0,10	0,03	2,96	18,93	7,3	13,4
7	6	263,60	263,54	0,06	0,02	1,97	18,93	7,3	13,4
8	5,5	263,54	263,45	0,09	0,09	8,88	18,68	7,86	14,7
9	5	263,45	263,43	0,02	0,02	1,97	18,42	8,47	16,0
10	4,5	263,43	263,43	0,00	0,00	0,00	18,14	9,11	17,5
11	4	263,43	263,22	0,21	0,21	20,73	17,86	9,79	19,1
12	3,5	263,22	262,75	0,47	0,94	92,78	17,04	10,55	21,1

<i>Сцементированно-уплотненный образец (2 повторность)</i>									
13	5,5	262,75	262,73	0,02	0,02	1,97	18,68	7,86	14,7
14	5	262,73	262,71	0,02	0,02	1,97	18,42	8,47	16,0
15	4,5	262,71	262,64	0,07	0,07	6,91	18,14	9,11	17,5
16	4	262,64	262,54	0,10	0,10	9,87	17,86	9,79	19,1
17	3,5	262,54	262,22	0,32	0,64	63,17	17,04	10,55	21,1
<i>Сцементированно-уплотненный образец (3 повторность)</i>									
18	5	262,22	262,18	0,04	0,04	3,95	18,42	8,47	16,0
19	4,5	262,18	262,14	0,04	0,04	3,95	18,14	9,11	17,5
20	4	262,14	262,06	0,08	0,08	7,90	17,86	9,79	19,1
21	3,5	262,06	261,93	0,13	0,26	25,7	17,04	10,55	21,1

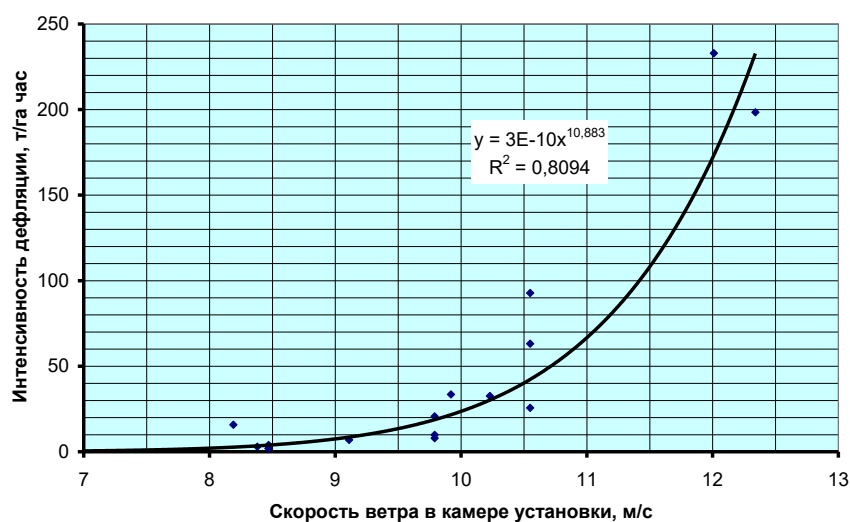


Рис. 4.9. Зависимость интенсивности выноса породы от скорости ветра в камере установки

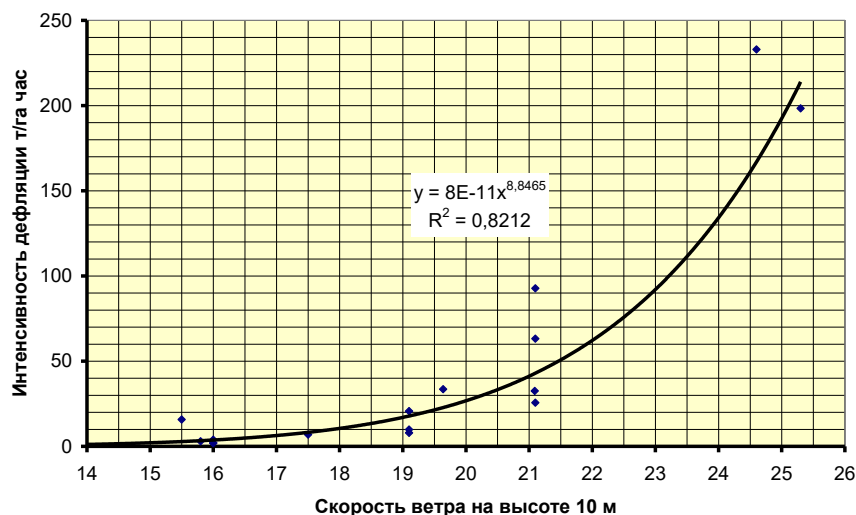


Рис. 4.10. Зависимость интенсивности выноса породы от скорости ветра на высоте флюгера

Для выявления различий в выносе частиц различного размера был проанализирован фракционный состав исследуемой породы и вынесенного материала, отложившегося на ситах установки (табл. 4.5, 4.6, рис. 4.11).

Таблица 4.5

Фракционный состав породы в вариантах опыта

№ опыта	Порода	Ед. изм	Σ	Содержание фракций							
				<0,1	0,1-0,25	0,25-0,5	0,5-1	1-2	2-5	5-10	>10
1. Опыт со сцементиров. образцом	в кассете до опыта	г	98,62	2,44	1,22	1,77	3,71	32,69	44,86	11,34	0,59
		%	100	2,47	1,24	1,79	3,76	33,15	45,49	11,50	0,60
	на ситах	г	14,44	0,32	0,22	0,77	0,91	3,78	6,65	1,56	0,23
		%	100	2,22	1,52	5,33	6,30	26,18	46,05	10,80	1,59
2. Опыт с уплотненным образцом	до опыта	г	106,2	9,61	6,34	8,05	7,54	25,88	32,22	16,21	0,35
		%	100	9,05	5,97	7,58	7,10	24,37	30,34	15,26	0,33
	на ситах	г	17,82	1,59	1,19	1,34	1,45	4,14	5,43	2,68	0
		%	100	8,92	6,68	7,52	8,14	23,23	30,47	15,04	0
3. Опыт с неуплотненным образцом	до опыта	г	109,79	31,77	10,58	5,07	4,3	16,27	27,09	14,71	0
		%	100	28,94	9,64	4,62	3,92	14,82	24,67	13,40	0
	на ситах	г	12,72	4,53	1,84	0,77	0,77	2,14	2,55	0,12	0
		%	100	35,61	14,47	6,05	6,05	16,82	20,05	0,94	0

Таблица 4.6

**Различия во фракционном составе выносимой породы
в зависимости от скорости ветра (V, м/с) в рабочей камере**

Порода		Ед. изм	Σ	Содержание фракций							
				<0,1	0,1-0,25	0,25-0,5	0,5-1	1-2	2-5	5-10	>10
В кассете до опыта		%	100	2,47	1,24	1,79	3,76	33,15	45,49	11,50	0,60
На ситах	при V от 7 до 12	%	100	2,69	3,03	10,44	11,45	19,53	44,44	8,42	0
	при V=15,4 м/с	%	100	2,18	1,13	4,01	4,97	27,87	46,43	11,41	2,00

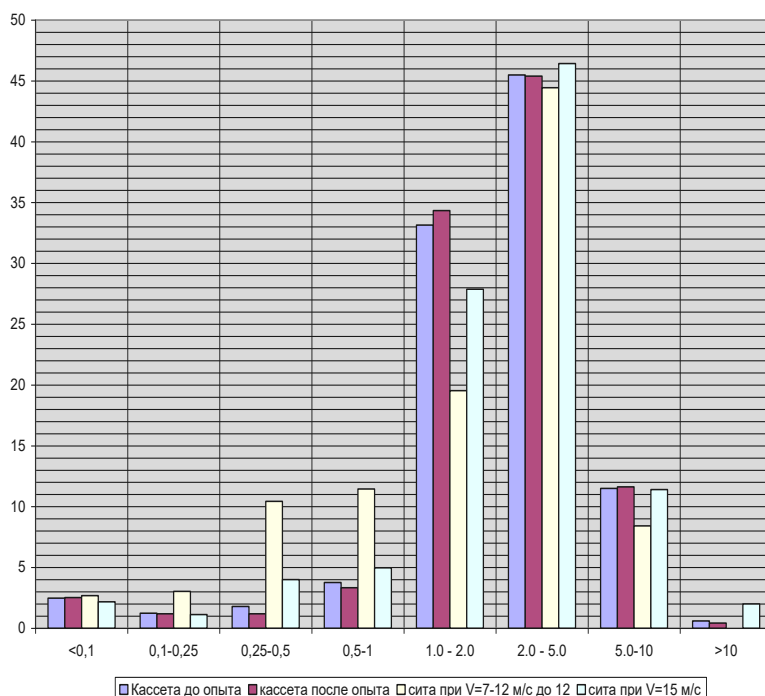


Рис. 4.11. Содержание различных фракций в исследуемых образцах породы до, после опыта и в выносимом из них материале

Сравнение фракционного состава образцов до и после их продувки с составом выносимого материала показывает, что при дефляции породы

наблюдается увеличение доли фракций размером менее 1 мм в выносимом материале по сравнению с исходным содержанием, т.е. эти фракции выносятся более активно, чем другие и названы в литературе «эрозионными» [31].

Доля фракций крупнее 1 мм в выносимой породе меньше, чем в исходной. Так, если содержание «эрозионных» и «неэрозионных» фракций в породе было соответственно 9,26 и 90,74% (соотношение 1 : 9,8), то после опытов со скоростью потока в камере от 7 до 12 м/с в выносимом материале оно равнялось 27,6 и 72,4% (соотношение 1 : 2,62). При скорости потока 15,4 м/с содержание фракций было 12,3 и 87,7% (соотношение 1 : 7,14), т.е. оно приблизилось к исходному вследствие усиления выноса «неэрозионных» частиц.

4.7 Новые методические подходы, разработанные авторами

4.7.1 Методика перехода от показателей дефляции породы, полученных в лаборатории, к естественным условиям

При изучении ветрового режима на метеостанциях скорость ветра измеряют на т. н. «высоте флюгера» (10 м). Вследствие шероховатости подстилающей поверхности скорость ветра снижается с уменьшением высоты Z (м) по логарифмическому закону [95]:

$$V_z = V_{10} \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{Z_0}\right)}, \quad (4.2)$$

где Z_0 , м – параметр шероховатости, равный для однородной поверхности, покрытой слоем частиц одинакового размера δ при максимальной плотности их расположения, $\delta/30$; V_{10} – скорость ветра по данным метеостанции.

Поэтому для правильной интерпретации результатов моделирования воздушного потока необходимо переводить скорость потока в рабочей камере к скорости на высоте 10 м. С другой стороны, для моделирования последствий ветра с заданной скоростью на стандартной высоте (10 м) в аэродинамической установке необходимо создавать воздушный поток с меньшей скоростью, определяемой выражением:

$$V_z = K_z V_{10}, \quad (4.3)$$

где V_z – скорость потока в камере на высоте ее оси Z ;

$K_z = \ln(Z/Z_0)/\ln(10/Z_0)$ – переходной коэффициент.

Таким образом, $V_z = V_{10} (\ln Z/Z_0)/\ln(10/Z_0)$.

Значение переходного коэффициента зависит от высоты рабочей камеры и размера частиц, слагающих исследуемую поверхность, поэтому были выполнены вспомогательные расчеты для его определения. Результаты представлены в табл. 4.7. Для облегчения практического применения результатов расчетов составлена номограмма (рис. 4.12), которая позволяет рассчитать, какую скорость потока надо создать в камере, чтобы имитировать поток заданной скорости на высоте 10 м и наоборот - получить значения скорости ветра на высоте 10 м, соответствующие значениям скорости

воздушного потока, созданного в аэродинамической установке.

Таблица 4.7.

Значения переходного коэффициента от скорости воздушного потока на заданной высоте к скорости на высоте флюгера

Высота над дном камеры Z, см	Параметр шероховатости Z_0 , мм (в числителе); диаметр частиц δ , мм (в знаменателе)									
	$\frac{0,00001}{0,0003}$	$\frac{0,0001}{0,003}$	$\frac{0,001}{0,03}$	$\frac{0,003}{0,09}$	$\frac{0,006}{0,175}$	$\frac{0,01}{0,3}$	$\frac{0,03}{0,9}$	$\frac{0,06}{1,8}$	$\frac{0,1}{3}$	$\frac{0,2}{6}$
0,1	0,556	0,500	0,429	0,387	0,357	0,333	0,276	0,234	0,200	0,149
0,5	0,633	0,580	0,528	0,494	0,469	0,450	0,402	0,368	0,340	0,298
1	0,667	0,625	0,572	0,540	0,519	0,500	0,457	0,426	0,400	0,362
2	0,700	0,663	0,614	0,586	0,566	0,550	0,511	0,484	0,460	0,426
5	0,744	0,712	0,672	0,647	0,630	0,616	0,583	0,560	0,540	0,51
10	0,778	0,750	0,714	0,693	0,679	0,666	0,638	0,618	0,600	0,574

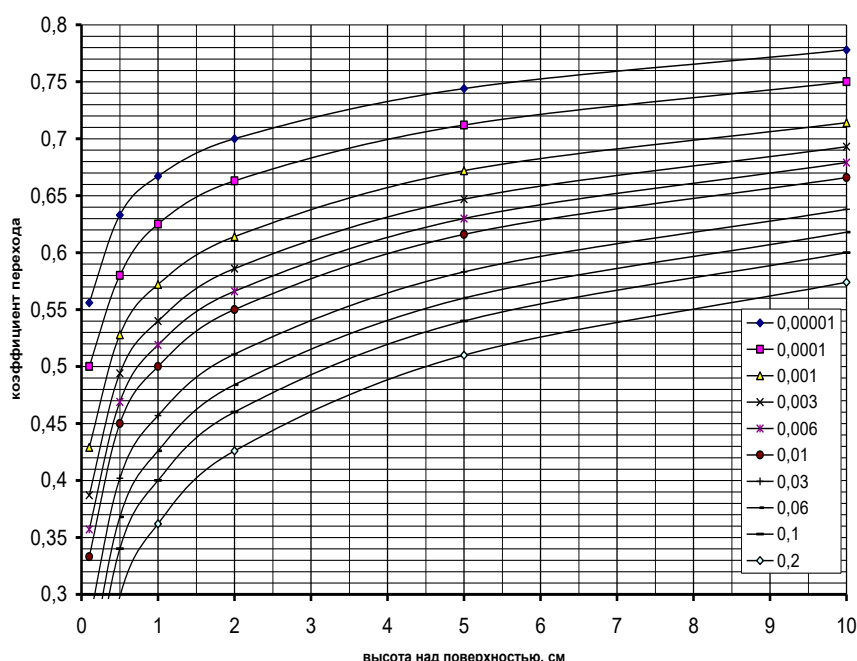


Рис. 4.12. Номограмма перехода от скорости воздушного потока на высоте флюгера к заданной высоте над подстилающей поверхностью

Для удобства применения коэффициента перехода в компьютерной программе выведено уравнение линий номограммы, имеющее вид:

$$K_{10} = (0,0044 * \ln Z_0 + 0,095) * \ln H - 0,0305 * \ln Z_0 + 0,3437 \quad (4.4)$$

Для перехода от скорости ветра на высоте 10 м к скорости на большей высоте рассчитаны коэффициенты, представленные в табл. 4.8.

Следует, однако, учесть то обстоятельство, что объемным методом мы определяем скорость потока в камере, осредненную по ее высоте. Поэтому, построив предварительно на основании данных табл. 4.7 ряд эпюр распределения скорости по высоте камеры при различных ее значениях и различной шероховатости образца, рассчитали коэффициенты перехода от осредненной скорости потока в камере к скорости на высоте ее осевой линии

(табл. 4.9). Значения коэффициента мало зависят от параметра шероховатости, нет явно выраженной их зависимости от высоты камеры и, соответственно, от скорости воздушного потока в ней, их среднее значение равно 1,02. Таким образом, в практических расчетах коэффициентом можно пренебречь.

Таблица 4.8

Значения переходного коэффициента от скорости воздушного потока на высоте флюгера к скорости на большей высоте

Высота над землей Z, м	Параметр Z_0 , мм (в числителе); диаметр частиц δ , мм (в знаменателе)				
	$\frac{0,0033}{0,1}$	$\frac{0,01}{0,3}$	$\frac{0,033}{1}$	$\frac{0,1}{3}$	$\frac{0,33}{10}$
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11
50	1,11	1,12	1,13	1,14	1,16
70	1,13	1,14	1,15	1,17	1,19
100	1,15	1,17	1,18	1,20	1,22

Таблица 4.9

Расчет значений коэффициента перехода от осредненной скорости воздушного потока к его скорости на высоте оси камеры

Высота камеры, см	Высота оси камеры Z, см	Показатель шероховатости Z_0 , мм	Скорость потока в относительных единицах		Среднее значение коэффициента $K_{0,5}$
			осредненная по высоте V_{cp}	на высоте оси камеры $V_{0,5}$	
3	1,5	0,1-0,003	0,406-0,548	0,431-0,569	1,032
5	2,5	0,1-0,003	0,476-0,588	0,479-0,600	1,013
7	3,5	0,1-0,003	0,501-0,608	0,507-0,621	1,014
10	5	0,1-0,003	0,533-0,635	0,539-0,646	1,017

4.7.2 Методика расчета продолжительности ветров различной силы за различные расчетные периоды времени

Как известно из литературных источников [31, 95, 159, 173, 176], такое опасное следствие ветра большой скорости, как ветровая эрозия (дефляция) почвы начинается при некоторой начальной скорости и активизируется по мере ее возрастания. Однако скорость ветра существенно варьирует в течение суток, месяца, сезона и года, а с ней варьирует и вынос почвы. Можно установить зависимость интенсивности выноса частиц почвы от скорости ветра, но практически невозможно прогнозировать скорость ветра даже на ближайший месяц, не говоря о ее варьировании по суткам месяца и по часам.

Выход из этого затруднения был найден в виде разработанного алгоритма, который, хотя и не дает возможности делать прогноз изменения скорости ветра во времени, позволяет оценивать для той или иной местности суммарную продолжительность ветра той или иной силы в течении года.

Предлагаемый алгоритм имеет значение не только для оценки дефляции, но и для иных важных целей, например, для оценки ветроэнергетического потенциала территории при внедрении ветроэнергетики.

Путем расчетов, выполненных на основании [158] или иных источников,

может быть составлена таблица повторяемости ветров различной скорости за многолетний период (по ближайшей к объекту исследований метеостанции) для месяцев года, его сезонов и года в целом. В нашем случае для примера были взяты данные метеостанции (МС) «Сватово» за 15 лет.

Полученные данные (табл. 4.10) предлагается интерпретировать следующим образом: ежедневно на метеостанции скорость ветра измеряется через 6 часов, т.е. 4 раза. За месяц (кроме февраля) производится 120 или 124 измерения, за 15 лет ежемесячно производится от 1800 до 1860 измерений (в феврале 1695). За каждый из четырех сезонов года за 15 лет – от 5416 до 5460 измерений, за все 15 лет общее количество измерений составило 21916.

Количество случаев попадания того или иного значения скорости в каждый из интервалов диапазона от 0 до 20 м/с за месяц, сезон, год на протяжении 15 лет является абсолютным значением их повторяемости. Отнесение этого количества к общему количеству измерений за тот или иной период является относительной повторяемостью или вероятностью за этот период.

Зная среднемноголетнюю абсолютную повторяемость определенного значения ветра за тот или иной период, можно определить суммарную продолжительность ветра с данным значением скорости за месяц, сезон и год в целом. Она рассчитывается путем умножения продолжительности периода, характеризующегося одним измерением (6 часов), на среднемноголетнюю абсолютную повторяемость данного ветра за месяц, сезон и год.

Таблица 4.10

Повторяемость ветров с различной скоростью (м/с) за 15 лет и в среднем за год по месяцам (МС Сватово)

Интервалы скоростей ветра, их средние значения и повторяемость											Общее число измере- ний
Интервал	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20	
Среднее	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	19	
Январь											
За 15 лет	430	639	485	211	74	12	4	1	4		1860
Среднее	28,7	42,6	32,3	14,1	4,93	0,8	0,267	0,067	0,267		124
Февраль											
За 15 лет	378	545	422	232	72	21	13	8	3	1	1695
Среднее	25,2	36,3	28,1	15,5	4,8	1,4	0,867	0,533	0,2	0,067	113
Март											
За 15 лет	473	623	418	221	78	23	13	3	8		1860
Среднее	31,5	41,5	27,9	14,7	5,2	1,53	0,867	0,2	0,533		124
Апрель											
За 15 лет	435	632	423	201	71	27	4	3	4		1800
Среднее	29	42,1	28,2	13,4	4,73	1,8	0,267	0,2	0,267		120
Май											
За 15 лет	553	649	419	183	39	10	4	2		1	1860
Среднее	36,9	43,3	27,9	12,2	2,6	0,67	0,27	0,13		0,07	124
Июнь											
За 15 лет	639	689	327	107	25	8	1	1	3		1800
Среднее	42,6	45,9	21,8	7,1	1,67	0,53	0,07	0,07	0,2		120

	Июль										
За 15 лет	660	689	349	123	28	5	2		4		1860
Среднее	44	45,9	23,3	8,2	1,87	0,33	0,13		0,267		124
	Август										
За 15 лет	766	683	275	107	19	4	3	2	1		1860
Среднее	51,1	45,5	18,3	7,1	1,27	0,27	0,2	0,13	0,067		124
	Сентябрь										
За 15 лет	744	595	309	110	29	7	5		1		1800
Среднее	49,6	39,67	20,6	7,33	1,93	0,47	0,333		0,067		120
	Октябрь										
За 15 лет	677	624	348	154	33	9		9	3	3	1860
Среднее	45,1	41,6	23,2	10,3	2,2	0,6		0,6	0,2	0,2	124
	Ноябрь										
За 15 лет	458	586	394	226	73	40	11	4	8		1800
Среднее	30,5	39,1	26,3	15,1	4,87	2,67	0,733	0,267	0,533		120
	Декабрь										
За 15 лет	425	690	482	190	49	9	8	4	3		1860
Среднее	28,3	46,0	32,1	12,7	3,27	0,6	0,53	0,267	0,20		124

Для определения среднемноголетней интенсивности выноса породы за тот или иной период надо знать количество случаев той или иной скорости ветра за этот период в среднем за время наблюдений (в данном случае за 15 лет). Поэтому месячное количество случаев за время наблюдений делили на 15.

Таблица 4.11

Среднемноголетняя повторяемость и продолжительность ветра различной силы по сезонам и за год (МС Сватово)

Интервалы скоростей ΔV (м/с), средне-интервальные значения V , их среднемноголетние повторяемость N и продолжительность $T_{\text{сумм}}$ (час)											Сумма
ΔV	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-20	
V	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	19	
Зима											
N	82,2	124,9	92,5	42,3	13	2,8	1,664	0,87	0,67	0,067	361
$T_{\text{сумм}}$	493,2	749,4	555	253,8	78	16,8	9,984	5,22	4,02	0,402	2166
Весна											
N	97,4	126,9	84	40,3	12,53	4	1,404	0,54	0,80	0,067	368
$T_{\text{сумм}}$	584,4	761,4	504	241,8	75,18	24	8,424	3,24	4,8	0,402	2208
Лето											
N	137,7	137,3	63,4	22,4	4,81	1,13	0,4	0,2	0,54		368
$T_{\text{сумм}}$	826,2	823,8	380,4	134,4	28,86	6,78	2,4	1,2	3,24	0	2208
Осень											
N	125,2	120,4	70,1	32,73	9	3,74	1,066	0,87	0,8	0,200	364
$T_{\text{сумм}}$	751,2	722,4	420,6	196,38	54	22,44	6,396	5,22	4,8	1,2	2184
За год											
N	442,5	509,5	310	137,7	39,34	11,7	4,53	2,47	2,81	0,334	1461
$T_{\text{сумм}}$	2655	3057	1860	826,2	236,0	70,2	27,18	14,82	16,86	2,004	8766

Зная среднегодовую повторяемость определенного значения ветра за каждый месяц, можно определить суммарную продолжительность ветра с данным значением скорости за месяц, сезон и год в целом. Она рассчитывается путем умножения продолжительности периода, характеризуемого одним измерением (6 часов), на среднегодовую абсолютную повторяемость данного ветра за месяц, сезон и год в целом.

Зная продолжительность ветров различной силы за тот или иной расчетный период, можно определить и общую массу породы, выносимой за данный период. Но для этого необходимо знать зависимость интенсивности выноса породы от скорости ветра.

Установление зависимости интенсивности выноса частиц связной породы от скорости ветра позволило сделать количественную оценку ее выноса с единицы площади за различные интервалы времени. Результаты расчета представлены в табл. 4.12, переведены в продолжительность ветров различной силы, и рассчитан вынос породы при каждой скорости ветра, а затем общий вынос породы за каждый сезон.

Таблица 4.12

Расчетное среднегодовое количество породы, выносимой ветром с отвалов за сезоны и год

Средние скорости ветра и масса выносимой при них породы										
Средняя скорость ветра, м/с	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	19
Интенсивность выноса, т/га час	0	0	0	0	0,01	0,09	0,41	1,52	4,76	16,6
Сезон	Зима									
Продолжительность, час	493	750,6	555,6	253,8	78	16,8	10,02	5,25	4,04	0,40
Вынос т/га	0	0	0	0	0,78	1,51	4,11	7,98	19,23	6,64
Всего										40,25
Сезон	Весна									
Продолжительность, час	584	761,4	502,8	241,8	74,0	24	8,46	3,26	4,83	0,405
Вынос т/га					0,74	2,16	3,47	4,96	23,99	6,72
Всего										42,04
Сезон	Лето									
Продолжительность, час	828	823,8	380,4	134,4	28,86	6,78	2,4	1,2	3,24	0
Вынос т/га					0,29	0,61	0,98	1,82	15,42	0
Всего										19,12
Сезон	Осень									
Продолжительность, час	751	723	415,2	197,4	54	22,44	6,36	5,19	4,77	1,19
Вынос т/га					0,54	2,02	2,61	7,89	22,71	19,75
Всего										55,52
	Всего за год									
Продолжительность, час					234,9	70,02	27,24	14,90	16,88	2,00
Вынос, т/га					2,35	6,3	11,17	22,65	81,35	33,11
Всего, т/га										156,9

По расчету потенциальный вынос породы за год с одного гектара площади отвала составляет 156,9 т. Реальная интенсивность выноса породы может быть меньше расчетной потенциальной, поскольку в зимнее время порода часто бывает покрыта снегом и находится в мерзлом – «сцементированном» состоянии. Без учета зимних месяцев интенсивность выноса уменьшается до 116,7 т/га в год.

Факторами, снижающими интенсивность выноса, являются также выпадение осадков при ветре большой силы, наличие промоин, крупных обломков породы.

Продолжительность выпадения осадков надо вычитать из продолжительности каждого ветра. После прекращения дождя увлажненное состояние почвы также сдерживает вынос породы, но недолго, поскольку первые миллиметры поверхности очень скоро иссушаются сильным ветром, а каждый миллиметр – это 15 т породы.

На основании фракционного состава выносимой породы может быть рассчитана масса различных фракций, выносимых с единицы площади поверхности отвала за год (табл. 4.13).

Таблица 4.13

Массовая доля различных фракций в выносимой с отвала породе

Фракции, мм	<0,1	0,1-0,25	0,25-0,5	0,5-1	1-2	2-5	5-10	Сумма
Содержание, %	2,69	3,03	10,44	11,45	19,53	44,44	8,42	100
Масса, кг/м ² год	0,422	0,475	1,638	1,796	3,064	6,973	1,321	15,690

Как видим, содержание наиболее подвижных фракций (размером менее 0,1 мм) в выносимой породе относительно невелико, однако, с учетом ее большого количества, в абсолютном выражении весьма значительно – 4,22 т/га.

4.7.3 Теоретическая модель дефляционного выноса породы с отвалов и ее отложения на прилегающей к ним территории

В процессе дефляции под действием ветра от поверхности породного отвала отрываются частицы различного размера и переносятся в горизонтальном направлении. Под действием силы тяжести одновременно они двигаются и вниз. В итоге, перемещаясь по некоторой наклонной траектории, частицы породы падают на поверхность почвы, подкисляя ее и загрязняя тяжелыми металлами.

Поскольку расстояние, на котором отлагается каждая частица, является функцией многих переменных (скорости ветра, времени падения частицы, зависящего от ее диаметра и высоты начала падения), отложение частиц, характеризующихся значительной вариабельностью их размера, происходит по сложному закону распределения в широком спектре расстояний.

Дальность переноса частиц породы зависит от скорости их горизонтального перемещения v_z , равной скорости ветра, и продолжительности падения (t , с):

$$L = v_z \cdot t \quad (4.5)$$

Время падения частиц t зависит от скорости их падения $v_{\text{п}}$ и высоты H , с которой происходит их вынос. Известно, что падение тел происходит с переменной скоростью, нарастающей от нуля до некоторого значения, после чего движение становится равномерным, так как падающие тела подвержены действию двух сил – силы тяжести $F_m = mg$ и силы сопротивления воздуха F_c . Сила сопротивления не постоянна и, согласно формуле Ньютона, зависит от скорости падения, площади поперечного сечения тела, его формы [85]:

$$F_c = C * F * \rho_{\text{вх}} * \frac{v_{\pi}^2}{2}, \quad (4.6)$$

где C – коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы тела и для тел шарообразных принимаемый равным 0,5; v_{π} – скорость падения; $\rho_{\text{вх}}$ – объемная масса воздуха, равная 1,3 кг/м³; F – площадь поперечного сечения, равная $\pi d^2/4$; где d – диаметр тела, м. Таким образом,

$$F_c = \frac{C * \rho_{\text{вх}} * v_{\pi}^2 * \pi * d^2}{8} \quad (4.7)$$

Сила тяжести определяется по формуле: $F_T = m * g = \rho_{\text{ч}} * V * g$, где $\rho_{\text{ч}}$ – объемная масса твердой фазы породы (плотность ее частиц); V – объем частицы породы.

Приняв условно форму частицы шарообразной, определяем ее объем по формуле: $V = \pi d^3/6$. Тогда $F_T = m * g = \rho_{\text{ч}} * g * \pi d^3/6$.

В результате наших опытов с породой установлено, что $\rho_{\text{ч}} = 2000$ кг/м³.

Результирующая сила, действующая на частицу, равна векторной сумме силы тяжести и силы сопротивления. В то же время она равна ma , где m – масса, a – ускорение движения. Так как $m = \rho_{\text{ч}} \pi d^3/6$, можно записать:

$$a * \rho_{\text{ч}} * \pi * \frac{d^3}{6} = g * \rho_{\text{ч}} * \pi * \frac{d^3}{6} - C * \rho_{\text{вх}} * v_{\pi}^2 * \pi * \frac{d^2}{8}. \quad (4.8)$$

Деля обе части на $\rho_{\text{ч}} \pi d^3/6$, получаем:

$$a = g - \frac{3 * C * v_{\pi}^2 * \rho_{\text{вх}}}{4 * d * \rho_{\text{ч}}} \quad (4.9)$$

Как известно, при установившемся равномерном движении ускорение $a = 0$, поэтому можно записать следующее равенство:

$$g - \frac{3 * C * v_{\pi}^2 * \rho_{\text{вх}}}{4 * d * \rho_{\text{ч}}} = 0, \quad (4.10)$$

откуда можно получить формулу установившейся скорости при $C = 0,5$:

$$v_{\text{уст}} = \left(\frac{4 * g * d * \rho_{\text{ч}}}{3 * C * \rho_{\text{вх}}} \right)^{0,5} = \left(\frac{8 * g * d * \rho_{\text{ч}}}{3 * \rho_{\text{вх}}} \right)^{0,5} = 4,486 * (d * \rho_{\text{ч}})^{0,5}. \quad (4.11)$$

Первая часть уравнения без вывода приводится и в работе [85], согласно которой она справедлива для тел диаметром более 1 мм, для которых роль вязкого трения воздушной среды незначительна. Для тел диаметром менее 0,1 мм вязкость воздуха приобретает существенное значение, поэтому частицы диаметром 0,01 – 0,1 мм, например, капельки тумана, падают со скоростью, пропорциональной квадрату их диаметра. Это возможно только, если сила сопротивления описывается формулой Стокса, из которой автор работы [85] выводит выражение для скорости осаждения капель:

$$v_0^{(c)} = \frac{1}{18} D^2 \frac{\rho}{\eta} g, \quad (4.12)$$

где ρ – плотность капли; вязкость $\eta \approx 1,8 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с при $T = 300$ К.

Для капель диаметром $0,1 \text{ мм} \leq d \leq 1 \text{ мм}$, согласно [85], не работает ни

формула Стокса, ни формула Ньютона. Уравнение скорости падения частиц для этого интервала, выведенное Зубовым А.А. в [55] путем интерполяции между краевыми числами интервалов менее 0,1 мм и более 1 мм, имеет вид:

$$v_{уст} = -5,104d^2 + 9,9256d - 0,3315 \quad (4.13)$$

Поскольку ускорение движения тела является первой производной его скорости по времени, уравнение (4.9) можно представить так:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g - \frac{3 \cdot v_{\pi}^2 \cdot \rho_{ex}}{8 \cdot d \cdot \rho_{\eta}} = g - \frac{0,4875 \cdot v_{\pi}^2}{d \cdot \rho_{\eta}}; \quad (4.14)$$

или, при $\rho_{\eta} = 2000 \text{ кг/м}^3$ и измерении d в мм: $\frac{\partial v}{\partial t} = g - \frac{0,2438 \cdot v_{\pi}^2}{d}$.

Решая полученное дифференциальное уравнение табличным способом для частиц диаметром 1; 2; 3; 5; 7 и 10 мм, получаем уравнения и графики зависимости скорости и времени падения частиц разного диаметра от проходимого ими пути и зависимость времени падения от высоты, с которой оно начинается. Последняя зависимость имеет вид полиномиальных уравнений 3 и 4 степени, однако вместо них для простоты применения были использованы уравнения прямой линии, которые также характеризуются высоким коэффициентом корреляции (табл. 4.14).

Полученные зависимости связывают время, прошедшее от начала падения, скорость падения частиц размером ≥ 1 мм и пройденный ими путь. Значения этих показателей для частиц размером $\leq 0,1$ мм рассчитаны с использованием формулы 4.12. Для частиц промежуточного интервала (0,25 и 0,5 мм) показатели рассчитаны по уравнению (4.13).

Таблица 4.14

Зависимость установившейся скорости падения частиц и времени их падения от высоты падения и диаметра

Диаметр частицы D , мм	Скорость равномерного падения, м/с	Продолжительность ускоренного падения, с	Высота ускоренного падения, м	Уравнение времени падения	Коэфф. корреляции
10	20,1	3,3	44	$t = 0,0534H + 0,985$	0,982
7	16,8	4,6	60	$t = 0,0616H + 0,962$	0,990
5	14,2	4,0	44	$t = 0,0718H + 0,847$	0,996
3	11,0	3,0	25	$t = 0,0947H + 0,653$	0,999
2	8,97	2,8	20	$t = 0,115H + 0,543$	0,997
1	6,33	2,0	10	$t = 0,159H + 0,404$	1,0
0,5	3,36	1,33	2,3	$t = 0,43H$	1,0
0,25	1,83	0,7	0,6	$t = 0,90H$	1,0
0,1	0,61	0,5	0,2	$t = 1,64H$	1,0
0,05	0,152	0,0	0,0	$t = 6,58H$	1,0
0,01	0,006	0,0	0,0	$t = 165H$	1,0

Как видим в табл. 4.14, коэффициенты при H и свободные члены уравнений изменяются в зависимости от диаметра частиц. Были получены уравнения этих зависимостей, что позволило вывести систему двухфакторных уравнений зависимости времени падения частиц от высоты падения H и их диаметра D :

$$\text{при } D \geq 1 \text{ мм) } t = 0,16D^{-0,48}H + 0,412D^{0,41}, \quad (4.15)$$

$$\text{при } D \leq 0,1 \text{ мм } t = 0,0163D^{-2}H, \quad (4.16)$$

$$\text{при } 0,1 \text{ мм} < D < 1 \text{ мм } t = 0,235D^{-0,875}H. \quad (4.17)$$

После подстановки уравнений (4.15 - 4.17) в уравнение (4.5) удалось получить трехфакторные уравнения расстояний, на котором отложится частица определенного диаметра D , вынесенная ветром определенной скорости v_2 с определенной высоты H :

$$\text{при } D \geq 1 \text{ мм} \quad L = v_2 * (0,16D^{-0,48}H + 0,412D^{0,41}), \quad (4.18)$$

$$\text{при } D \leq 0,1 \text{ мм} \quad L = v_2 * (0,0163D^{-2}H), \quad (4.19)$$

$$\text{при } 0,1 \text{ мм} < D < 1 \text{ мм} \quad L = v_2 * (0,236D^{-0,875}H). \quad (4.20)$$

Эти уравнения были использованы для определения зависимости плотности загрязнения продуктами дефляции территории, прилегающей к отвалам, от удаленности от их подножия.

Расчет универсальной функции плотности отложения породы требует составления системы дифференциальных уравнений и их совместного решения, что является весьма сложной задачей, поэтому был разработан алгоритм расчета зависимости плотности отложения частиц от расстояния для конкретных случаев (рис. 4.13), реализованный с помощью программного аппарата программы Excel и позволяющий получать искомую функцию суммарной плотности отложения для различных исходных данных.



Рис. 4.13. Структурная схема модели загрязнения территории продуктами дефляции поверхности терриконов

При разработке алгоритма были сделаны следующие упрощения:

1. Боковая поверхность отвала разбивается на n ярусов высотой ΔZ , а вынос частиц породы рассчитывается дискретно - для каждого из них.
2. Вместо множества всех значений скорости ветра v использовались дискретные значения v_j , равные срединам стандартных интервалов скорости.
3. Вынос частиц рассматривался не для каждого возможного их размера D (диаметра), а для стандартных интервалов (фракций), характеризующихся

определенной их массовой долей ΔD_k от общей массы породы в процентах.

Согласно алгоритму последовательно рассчитываются такие показатели: высота ярусов: $\Delta Z = H/n$, м; высота середины каждого (i -го) яруса Z_i , м; площадь поверхности каждого (i -го) яруса ΔF_i , м²; годовой вынос породы M_j с единицы площади ветром каждой (j -й) скорости v_j ; годовой вынос породы $M_{j\Delta Fi}$ с боковой поверхности каждого яруса при каждой скорости ветра: $M_{j\Delta Fi} = M_j \Delta F_i$; масса $\Delta m_{i,j,k}$ каждой (k -й) фракции породы, выносимой с i -го яруса при j -й скорости ветра: $\Delta m_{i,j,k} = M_{j\Delta Fi} \Delta D_k / 100$; время падения t_{ik} частиц каждой фракции с высоты каждого яруса; средняя дальность отложения частиц k -й фракции, выносимых с i -го яруса ветром j -й скорости: $L_{i,j,k} = v_j * t_{i,k}$; плотность отложения частиц M'_L в т/га площади прилегающей территории как функция расстояния от центра отвала.

Зависимость удельной интенсивности выноса частиц породы от скорости ветра была определена в разделе 4.5. Методика перехода от лабораторных результатов к реальным представлена в разделе 4.6.1. Полученная зависимость интенсивности выноса породы M_v , т/(га·ч), от скорости ветра v , м/с, на высоте 10 м имеет вид: $M_v = 0,0232v^4 + 1,15v^3 + 36,42v^2 - 380,4v + 1448,5$. Разработаны формулы расчета площади поверхности ярусов отвалов и их самих в целом от высоты, формы, крутизны склона и наклона хвостовой части террикона [55].

Процесс загрязнения территории породой, выносимой ветром с поверхности отвалов, рассматривался нами как имеющий три составляющие:

- 1) многолетнее отнесение ветром частиц породы, падающей при отсыпке отвала на его верхушку, на разные расстояния в сторону от вертикали;
- 2) многолетняя дефляция поверхности отвала в период отсыпки;
- 3) ежегодная дефляция, происходящая после окончания отсыпки.

Представленная выше математическая модель описывает третью составляющую процесса загрязнения территории. Для первой и второй составляющих также разработаны компьютерные реализации модели.

В результате испытания модели на примере типичного конического отвала высотой 50 м установлено, что дефляционный вынос частиц с поверхности породы начинается при скорости ветра 8,5 м/с на высоте флюгера (10 м); предельная дальность отложения частиц размером крупнее 0,01 мм, выносимых с поверхности отвала при скорости ветра 18–20 м/с, достигает 14,7 км; частицы крупнее 5 мм практически ветром не выносятся за пределы периметра основания отвала любой высоты. В этих же пределах откладываются свыше 80 % частиц размером более 0,5 мм. Следовательно, изменяя фракционный состав породы, например, путем внесения структурообразователей, можно уменьшить массу породы, выносимой при отсыпке за пределы основания отвала, которая может достигать 11,7 % массы всей отсыпаемой породы.

За пределы расстояния, кратного $10H$ (H – высота отвала) практически не распространяются частицы крупнее 0,1 мм. Частицы размером 0,01–0,1 мм оседают в этой зоне только на 30,7 %. За ее пределами максимум плотности их отложения наблюдается на расстоянии, кратном $36H$ (1,8 км).

Отложение частиц характеризуется плотностью, которая с увеличением расстояния уменьшается по степенному закону. Как видно на рис. 4.14,

многолетнее загрязнение территории, происходящее за время отсыпки среднего террикона высотой 50 м в результате бокового отнесения ветром частиц породы, на порядок выше дефляционного загрязнения за тот же период, которое в 15–20 раз больше, чем последующее ежегодное дефляционное загрязнение. Это не означает безопасности последнего процесса, поскольку его последствия постепенно накапливаются в течение многих лет, и даже за один год в интервале от 0 до 220 м от подножия отвала на 1 га откладывается от 60 до 1 т.

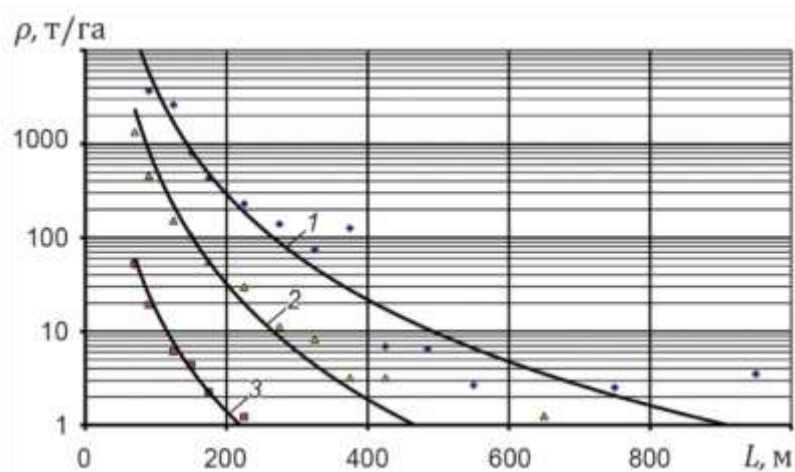


Рис. 4.14. Изменение плотности многолетнего и годового загрязнения территории по расстоянию от центра отвала в результате:

- 1 – отнесения частиц породы ветром при отсыпке отвала;
- 2 – дефляции за период отсыпки;
- 3 – годовой дефляции после окончания отсыпки

За период отсыпки отвала на расстоянии до 950 м формируется зона с плотностью загрязнения на 1 га свыше 1 т, а на расстоянии до 500 м она превышает 10 т. В зоне до 150 м плотность загрязнения превышает 1000 т, а в непосредственной близости к отвалам – 10 000 т. И это без учета отложения породы, выносимой водными потоками, также очень высокого [76]. Учитывая, что доля отвалов, к которым близко расположены домостроения, приусадебные участки, пашня, кормовые угодья, реки и водоемы, составляет соответственно 28, 38, 18, 16, 23 % [76], можно оценить экологическую ситуацию на территории, окружающей породные отвалы в Донбассе, как катастрофическую.

Разработанная модель может служить инструментом регулирования интенсивности загрязнения различных зон прилегающей территории путем увеличения лесистости на соответствующих высотных ярусах террикона.

4.7.4 Новый метод оценки степени загрязненности почвенного покрова прилегающей к отвалам территории продуктами ветровой и водной эрозии их поверхности

Верификация (проверка) разработанной модели процесса загрязнения прилегающей к отвалам территории продуктами ветровой и водной эрозии может осуществляться различными методами, наиболее достоверным из которых, несомненно, является обследование территории наземными способами.

Известные способы анализа воздействия вредоносных объектов на почвенный покров прилегающей территории включают отбор проб почвы на различных расстояниях от него, лабораторное определение содержания сульфат-ионов и тяжелых металлов (ТМ) в пробах с помощью химического и спектрального анализа, последующее сравнение фактических концентраций

загрязняющих веществ с предельно допустимыми. Недостатком этой методики, препятствующим ее массовому применению для анализа вредоносного воздействия имеющихся породных отвалов на окружающую среду, является дороговизна, обусловленная высокой стоимостью анализов, не позволяющая массово и детально изучать изменения в почвенном покрове, происходящие под влиянием переноса частиц отвальной породы при ветровой и водной эрозии.

Для изучения экологических последствий дефляции и эрозии на отвалах угольных шахт нами был разработан способ косвенной диагностики загрязнения прилегающей к ним территории продуктами эрозии (патент № 52356 Украины на полезную модель) [148]. Как и базовый способ, он включает массовый отбор проб породы на отвале и почвы на различных расстояниях от него, но их химический анализ для оценки экологической ситуации выполняется только в отдельных – ключевых точках из числа необходимых. В этих же и остальных пробах выполняется визуальное определение содержания характерных частиц, названных нами «маркерными», причем содержание химических загрязнителей в пробах определяют на основании соотношения содержания «маркерных» частиц в этих и ключевых точках. В качестве маркерных частиц могут быть использованы красноватые частицы перегоревшей породы, а для неперегоревшей породы – крупинки угля. В результате этого появляется возможность массового отбора проб и анализа их загрязненности путем намного менее трудоемкого и дорогостоящего визуального определения.

При реализации способа в ключевых точках: на самом отвале, у его подножия и на расстоянии 50, 100, 200 и 500 метров в слое 0-10 см отбираются пробы породы и почвы, в которых путем химического и спектрального анализа выполняется определение содержания сульфатов и тяжелых металлов. Пробы высушиваются и просеиваются через почвенные сита с размером ячейки 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0,5, 0,25 мм. Отобранные из проб навески массой 1 г наносятся максимально тонким слоем на миллиметровую бумагу и фотографируются с расстояния 20 мм. Далее снимки воспроизводятся на мониторе компьютера, и с помощью разработанного способа распознавания цифровых фотоснимков (подраздел 6.2) осуществляется подсчет доля частиц угля на единице площади в каждой из фракций (рис. 4.15).

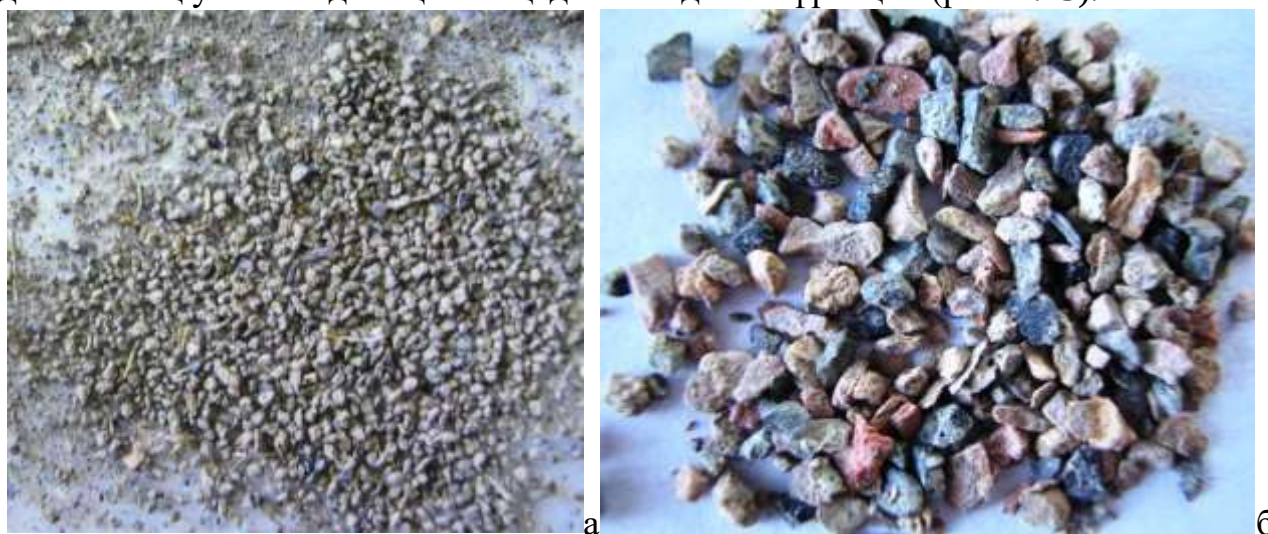


Рис. 4.15. Фотоснимки образцов почвы с углистыми включениями (а) и отвальной породы (б) при различном увеличении

Сравнение содержания частиц позволяет определять степень проникновения частиц породы вглубь почвенного профиля и переноса их по ширине при обработке поля. По данным химического состава почвы и содержания маркерных частиц в ключевых точках составляется график зависимости содержания сульфатов и тяжелых металлов от содержания маркерных частиц, который позволяет косвенным путем оценивать степень химического загрязнения почвы и в других точках зоны загрязнения.

Выводы по подразделу:

1. Расчеты, выполненные по разработанной математической модели процесса загрязнения прилегающей к отвалам территории продуктами дефляции и ветрового отбоя породы, свидетельствуют, что предельная дальность отложения частиц крупнее 0,01 мм, выносимых с типичного отвала высотой 50 м достигает 14,7 км. Отложение характеризуется функцией плотности, имеющей степенной вид.

2. Плотность годового отложения породы, выносимой со сформированных отвалов, с изменением расстояния от подножия отвала до границы санитарно-защитной зоны (500 м) снижается с 60 т до 35 кг на каждый гектар поверхности; от ее границы до 1000 м она уменьшается до 2,5 кг/га.

3. Наибольшее загрязнение территории происходит за период отсыпки отвала: в пределах от подножия отвала до границы СЗЗ плотность загрязнения снижается от 10000 до 10 т/га, а на расстоянии 1000 м она равна 800 кг/га, что в 320 раз больше чем при дефляционном загрязнении.

4. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать вид функции плотности отложения частиц в зависимости от доли лесных насаждений на каждом высотном ярусе террикона, то есть дает инструмент управления интенсивностью загрязнения различных зон прилегающей территории путем увеличения лесистости на соответствующих высотных ярусах террикона.

РАЗДЕЛ 5

СОПУТСТВУЮЩИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И ПОЧВЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Для предельно полной оценки результатов эрозионных исследований, для проверки известных и построения новых моделей эрозии необходимо проводить разнообразные сопутствующие полевые и лабораторные наблюдения – метеорологические, почвенные, геоморфологические и др.

Известно, что важнейшими факторами, влияющими на формирование поверхностного стока талых вод, являются: влагозапасы снега, глубина промерзания и влажность почвы. Наиболее мощное воздействие на сток оказывает глубина промерзания. По исследованиям А.Т. Барабанова и А.В. Кулик [17]) - согласно закону лимитирующих факторов стока [15], если почва талая или промерзла на глубину меньше 50 см, сток не формируется.

Уменьшение глубины промерзания почв обеспечивается путем регулирования снегоотложения на водосборах. С одной стороны, своими запасами воды снег определяет величину потенциального стока, с другой, обладая хорошими теплоизоляционными свойствами, предохраняет почву от промерзания и повышает ее водопроницаемость, тем самым снижая вероятность появления стока и его возможную величину. Регулируя снегоотложение с помощью стокорегулирующих лесополос, можно управлять этим процессом. Являясь мощным фактором сохранности и перераспределения снежного покрова на склонах, лесные полосы существенно воздействуют на характер промерзания почвы. В лесополосах и под снежными шлейфами глубина промерзания почвы бывает небольшой, вплоть до его отсутствия. В межшлейфовых частях межполосного пространства и в открытом поле она промерзает значительно глубже. Зная роль природных факторов в формировании стока и влияние на них лесных полос, можно управлять стоком, а значит и смывом почвы.

Из сказанного выше понятно, что важно не просто вести мониторинг таких факторов стока, как снег, промерзание, влажность почвы, а знать их пространственное варьирование, особенно в лесоаграрных ландшафтах.

Перед снеготаянием и во время него проводится снегомерная съемка с целью определения неравномерности распределения снежного покрова и запасов воды в нем по территории. Во время снеготаяния фиксируется также его тип [24] – солярный, если снеготаяние происходит преимущественно от воздействия солнечной радиации, адвективный (вторжение теплых воздушных масс) или смешанный - солярно-адвективный.

5.1 Общие методы исследований

Для характеристики почвенного покрова используют почвенные разрезы глубиной до 2 м. В них отбирают почвенные образцы из всех генетических горизонтов, по слоям 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 см для определения содержания гумуса, рН, емкости поглощения, валовых запасов азота, фосфора, гидролизующего азота, подвижного фосфора, обменного калия, CO_2 карбонатов,

гранулометрического и микроагрегатного составов, объемной массы по общепринятым методикам [30, 32, 50, 157].

Изучение водно-физических свойств выполняют по следующим методикам [157]: наименьшая влагоемкость – методом заливки площадок размером 1 x 1 м до полного насыщения с последующей гидроизоляцией поверхности почвы пленкой и определением влажности почвы в трехкратной повторности через каждые 10 см на третий день; влажность завядания – методом проростков по С. И. Долгову; структурно-агрегатный состав методом сухого и мокрого просеивания по Н. И. Савинову. Микроагрегатный анализ – с помощью пипетки Качинского [32, 157].

Учет урожая в опытах выполняют путем полного выкашивания комбайном учетных делянок и на метровых площадках. Приведение результатов учета урожайности к урожайности на почвах одной степени смытости выполняют по методике ВНИИЗиЗПЭ [200]. Определение математически доказанной зоны влияния лесных полос и средних прибавок урожая в ней проводят по методике ВНИАЛМИ [114].

5.2 Водопроницаемость почвы и методы ее изучения

Определяется методом заливки рам размером 1 x 1 м с поддержанием уровня воды 5 см на протяжении 4 ч; методом заливаемых площадей, основанным на применении прибора ПВН-00, методом трубок [30], а также путем наблюдения за снижением уровня в различных понижениях и прудках гидросооружений. Для примера в табл. 5.1 приведены данные, полученные для различных их видов.

Таблица 5.1.

Водопроницаемость почвы в прудках противозерозионных гидросооружений в периоды талого стока

Место наблюдений	Варьирование водопроницаемости по годам, мм/мин			Среднее
	1988	1989	1990	
Поле	0,012	0,030	0,015	0,019
Вал-терраса	0,025	0,049	0,020	0,025
Вал-канава	0,050	0,115	0,050	0,086

Простейшим способом изучения водопроницаемости является метод трубок, описанный в учебнике [203], практикумах [30, 32, 157]. Метод основан на использовании стальных цилиндров высотой 10-13 см, площадью сечения S обычно 50 см^2 , имеющих заточенную нижнюю (режущую) кромку (рис. 5.1).

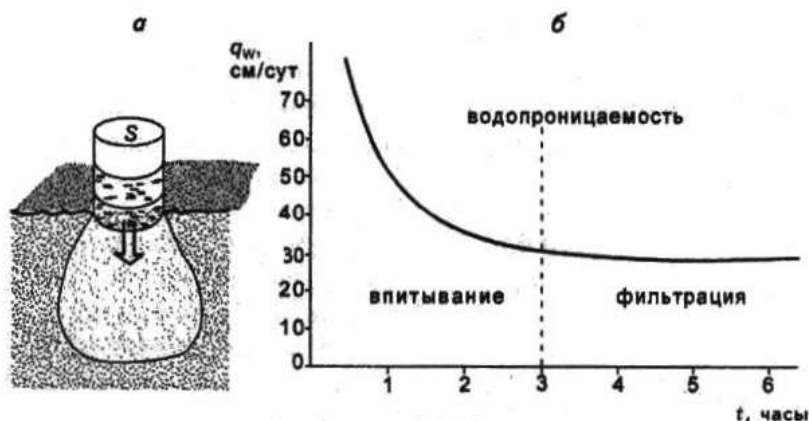


Рис. 5.1. [203] Трубка и контур промачивания (а); динамика скорости водопроницаемости, отражающая две ее стадии – впитывание и фильтрацию (б)

Цилиндр (трубку) вдавливают в почву на 5 см, а сверху создают слой воды высотой 5 см. Высоту слоя поддерживают постоянной, подливая воду из мензурки, отмечают время, прошедшее после каждой предыдущей заливки и объем добавленной воды (Q , см³). Скорость инфильтрации (q , мм/мин) на момент времени t_i определяют по формуле: $q = Q/(S \cdot \Delta t)$, где S (см²) – площадь сечения трубки; Δt (мин) – интервал времени между двумя заливками; t_i определяется как середина этого интервала. По этим данным строится график изменения скорости впитывания во времени $q = f(t)$.

Вначале градиент напора намного больше 1, при промачивании почвы на 5 см он становится равным 2, а при дальнейшем просачивании воды снижается. Отчасти поэтому, отчасти вследствие заполнения водой всех почвенных пор снижается и скорость инфильтрации, называемая *коэффициентом инфильтрации* (на наш взгляд - неудачно, поскольку градиент напора всегда > 1). Продолжая снижаться, скорость инфильтрации постепенно стабилизируется и становится условно равной коэффициенту фильтрации (см. рис. 5.1).

Важным условием эксперимента является достаточная повторность. Трубки устанавливают на расстоянии 13—15 см одна от другой, в два ряда в шахматном порядке, как показано на рис. 5.2. Погружают их в почву, надавливая рукой или забивая деревянным молотком. С внешней стороны почву вокруг трубки уплотняют. Так как водопроницаемость в сильной степени зависит от влажности, одновременно необходимо определить ее. Воду в трубки наливают осторожно, не размывая поверхность почвы, применяя специальные приспособления.

Более точно коэффициент фильтрации определяют прибором ПВН-00 (рис. 5.5), используя метод заливаемых площадей (метод Нестерова), когда на поверхности почвы одна внутри другой устанавливают круглые (рис. 5.3) или квадратные (рис. 5.4) рамы площадью 625 и 2500 см² (25 x 25 и 50 x 50 см).

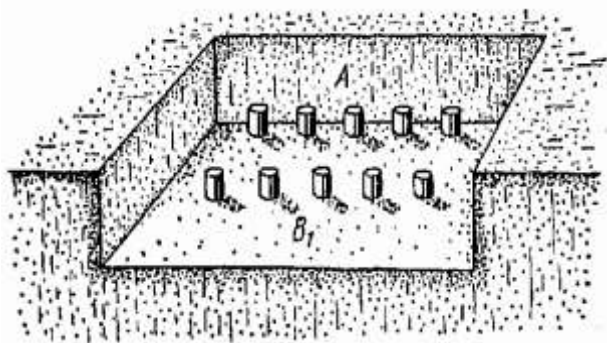


Рис. 5.2. Послойное изучение водопроницаемости почвы [203]

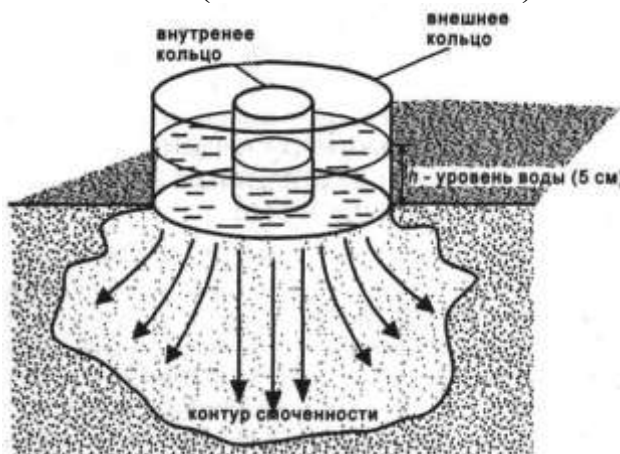


Рис. 5.3. Определение коэффициента фильтрации методом рам [203]



Рис. 5.4. Квадратные рамы для измерения водопроницаемости почвы [32]

Внутреннюю раму называют *измерительной* или *учетной*, а внешнюю - *защитной* (защищает вертикальный фильтрационный поток из первой рамы от растекания в стороны). Поддерживая постоянный напор внутри обеих рам (5 см) и измеряя скорость инфильтрации в учетной после ее стабилизации определяют по ней коэффициент фильтрации. В приборе ПВН-00, согласно метода Нестерова поддержание уровня происходит автоматически.

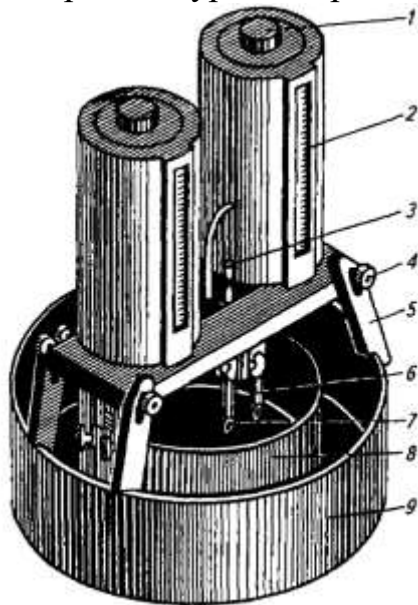


Рис. 5.5. Прибор ПВН – 00 [32]

5.3 Определение влажности почвы

Влажность почвы определяют термостатно-весовым методом до глубины 1-1,5 м по слоям 0-10, 10-20, ..., 90-100, 100-115, 115-130, 130-150 см в трехкратной повторности.

Пробы почвы на влажность отбирают почвенным буром в такие сроки: перед уходом в зиму (в конце ноября); перед началом таяния, поскольку в течение зимы запасы влаги изменяются - как в результате оттепелей, так и вследствие переноса влаги к фронту промерзания. Это важно и для оценки промерзания и льдистости с целью прогнозирования склонового и речного стока.

Определение влажности почвы после схода снега и ее сравнение с влажностью до начала снеготаяния является приемом косвенного определения поверхностного стока (определяют фактическое приращение запасов влаги в почве и сравнивают с теоретическим, равным влагозапасам снега). Следующий срок, важный для агрономического прогноза - перед севом или началом вегетации озимой пшеницы или многолетних трав. Определяют влажность ежемесячно в ходе вегетации, перед уборкой зерновых или перед укосом трав, после ливней. Для изучения гидромелиоративной роли линейных рубежей точки отбора почвы на влажность выбирают на створах, пересекающих ПЭГТС, на расстоянии 1, 2, 3, 5, 10 м и дальше через каждые 10 м от их оси; по створам поперек стокорегулирующих лесных полос на расстоянии 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25 высот лесной полосы вверх и вниз по склону. На стоковых площадках пробы отбирают в трехкратной повторности в верхней, средней и нижней их частях.

Существуют и другие методы определения влажности, описанные в практикуме [32], удобные отсутствием необходимости сушки почвы и поэтому применимые в полевых условиях: карбидный, спиртовой, химический и др.

Наиболее прост **пикнометрический** метод. Согласно этому методу навеску влажной почвы $p_в$ погружают в пикнометр, заливают до метки водой, после чего определяют ее массу в воде p_1 . Массу абсолютно сухой почвы $p_с$ вычисляют по формуле: $p_с = p_1 d_1 / (d_1 - 1)$, где d_1 — плотность твердой фазы почвы, заранее установленная для данной почвы, г/см³.

Затем вычисляют влажность почвы: $W, \% = 100(p_в - p_с) / p_с$.

5.4 Мониторинг выпадения атмосферных осадков

Проще всего вести мониторинг осадков по формам ТСХ-8, выпускаемым областными центрами гидрометеорологии. Подробную информацию размещают и в интернете. Но бывает важно иметь и собственные данные – более достоверные для условий опыта, получаемые с помощью заводских и самодельных осадкомеров. К первым относятся осадкомер Третьякова (рис. 5.6), используемый на метеоплощадках, и стеклянный осадкомер Давитая, имеющий приемную часть площадью 50 см² и более узкую накапливающую часть с делениями. Недостатком первых является дороговизна для массового использования (3 тыс. рублей) и риск хищения. Вторые легко бьются. Поэтому лучше всего применять современные пластиковые (рис. 5.6) или самодельные - из пластиковых бутылок с отрезанной верхней частью, вставленной в нижнюю наподобие воронки, снижающей потери на испарение. Желательно утяжелить дно осадкомера или подвязывать его к колышку. Собранные осадки сливают в мензурку с ценой деления 1-2 мл, слой осадков (мм) определяют по формуле: $h = 10V/F$; где V – объем осадков, мл; $F = \pi d^2/4$ – площадь сечения бутылки, см², где d – диаметр ее водоприемной части, см.



Рис. 5.6. Осадкомеры: Третьякова, TFA, Tumb-1398072998, пластиковый аналог осадкомера Давитая

Для контроля интенсивности осадков на метеостанциях используют плювиографы. Но для полевых исследований они громоздки и дороги. Лучше использовать современные портативные метеостанции. Продаются осадкомеры, снабженные беспроводной передачей данных, и отдельно. Проведенное нами испытание осадкомера метеостанции WS-1090 (рис. 5.7) показало, что он занижает показания вследствие частичного разбрызгивания капель. Поэтому его бортики необходимо наращивать. Метеостанция S 84060 позволяет определять скорость и направление ветра, температуру и влажность воздуха, интенсивность осадков, а WS-1090 еще и атмосферное давление. Данные передаются на пульт и ноутбук по беспроводной связи Wi-Fi с записью в их память, построением и печатью плювиограмм.



Рис. 5.7. Современные метеостанции: WHEATHERWISE WS-1090 (фото Зубова А.Р., слева); La Crosse S 84060 (справа).

Для более глубоких эрозионных исследований кроме плювиограммы осадков важно иметь данные о структуре дождя – распределении капель по диаметру, о их скорости и энергии. Для этой цели в большинстве стран используются оптические осадкомеры (рис. 5.8). В России их аналогом является осадкомер ОПТИОС (оптический измеритель осадков, рис. 5.9), разработанный в ООО Сибаналитприбор [230].



Рис. 5.8. Варианты конструкции оптических осадкомеров [230]

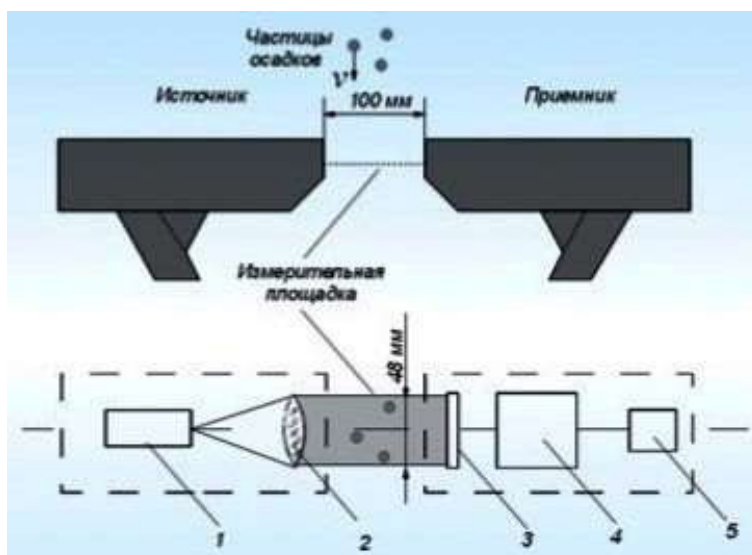


Рис. 5.9. Формирование измерительной площадки прибора ОПТИОС [230]: 1 – источник света; линза; линейный сенсор; блок формирования измерительной информации; 5 – интерфейсный модуль

Основой измерений является непрерывный анализ теневых изображений капель на оптическом приемнике при прохождении капелек дождя через измерительную площадку (рис. 5.10). Это позволяет определить не только общее количество осадков, но и их тип (дождь, снег, град), скорость падения капель, их распределение по размеру. Согласно [230], скорость капель также можно оценить по формуле: $v_k = 9,4[1 - \exp(-0,556d^{1,13})]$, где d – их диаметр, мм.

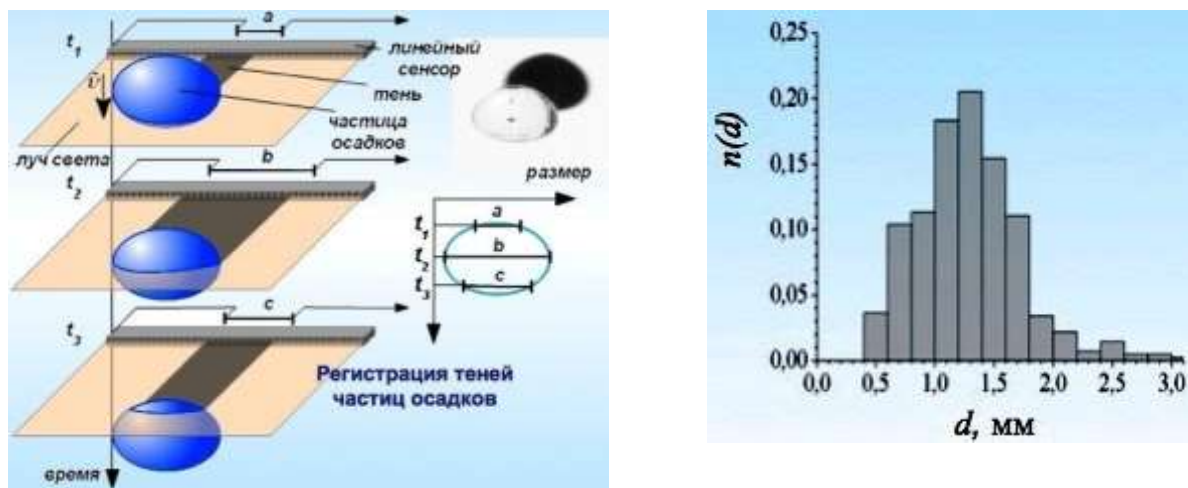


Рис. 5.10. Измерение размеров капель и получаемая гистограмма их распределения [230]

5.5 Наблюдения за снежным покровом

Высота снега определяется с помощью переносной снегомерной рейки. Плотность определяется весовым снегомером ВС-43 (рис. 5.11). Методика измерений изложена в методических рекомендациях [116, 167]. Согласно Е.А. Гаршинеvu [39] на стоковых площадках длиной 100-200 м рекомендуется определять высоту снега через 1-2 м. На полях с системами лесных полос снег измеряется по заранее выбранным створам, пересекающим лесополосы. Замеры в наших исследованиях выполнялись через равное количество шагов, соответствующее 10 или 20 м вне шлейфовой зоны лесных полос, в шлейфах – через 5 м, в лесных полосах через 1 м. Плотность снега определяли через 40 м в трехкратной повторности, в шлейфовой зоне лесных полос через 10 м.

5.6 Учет промерзания почвы

Глубину промерзания почвы обычно определяют с помощью мерзлотомера Данилина (АМ-21), по кристалликам льда в пробах почвы, отобранных с помощью ручного бура. Уже при бурении почвы - по изменению трудоемкости процесса в большую или меньшую сторону легко определяется как верхняя, так и нижняя границы мерзлого слоя. Проще оттаивание почвы определяется с помощью щупа с делениями, который легко входит в оттаявший слой почвы, а при достижении мерзлоты останавливается.

Мерзлотомер Данилина (АМ-21-1, АМ-21-2) представляет собой резиновую или поливинилхлоридную трубку с нанесенными на нее делениями через 1 см и

находящейся внутри нее капроновой нитью с узлами, заполненную дистиллированной водой и закрытую с обоих концов. Трубку опускают в пластиковую или металлическую защитную трубку большего диаметра с заглушкой на нижнем конце, установленную в почве путем бурения в ней ручным буром вертикальной скважины и заполнения почвой или песком зазоров между ее стенками и защитной трубкой (рис. 5.12).



а)



б)



в)

Рис. 5.11. Весовой снегомер и работа с ним: а) полевые измерения; б) комплект снегомера; в) студенты-гидрологи на практическом занятии

Глубина промерзания (точнее, глубина проникновения отрицательных температур, поскольку почвенный раствор замерзает при температуре несколько ниже 0°C) определяется путем прощупывания трубки по длине столбика льда.

Мерзлотомеры выпускаются в двух модификациях: - АМ-21-I; - АМ-21- II.

В наших исследованиях использовались самодельные мерзлотомеры. На резиновую медицинскую трубочку с внутренним диаметром 5 мм наносили деления, заполняли ее водой, придав U – образную форму. Затем в нижний конец вкручивали болт в качестве заглушки и груза, а в верхний вставляли стержень с загибом, к которому подвязывали шнур, обернутый байковой тканью для теплоизоляции и прикрепленный сверху к крышке прибора.

В качестве защитной трубки можно использовать любую подходящую пластиковую или гофрированную трубку для электропроводки (рис. 5.12).

Однако, как отмечалось в подразделе 1.2, знание глубины промерзания почвы не достаточно, важно знать распределение отрицательных температур по

глубине мерзлого слоя, определяющее, в совокупности с почвенной влагой и высотой мерзлого слоя, «запас холода» в почве.

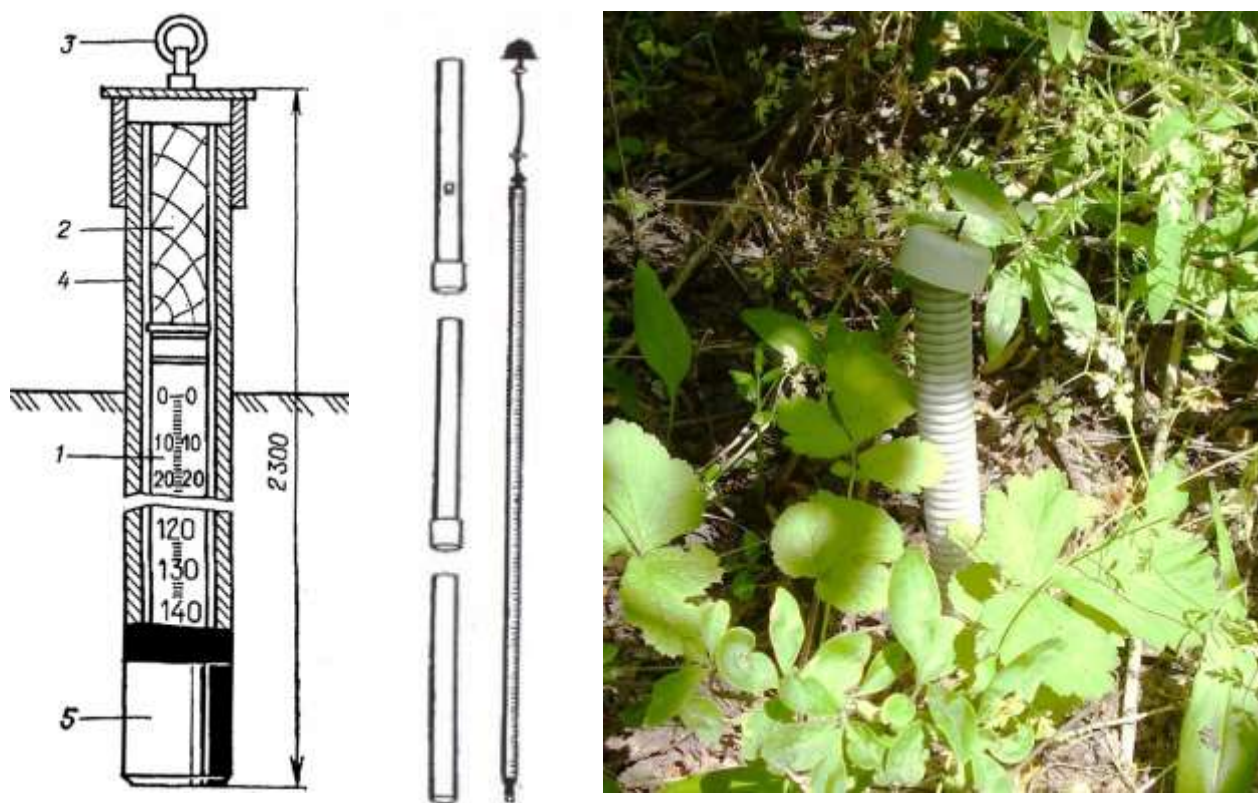


Рис. 5.12. Схема мерзлотомера Данилина [31], АМ-21-1 и самодельный в лесной полосе (фото Зубова А.Р.)

Для определения температуры почвы на глубине на 5, 10, 15, 20 см в теплое время года используют коленчатые термометры Савинова. Но этой глубины недостаточно, а в мерзлую почву их установить невозможно. На метеостанциях имеются и стационарные глубинные термометры, но в поле они неприменимы. Поэтому был разработан и испытан иной метод изучения распределения температуры по глубине почвенного профиля.

5.6.1 Усовершенствование методики изучения температурного режима почвы и результаты ее применения

Суть предложения заключалась в измерении температуры почвы с помощью электронного термометра (мультиметра DT383 с термопарой), опуская его датчик на нужную глубину в пластиковую трубку диаметром 10 мм и длиной 100 см, заблаговременно установленную в толщу почвы (рис. 5.13).

Для проверки правомерности использования такого подхода термопара была оттарирована с помощью ртутного термометра в диапазоне температур от +23 до -11°C. Для этого было использовано приспособление в виде диска из гипса со сквозным отверстием, в которое с одной стороны вводили резервуар термометра, а с другой – термопару (рис. 5.13).

Диск помещали в морозильную камеру, после чего - в процессе его постепенного самоотогревания, снимали показания по обоим приборам.



Рис. 5.13. Измерение температуры почвы на разных глубинах с помощью мультиметра DT838 с термпарой (слева) и тарировка мультиметра (фото Зубова А.Р.)

Полученный тарировочный график (рис. 5.14) свидетельствует о линейном характере связи показаний мультиметра с показаниями контрольного прибора, но со смещением. Уравнение связи показаний электронного и ртутного термометров (коэффициент корреляции $R = 0,999$) имеет вид:

$$t_{pm} = 1,103t_{эл} - 3,65, \quad (5.1)$$

где $t_{эл}$ – отсчет по мультиметру, $t_{ф}$ – показания ртутного термометра, принимаемые за истинные значения температуры.

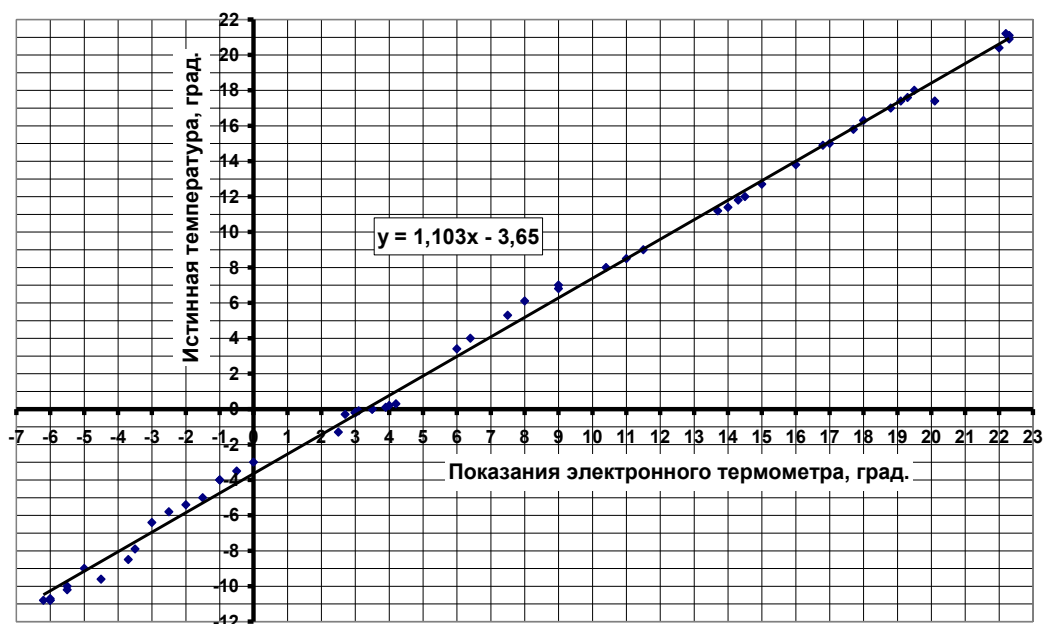


Рис. 5.14. График для корректировки показаний электронного термометра

Сопоставление измеренных значений температуры и расчетных по уравнению показало, что среднеквадратическое отклонение последних $\sigma = 0,46^{\circ}\text{C}$. Теорией ошибок измерений доказано, что в интервал от 0 до $\pm 2\sigma$ попадает 95,4% ошибок, т.е., из 100 ошибок измерений лишь пять могут оказаться больше

или равны 2σ . На основании этого в качестве предельной ошибки можно принять $\Delta_{\text{пред}}$, равную 0,92 см. Так как данная точность для почвенных исследований является приемлемой, можно считать использование термопары оправданным.

Результаты откорректированных измерений, выполнявшихся в зимний период 2015-2016 гг., в сокращенном виде представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Динамика температуры почвы на разных глубинах

Дата	Сумма отрицательных среднесуточных температур $\Sigma(-T)$, °C	Температура почвы (°C) на глубинах					
		5 см	10 см	20 см	30 см	40 см	50 см
24.12.15	0	3	3	3	4	4	5,5
29.12.15	9	-0,2	-0,2	0,8	2	2	3
04.01.16	85	-6,7	-8,2	-8,2	0,8	2	3
11.01.16	107	-1,4	-1,4	-0,2	-0,2	0,8	2
26.01.16	157	-6,7	-5,4	-4,2	-3,5	-1,4	-0,2

На основании табличных данных построен график изменения температуры почвы на глубинах 5, 10, 20, 30, 40 и 50 см (рис. 5.15).

График показывает, что зависимость температуры почвы от нарастающей суммы отрицательных температур для различных слоев неоднозначна. Для слоев глубиной менее 30 см характерно более быстрое охлаждение, однако для них характерны значительные колебания на фоне общего падения, связанные вероятно с воздействием солнечной радиации. Устойчивое снижение температуры имеет место лишь начиная с глубины 30 см.

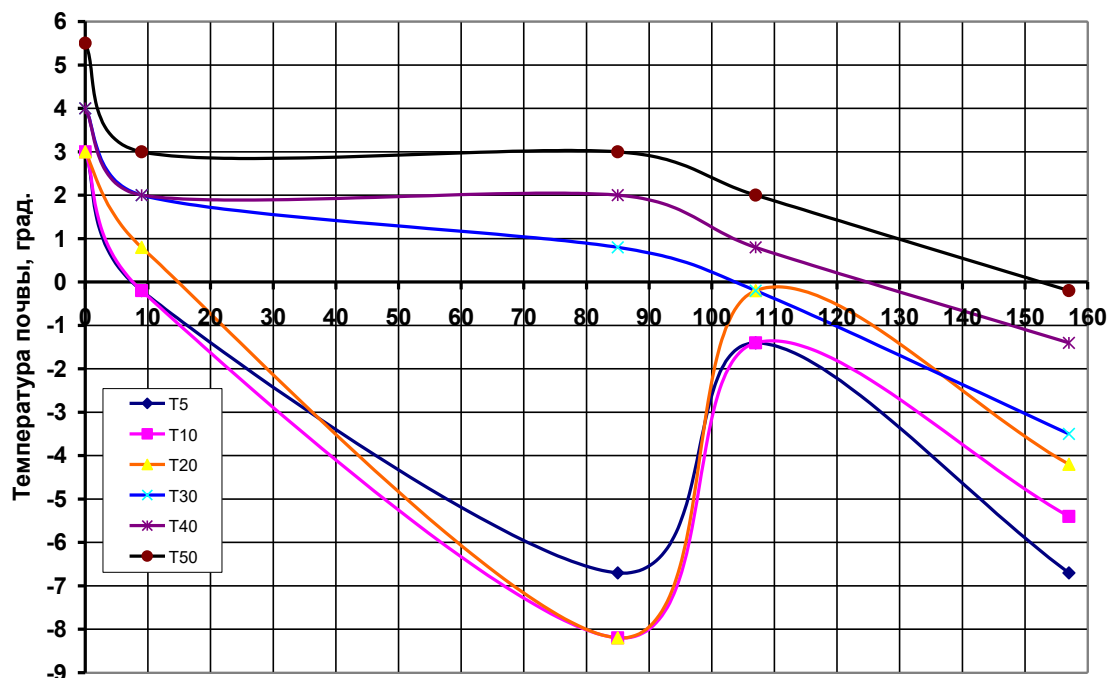


Рис. 5.15. Ход температуры почвы при нарастании суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха

В табл. 5.3 представлены уравнения зависимости и коэффициент

корреляции зимнего хода температур в линейном виде в различных слоях почвы.

Таблица 5.3

Зависимость послойной температуры почвы от суммы отрицательных температур воздуха

Глубина, см	Уравнение зависимости	Коэффициент корреляции R
5	$y = 1,3 - 0,0514x$	R=0,80
10	$y = 0,9 - 0,0463x$	R=0,70
20	$y = 1,2 - 0,0417x$	R=0,62
30	$y = 3,5 - 0,0398x$	R=0,95
40	$y = 3,4 - 0,0268x$	R=0,90
50	$y = 4,6 - 0,0274x$	R=0,88

5.6.2 Измерение температуры воздуха, почвы и снега

В ходе любых полевых исследований возникает необходимость измерения температуры воздуха, почвы или снега. Как отмечалось выше, знание суточного хода температуры воздуха помогает восстановить недостающие данные по стоку. Показатели температуры воздуха на разных высотах нужны для прогнозирования водоотдачи из снега и т.д. Ртутный термометр для этих измерений не всегда пригоден. Он хрупок, с него трудно снимать отсчеты и, как показали наши опыты [70], он инерционен - для измерений с точностью до десятых °C требуется до 3-4 минут.

Гораздо удобнее инфракрасный термометр, показанный на рис. 5.16. Диапазон измерений – от -50 до +300°C. Для измерения температуры воздуха достаточно навести его на листок бумаги, удерживаемый рукой на нужной высоте ребром по направлению к солнцу, чтобы солнечные лучи не нагревали его. Им можно измерить температуру снега на разной глубине и почвы под ним. Можно определить температуру облаков, а узнав по ней температуру воздуха на

высоте их основания, вычислить его высоту по формуле:

$$H = 100(t_1 - t_2)/ВГТ,$$

где t_1 и t_2 – температура воздуха у земли и на высоте H ; ВГТ = 0,65°C/100 м - вертикальный градиент температуры.

Можно научиться оценивать инсоляцию, рассеянную и суммарную радиацию, измеряя инфракрасным термометром температуру половинок горизонтального листа картона, окрашенных белой и черной краской, воспроизводя тем самым прин-



Рис. 5.16. Виды термометров: коленчатые Савинова, напочвенный, мультиметр с термопарой, инфракрасный

цип действия пиранометра.

Для непрерывной записи колебаний температуры воздуха на метеостанциях используют самописец температуры – термограф М-16 и М-21А (рис. 5.17). Однако в полевых условиях его использование небезопасно в плане сохранности, а стоимость нового прибора превышает 40 тыс. рублей.

Альтернативой является использование современных приборов – логгеров, например DLT-01 (рис. 5.17). Стоимость их от 740 рублей. Они очень компактны и могут быть безопасно оставляемы прямо в поле.

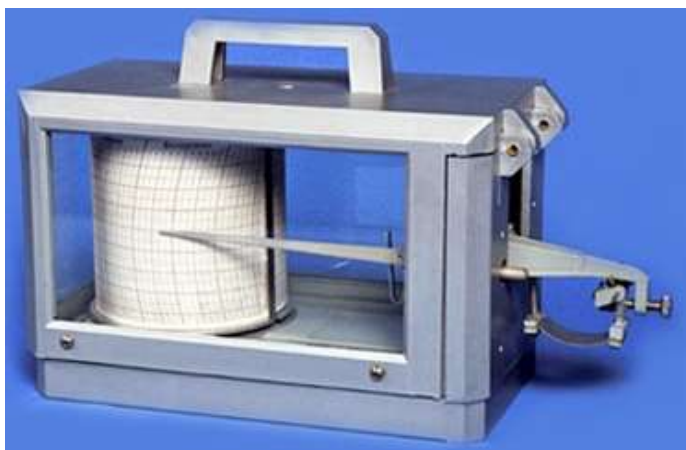


Рис. 5.17. Термограф М-21А (слева) [227] и логгер DLT-01 [228]

Логгеры представляют собой электронные регистраторы с автономным питанием. Они измеряют и записывают во внутреннюю память значения температуры (и влажности). Подключение к компьютеру осуществляется через USB-интерфейс. Данные, сохраненные в памяти логгера, передаются на компьютер в формате CSV или PDF. Логгер выполнен в ударопрочном корпусе, в котором размещены стандартный разъем для подключения к порту USB., два светодиодных индикатора и кнопка управления. Варианты исполнения: логгер температуры DLT-01 и логгер температуры и влажности DLT-02

5.6.3 Математическая модель динамики промерзания почвы

Для изучения многолетних закономерностей промерзания почвы были проанализированы данные МС Луганск с 1959 по 1999 гг. Пример изменения глубины промерзания зимой 1964-1965 гг. представлен на рис. 5.18.

Как хорошо видно на графике, до суммы отрицательных температур 200°C по модулю нарастание промерзания шло практически по прямой линии с интенсивностью 0,3 см на каждый $^{\circ}\text{C}$, но после установления снежного покрова высотой около 15 см промерзание остановилось и даже начало немного снижаться, и только при $-\Sigma(-T) = 300^{\circ}\text{C}$ снова стало нарастать, но вчетверо медленнее – с интенсивностью 0,075 см/ $^{\circ}\text{C}$.

Для количественной оценки комплексного влияния отрицательных температур воздуха и обогревающей роли снежного покрова в ряду многолетних данных были отобраны 3 года с примерно одинаковой суммой $\Sigma(-T)$ - до 200°C , но с различной высотой снежного покрова (5, 11 и 16 см).

С помощью программы «ФАКТОР» была построена двухфакторная математическая модель. В общем виде она имеет вид: $H_{np} = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2)$.

Параметры уравнений-множителей модели представлены в табл. 5.4.

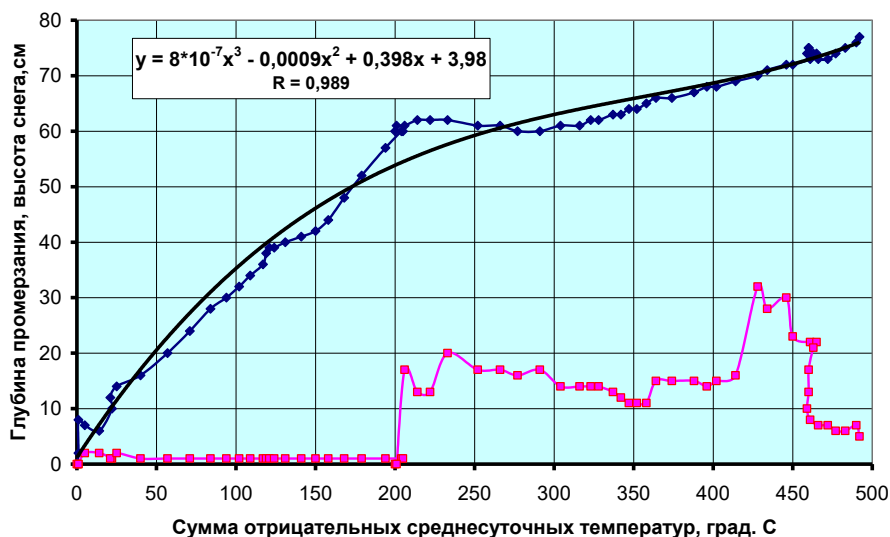


Рис. 5.18. Нарастание глубины промерзания почвы в зависимости от суммы отрицательных температур и высоты снежного покрова. Верхняя ломаная линия – глубина промерзания, нижняя – высота снега, кривая – линия тренда

Таблица 5.4

Параметры модели промерзания почвы

№ пп	Уравнение частной за- висимости	Независимая переменная x_i	Параметры уравнений			Коэффициент корреляции r в динамике
			a	b	c	
1	$f_1 = ax_1^b$	$ \Sigma(-T) , ^\circ\text{C}$	10,37	0,298	-	0,44
2	$f_2 = a + bx_2^c$	$H_{\text{сн}}, \text{см}$	1,28	-0,000106	3	0,95

Итоговый вид модели:

$$H_{\text{пр}} = 10,37 \cdot |\Sigma(-t)|^{0,298} \cdot (1,282 - 1,06 \cdot 10^{-4} \cdot H_{\text{сн}}^3), \quad (5.2)$$

где главным является фактор $|\Sigma(-t)|$ – сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха; весомым фактором, снижающим промерзание является и фактор $H_{\text{сн}}$, – высота снежного покрова, см. При использовании для прогноза промерзания только первого фактора R равен 0,44; при вовлечении в модель и второго фактора ее адекватность существенно возрастает ($R = 0,95$).

Выводы и перспективы использования результатов исследований.

1. Измерение температуры почвы на различной глубине наиболее удобно выполнять мультиметром с термопарой, предельная ошибка измерений $\Delta_{\text{пред}}$ не превышает 1°C , однако обязательной является тарировка прибора.
2. Зависимость увеличения глубины промерзания от роста суммы отрицательных среднесуточных температур при постоянной высоте снега имеет почти линейный характер и характеризуется очень высокой теснотой связи.
3. Снежный покров высотой около 15 см снижает скорость увеличения глубины промерзания почвы в 4 раза.
4. Математическая модель глубины промерзания почвы, характеризующаяся высоким коэффициентом корреляции (0,95), свидетельствует о возможности точного прогнозирования глубины промерзания почвы по данным метеорологических измерений и может быть использована для прогнозирования как речного стока весеннего половодья, так и поверхностного стока с целью долгосрочного эрозионного прогнозирования.

5.7 Методы измерения скорости ветра

Ветер – определяющий фактор дефляции и косвенно – водной эрозии. Он влияет на снегоотложение, а через него на промерзание почвы и сток. Для некоторых исследований можно использовать данные о ветровом режиме, полученные в ЦГМ. Но иногда бывает необходимо иметь данные о скорости и направлении ветра в конкретных геоморфологических и агроландшафтных условиях. Еще один предмет изучения – закономерности пространственного изменения ветра в системе лесополос, растительных кулис, в условиях сложного рельефа. Для измерения скорости ветра в полевых условиях используют анемометры различных конструкций - чашечные и индукционные, а в последнее время чаще применяют электронные анемометры пропеллерного типа [рис. 5.19] и термоанемометры.



Рис. 5.19. Анемометры: чашечный МС-13, ручной индукционный АРИ-49, портативный электронный RZ GM 8908

Электронные анемометры удобнее, они не требуют промежуточных вычислений, позволяют получить данные средней и мгновенной скорости, а также температуру воздушного потока.

При изучении пространственной структуры воздушного потока, трансформированного системой лесных полос, важно иметь данные одновременных множественных замеров скорости ветра в различных точках по удаленности от полос и по высоте.

При изучении дефляции на крупных техногенных объектах, например терриконах, важно, также, учитывать их сложные аэродинамические особенности. Ведь ветер, имеющий определенное исходное значение скорости, при огибании отвала существенно меняет направление и скорость, а это приводит к формированию участков с разной интенсивностью дефляции и даже с аккумуляцией. Требуется изучения роль восходящих потоков при набегании ветра на отвал, роль шероховатости поверхности отвала, влияние соседних отвалов. Эти особенности трудно изучить путем физического или

математического моделирования.

Решение такой задачи также требует одновременных замеров с помощью большого количества приборов и исполнителей, что трудно осуществимо. Поэтому нами был предложен новый метод, заключающийся в установке на всей поверхности поля или отвала максимально большого количества датчиков скорости ветра, передающих свои показания на единый пульт управления и контроля. На рис. 5.20 представлена система контроля, реализующая предложенный метод. Помимо точечных датчиков и пульта управления она включает мачты высотой 5-10 метров для градиентных измерений.

Возможны **несколько вариантов системы контроля**. Первый – самый простой – установка автономных датчиков, регистрирующих среднюю скорость за период измерений с последующим их обходом для снятия показаний. Второй – использование датчиков, генерирующих электрические импульсы с передачей их на пульт сбора информации по проводам. Наиболее удобным является третий вариант – беспроводная передача данных. В результате анализа научной и технической информации была выбрана схема радиосвязи, основанная на использовании микропроцессоров PIC 16F628A и MRF49XA.

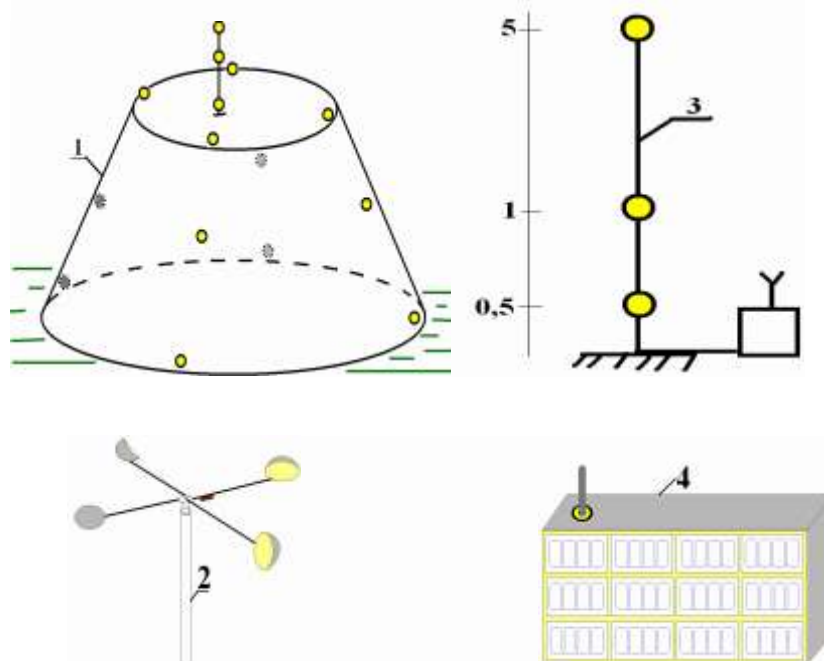


Рис. 5.20. Система контроля пространственной структуры ветрового потока на породном отвале: 1 – террикон; 2 – датчик скорости ветра; 3 – контрольная мачта для градиентных наблюдений; 4 – пульт управления.

Приёмник имеет чувствительность 0,7 мкВ, напряжение питания 2,2 – 3,8 В. Постоянный ток – 12 мА. Скорость передачи данных до 2 кбит/сек. Передатчик имеет мощность – 10 мВт, напряжение питания 2,2 – 3,8 В. Ток, потребляемый в режиме передачи – 25 мА. Ток покоя – 25 мкА. Скорость данных – 1 кбит/сек.

Использование того или иного варианта системы контроля выдвигает различные требования к датчикам. По первому варианту нужны анемометры,

сохраняющие свои показания. По второму - достаточны датчики скорости ветра без дисплея, имеющие клеммы вывода информации. По третьему – такие же датчики, но снабженные передатчиком. Очень желательной является функция регистрации направления ветра. Важным требованием является низкая стоимость приборов, поскольку их должно быть много, а пользователями продукции могут быть не только богатые фирмы, но и вузовские кафедры, научные лаборатории, аспиранты, частные лица, исследующие ветровой режим своего участка для установки бытовой ветровой электростанции, а также предприниматели, занимающиеся установкой таких ВЭС.

Для разработки технических средств для проведения исследований ветрового режима крупных техногенных объектов предварительно был выполнен анализ известных приборов, используемых для измерения скорости и направления ветра (табл. 5.5). Анализ показал, что среди существующих приборов нет ни одного, который отвечал бы всем поставленным требованиям, и прежде всего по причине их высокой стоимости. Поэтому нами были разработаны несколько новых конструкций анемометров.

Таблица 5.5

Анализ известных приборов для измерения скорости ветра

Марка прибора	Недостатки в применении при изучении ветровых потоков на терриконах
АПА-1	Нет флюгера, указывающего направление ветра, нет возможности наблюдения в онлайн режиме, при температуре ниже 0°C работает с погрешностями
АПР -2	Нет флюгера для оценки направления ветра, нет подключения к ПК и памяти для хранения данных, при температуре ниже 0°C работает с погрешностями
АСО-3	Нет дисплея чтобы определить скорость ветра, полученные данные нужно дополнительно обрабатывать, нет подключения к ПК
М-95МЦ	Работает от сети 220 V, использование в полевых условиях затруднено
АП-1	Слабая чувствительность, не измеряет скорость ветра более 5 м/с.
Термоане- мометр М-50	Состоит из двух частей: блока обработки и измерительной головки, неудобен при транспортировке на террикон, при температуре ниже 0°C работает с погрешностями
TESTO 435	Нет подключения к ПК, при температуре ниже 0°C работает с погрешностями
SkyWatch	Нет подключения к ПК
МС-13	Не имеет дисплея, чтобы определить скорость ветра, полученные данные нужно дополнительно обрабатывать, нет подключения к ПК
АРИ-49	Не имеет дисплея, чтобы определить скорость ветра, полученные данные нужно дополнительно обрабатывать, нет подключения к ПК
АТТ-1021	Нечувствителен к малым скоростям ветра, нет подключения к ПК

Прибор первой конструкции, изготовленный в двух незначительно различающихся модификациях: ГК-1 (рис. 5.21) и ГК-2 имеет традиционную чашечно-крестовинную конструкцию. Рекомендуются для первого варианта системы контроля.

Для второго варианта системы предлагается такой же прибор, но без счетчика оборотов. Для третьего варианта системы предлагается этот же прибор, но с передающим устройством.

Прибор второй конструкции принципиально отличается от первого. Он изготавливается из серийно выпускаемого прибора – бытового водомера. Для

целей исследования вполне пригоден прибор, исчерпавший срок эксплуатации, поэтому стоимость его также очень низка, а источники поставки - водомерные мастерские имеют большие ресурсы поставки этих приборов.

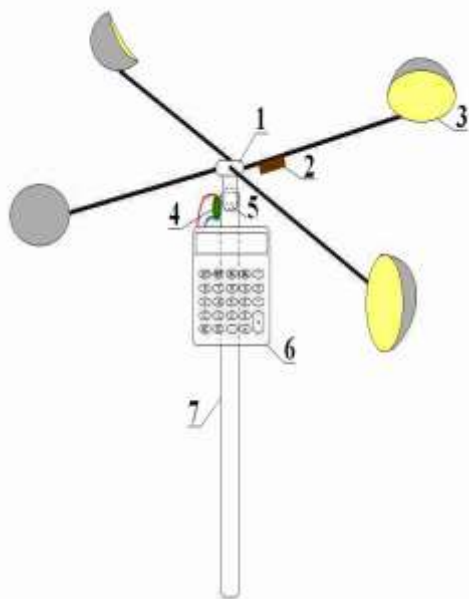


Рис. 5.21. Экспериментальный прибор ГК-1 с дисплеем: 1 - штуцер, 2 - магнит, 3-лопасти, 4 – геркон, 5 – подшипник, 6 - счетчик импульсов, 7- рукоятка

Отличительной особенностью ГК-1 и ГК-2 является счетчик 6 оборотов крыльчатки, изготовленный из бытового калькулятора путем вживления управляющих электродов в его схему. Генератором импульсов является геркон 4, укрепленный на корпусе прибора, замыкающий цепь под воздействием магнита 2. Такая конструкция прибора многократно удешевляет его в сравнении с промышленно изготавливаемыми анемометрами, что очень существенно при организации массовых замеров скорости ветра.

Прибор прост в изготовлении. Предназначен для первого варианта системы контроля, но можно использовать его и как ручной анемометр.

Прибор второй конструкции имеет несколько модификаций. В двух близких друг другу модификациях (ВД-1 и ВД-2) использован счетный механизм водомера, а прямолопастная крыльчатка переделана в крыльчатку с искривленными накладными лопастями, в модификации ВД-3 металлический корпус наполовину распиливается, открывая половину крыльчатки. В модификации ФГ-1 крыльчатка открывается полностью (рис. 5.22).

Приборы ГК-1, 2 и ВД-1, 2 работают при любом направлении ветра, а ВД-3 и ФГ-1 нуждаются в поворачивании либо всего корпуса, либо защитного кожуха 4 (рис. 5.22) посредством флюгера 7, чтобы открытая часть крыльчатки была правильно ориентирована по ветру. Наличие флюгера позволяет контролировать направление воздушного потока, что особенно важно для изучения закономерностей обтекания потоком террикона или другого крупного техногенного объекта. Это качество наилучшим образом реализуется в приборе ФГ-2, в которой флюгер, а с ним и корпус прибора могут поворачиваться как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях.

Приборы серии ВД и ФГ имеют счетный механизм, накапливающий показания за любой интервал времени.

Предложенные приборы способны работать с малыми скоростями ветра. Они прошли проверку на отвалах шахт «Матросская» и им. Мельникова ПАО «Лисичанскуголь». Для сравнения (в качестве контроля) использовали ручной анемометр МС-13. Полученные в эксперименте данные были проверены с помощью критерия Стьюдента на однородность, а с помощью метода

спрямлённых диаграмм на достоверность.

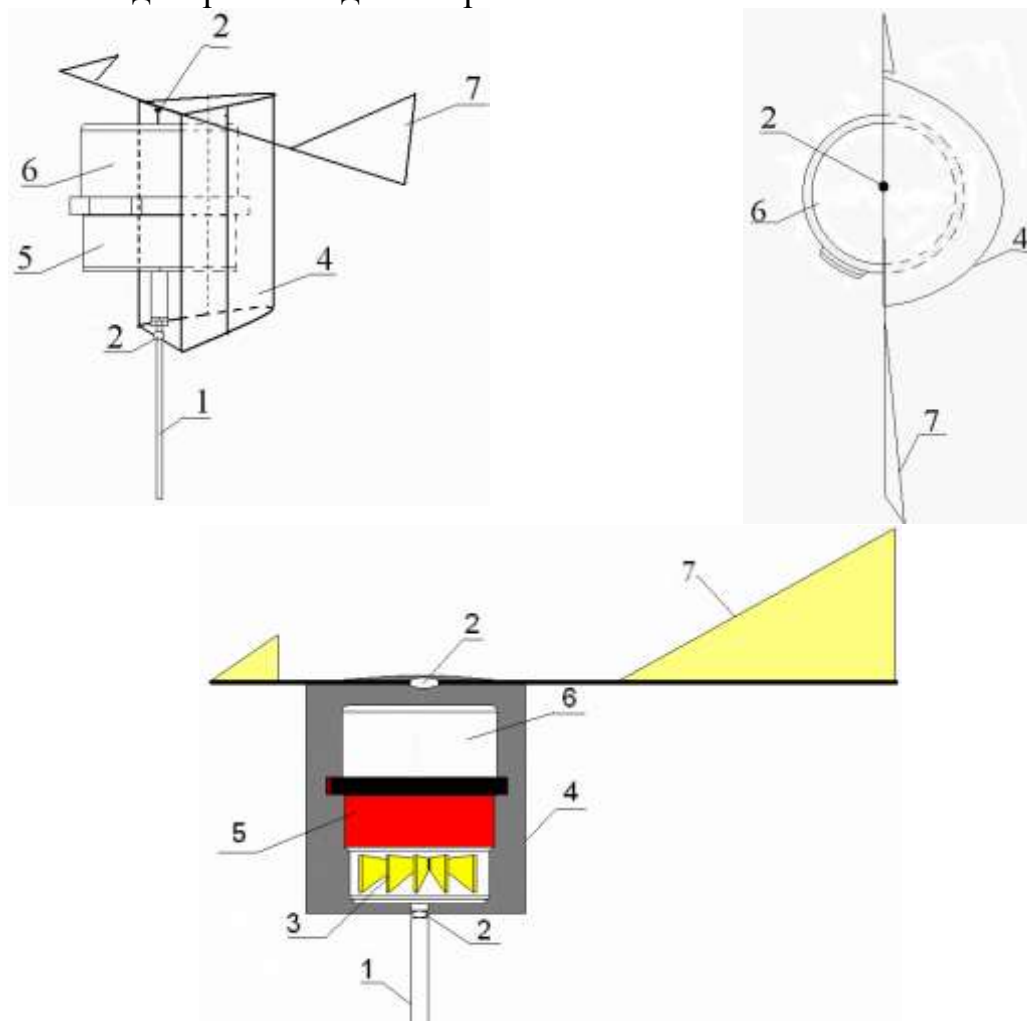


Рис. 5.22. Экспериментальный прибор ФГ-1: 1 – рукоятка, 2 – подшипник, 3 – лопасти, 4 – защит. кожух, 5 – корпус водомера, 6 – крышка счетчика, 7 – флюгарка

Все разработанные приборы нуждаются в тарировке, т.е. установлении соответствия между частотой вращения крыльчатки и скоростью воздушного потока. Эта процедура потребовала изготовления соответствующего лабораторного оборудования. Были испытаны два способа создания воздушного потока – с помощью бытового вентилятора и компрессора мощностью 600 Вт.

Испытания включали изучение структуры создаваемых воздушных потоков, т.е. установление зависимости скорости потока от расстояния от источника ветра и от оси потока. Тарировка обоих экспериментальных приборов выполнялась в лаборатории кафедры гидрометеорологии ВНУ им. В. Даля.

Разработанные приборы характеризуются простотой изготовления и малой стоимостью, что позволяет исследователю иметь в распоряжении большое их количество. Изучение пространственной структуры воздушных потоков на большой территории возможно именно в этом случае, причем достаточного количества персонала может, скорее всего, не быть. Однако при реализации системы контроля, показанной на рис. 5.20, исследования очень облегчаются.

Последовательность функционирования системы передачи информации и управления работой датчиков представлена в таблице 5.6.

Таблица 5.6.

Последовательность работы пульта управления

№ операции	Суть операции и ее результат
1	Расставляются датчики скорости ветра, включаются их передатчики. Роторы датчиков начинают вращаться, генерируемые электрические импульсы, передаются в эфир
2	Для приборов типа ГК-1 нажимается включатель питания счетчиков. Счетчики начинают функционировать
3а, 3б	На пульте нажимается включатель питания приемников или (при проводной связи) включатель цепей герконов. Приемники начинают принимать импульсы датчиков или начинают формироваться импульсы в электрических цепях герконов
4	Нажимается кнопка «ON». Вместе включаются все счетчики импульсов, на табло счетчиков появляется цифра «0»
5	Нажимается кнопка «1» На табло каждого счетчика появляется цифра «1»
6	Нажимается кнопка «+». На табло счетчиков остается «1»
7	Нажимается кнопка «=». Замыкается цепь «приемник-счетчик», или (при проводной связи) замыкается цепь «геркон-счетчик». Электрические импульсы датчиков скорости, улавливаемые приемниками, или передаваемые по проводу, импульсно замыкают и размыкают цепь клавиши «=» счетчиков, на их дисплеях отражаются суммы импульсов
8	Через заданный промежуток времени размыкается включатель «+». Электрические импульсы не передаются на счетчики. Снимаются отсчеты с их дисплеев

Выводы: предложенная система контроля ветрового режима территории агроландшафта с лесными полосами или техногенного ландшафта с породными отвалами и новые приборы для измерения скорости ветра на них позволит детально оценивать структуру воздушных потоков, что является важным условием оценки дефляционной опасности ландшафтов и особенностей функционирования лесных полос, их влияния на элементы водного баланса.

5.8 Оценка влияния лесных полос на ветровой режим и факторы водообразования в агроландшафтах

5.8.1 Влияние на ветровой режим

Проведенные нами исследования [57, 72] и многочисленные данные других ученых свидетельствуют, что пространственное комплексное мелиоративное влияние лесных полос на прилегающие поля прежде всего обусловлено их влиянием на скорость ветра - как с заветренной, так и с наветренной стороны. Именно поэтому современная теория системного размещения и функционирования полезащитных лесных полос учитывает ветроломное действие их как биологических препятствий, которые снижают скорость ветра и благодаря этому задерживают и распределяют снег на полях, уменьшают потери влаги на испарение, снижают интенсивность дефляции почвы.

Эффективность полезащитных лесных полос оценивается прежде всего показателем защищенности Z , под которым понимают отношение площади пашни, находящейся в зоне эффективного влияния лесных полос, к общей площади полей. Реальная защищенность той или иной части поля существенно варьирует в зависимости от расстояния от лесной полосы в заветренном направлении в

соответствии с изменением степени снижения скорости ветра. Интегрирующим показателем, характеризующим влияние лесных полос на скорость ветра, является "суммарная ветрозащита". По Ю.П. Бялловичу под ней подразумевают средний процент снижения скорости ветра в зоне от опушки до расстояния, кратного 30 высотам лесной полосы (30H) – зоне эффективного влияния лесных полос. Согласно [1], именно таким должно быть расстояние между лесными полосами.

На основании собственных исследований мы разработали графики, которые отражают эмпирические зависимости скорости ветра за лесными полосами разной конструкции от степени ажурности. На основе графиков Я.А. Смалько [175] и собственного методического подхода разработали номограмму расчета суммарной ветрозащиты за лесными полосами в зависимости как от степени ажурности в поперечном направлении, так и от угла подхода к ним ветра (рис. 5.23).

При изучении ветрозащитной роли лесных полос скорость ветра принято измерять на высоте, кратной 0,2H или равной 2 м [114]. Но на метеостанциях ее измеряют на высоте флюгера (10 м). Если известна скорость ветра на этой высоте (V_{10}), то на основе логарифмического закона [95] на другой высоте (2 м) она будет определяться следующим выражением:

$$V_2 = V_{10} \ln[(2+z_0)/z_0] / \ln[(10+z_0)/z_0],$$

где z_0 – параметр шероховатости, равный для снега 0,05-1,00 см.

Таким образом, $V_2 = (0,835)V_{10}$, а $V_{10} = (1,195)V_2$.

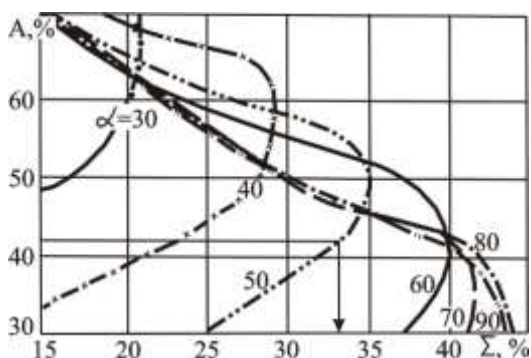


Рис. 5.23. Номограмма определения суммарной ветрозащиты в зависимости от ажурности лесных полос A и угла подхода к ним ветра α

При этом учитывалось, что угол подхода ветра влияет на суммарную ветрозащиту двояко: во-первых, при его уменьшении (с 90° до меньшего значения) уменьшается ажурность лесной полосы в направления ветра, во-вторых, сокращается длина проекции вектора ветровой тени на нормаль к лесной полосе.

Номограмма дает осредненные значения суммарной ветрозащиты для лесных полос ажурной и продуваемой конструкций.

Конкретно у продуваемых полос оно выше, а у ажурных – ниже значений, получаемых по номограмме, в среднем на 0,7%.

5.8.2 Влияние лесных полос на снегоотложение и запасы воды в снежном покрове

Исследования показали, что в условиях восточной части северной степи Украины, которые характеризуются активным ветровым режимом в зимне-весенние месяцы и интенсивным переформированием снежного покрова, влияние лесных полос и гидротехнических сооружений заметно проявлялось как в годы с малоснежной зимой и неустойчивым снежным покровом, так и в годы, обеспеченные твердыми осадками выше нормы.

Результаты снегомерных съемок в опытах 3 и 4 перед весенним снеготаянием показаны в табл. 5.7 и 5.8. В опыте № 4 (рис. 3.7) на склоне северной экспозиции в среднем за 5 лет зона влияния лесной полосы на снегоотложение была кратной 16,5Н (5,8Н вверх и 10,7Н вниз по склону). Высота снега в шлейфовой зоне была в среднем на 6,7 см больше, чем в открытом поле. В результате дополнительно накапливалось значительное количество влаги (табл. 5.7) – в среднем 20 мм.

Таблица 5.7

**Снежный покров и накопление влаги на опытном участке № 4
перед началом весеннего снеготаяния**

Место наблюдений	Годы					Среднее
	1988	1990	1991	1996	1997	
Открытое поле – контроль	<u>15,0</u> 0	<u>4,6</u> 0	<u>6,8</u> 0	<u>16,3</u> 0	<u>12,5</u> 0	<u>11,1</u> 0
Лесная полоса	<u>21,0</u> 9,6	<u>20,0</u> 24,7	<u>17,5</u> 26,0	<u>45,0</u> 77,5	<u>15,0</u> 7,6	<u>23,7</u> 29,0
Шлейфовая зона лесополосы	<u>16,7</u> 2,7	<u>9,5</u> 13,2	<u>14,8</u> 12,3	<u>30,0</u> 37,0	<u>17,8</u> 16,2	<u>17,8</u> 16,3
Полоса поля шириной 35Н (модуль системы лесополос)	<u>15,9</u> 1,4	<u>7,0</u> 5,7	<u>11,2</u> 11,8	<u>25,5</u> 24,5	<u>14,4</u> 5,8	<u>14,8</u> 9,9

Примечание к табл. 5.7: в числителе высота снежного покрова, см; в знаменателе – дополнительное накопление влаги, мм.

В зоне шириной 280 м, кратной 35Н (нормативному расстоянию между полевзащитными лесными полосами), с лесной полосой посередине высота снега и накопление влаги были на 3,7 см и 9,9 мм больше, чем в открытом поле.

Ширина зоны шлейфов двухрядных лесных полос в опыте № 3 (вариант № 3) в среднем за три года составляла 14,5Н (6,6Н вверх и 7,9Н вниз по склону). Ширина зоны шлейфов от валов-каналов в среднем составляла 14,1 м. Дополнительное накопление снеговой влаги в этой зоне было 7,1 мм.

Наилучшие условия для сохранения снежного покрова складывались в лесных массивах вследствие отсутствия выдувания и низкого испарения, поэтому здесь наблюдались наибольшие высота и влагозапасы снега. Если принять их за 100%, то можно сделать вывод, что в среднем за 1996 и 1997 гг. сохранность снеговых запасов в открытых полях равнялась 60,5%, а в системе лесных полос и противоэрозионных валов-каналов 86,7%. Остальные запасы терялись на испарение и переносились в ложбины и балки.

Самые масштабные снегомерные съемки выполнены нами в 1987, 1994 и 1996 гг. Зимний период 1986/87 г. отличался большим количеством дней с осадками, в сопровождении сильными ветрами. Отложение снежного покрова и его переформирование происходило практически на протяжении всех зимних месяцев и в марте. Преобладающими направлениями ветра были юго-восточное и северо-западное, поэтому снежные шлейфы формировались в обе стороны от лесных полос. Снегомерная съемка в этом году выполнялась по 22 маршрутам поперек лесных полос разных конструкций (плотной, ажурной, продуваемой), высоты и ориентации на склонах с экспозициями от северо-западной до юго-восточной. Высота лесных полос в среднем равнялась 7,9 м. Средние показатели их влияния на снегоотложение и накопление влаги показаны в табл. 5.8.

Снегораспределяющая роль защитных лесных насаждений

Место наблюдений	Длина зоны по склону	Высота снега, см	Запас влаги в снеге		Дополнительная влага, мм
			мм	%	
Лесные массивы	-	52,2	122,0	100	42,3
Открытое поле	-	29,9	79,7	66	0
Лесополосы	12-15 м	73,0	213,0	174	133,0
Шлейфы: выше лесных полос	8,9Н	42,8	122,5	100	42,8
ниже лесных полос	12,1Н	37,4	113,6	93	33,9
Вся зона шлейфов	21,0Н	39,7	117,4	96	37,7

Средняя суммарная ширина зоны шлейфов лесных полос составила 166 м. Наибольший запас влаги наблюдался в лесных полосах – 174% к запасу в лесных массивах. В зоне шлейфов он в среднем составил 96%.

Полученные данные показывают, что в лесных полосах происходит накопление снега, сдуваемого с незащищенной части поля. В среднем в зоне шлейфов накопление снега и влаги такое же, как и в лесу, но в разных частях шлейфов - в зависимости от расстояния от лесной полосы оно происходит по-разному – за счет отложения снега, вынесенного с незащищенных участков, либо за счет снижения потерь снега на выдувание. В зависимости от расстояния от лесных полос преобладают процессы накопления либо выдувания снега.

5.8.3 Влияние лесных полос на испарение влаги из снега

Испарение снега является элементом водного баланса на водосборах, используется при прогнозировании талого стока. Методические основы его изучения изложены в «Руководстве...» [165]. Для выявления закономерностей потерь влагозапасов в снеге в результате испарения на лесомелиорируемых землях в 1985-1989 гг. проводились исследования на опытах 3 и 4. Испарение со снежного покрова измеряли самодельными испарителями (рис. 5.24), подобными испарителям ГГИ-500-6, устанавливаемыми в открытом поле, в стокорегулирующей лесной полосе и на расстояниях, кратных 2,5; 5; 15 и 25 ее высоте вверх и вниз по склону.

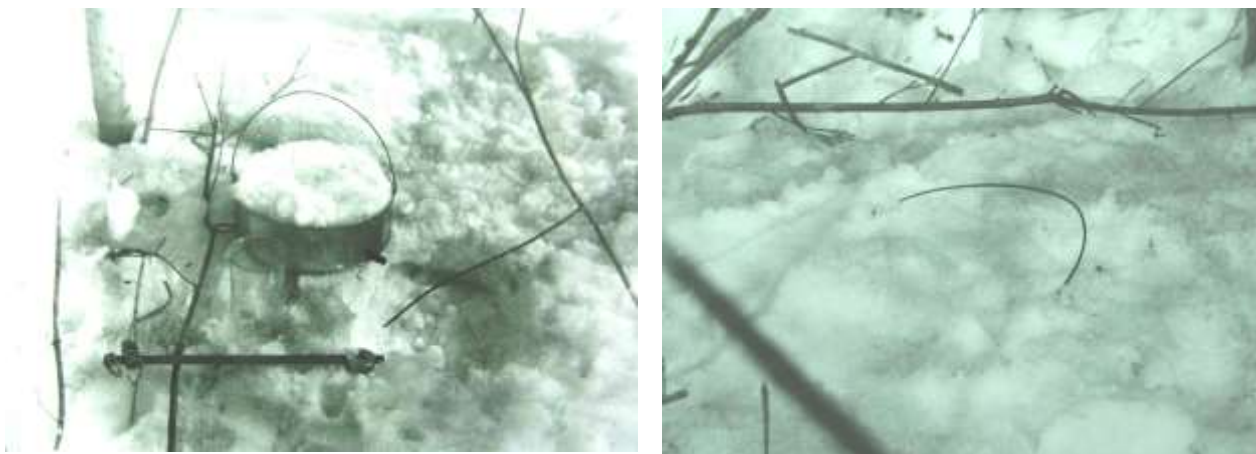


Рис. 5.24. Испаритель, подготовленный к установке в снег, и после нее
(фото А.Р. Зубова)

Испарители взвешивали на весах снегомера ВС-43, точность измерений содержания воды в снеге при этом составляла $\pm 0,04$ мм. Для повышения точности определения суточного испарения взвешивание испарителей проводили с интервалом 3-6 суток при постоянных погодных условиях, без осадков. Между измерениями подсчитывали среднесуточные значения скорости ветра на высоте 10 м, относительной влажности и температуры воздуха на высоте 2 м, продолжительности солнечного сияния, облачности, дефицита влажности воздуха по данным Луганского ЦГМ. Учитывали также плотность снега в испарителях.

Испарители использовались наряду с метровыми рамами и для получения информации о водоотдаче из снега. При этом вода, скапливающаяся в них, сливалась в мерный стакан, и по ее объему вычислялся слой водоотдачи.

С помощью метода Брандона была получена математико-статистическая модель суточного испарения со снежного покрова E (мм/сут), которая описывается уравнением регрессии:

$$E = 4,7(0,13 + 0,06v)(0,35 + 0,01t)(100 - W)^{0,33}(0,22 + 0,03T^{0,6}), \quad (5.3)$$

где v – среднесуточная скорость ветра, м/с; t – среднесуточная температура воздуха, °С; W – среднесуточная относительная влажность воздуха, %; T – продолжительность солнечного сияния за сутки, ч.

Мы ограничились только этими четырьмя факторами, перечисленными в порядке убывания их влияния, поскольку введение в расчет плотности снега выявило отсутствие ее влияния, а введение вместо относительной влажности воздуха среднесуточного дефицита влажности и вместо продолжительности солнечного сияния показателя облачности снизило точность модели.

В наибольшей степени на испарение со снежного покрова влияет скорость ветра. Доля ее роли равна 56%, а всех отобранных факторов - 86%, о чем свидетельствует коэффициент детерминации R^2 , равный 0,86. Корреляционное отношение r значимо и равно $0,93 \pm 0,06$. Использование модели для расчетов правомерно при следующем варьировании входящих в нее факторов: $v = 0-5$ м/с; $t = -16,5 \dots -1,0^\circ$; $W = 70-93\%$; $T = 0-8$ ч/сут.

Для облегчения пользования уравнением регрессии составлена номограмма [72]. С ее помощью на основании данных Луганского ЦГМ получены значения испарения со снежного покрова в 1985-1987 гг. и рассчитан слой испарения за сутки и весь период сохранности снежного покрова в 1984-1989 гг.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что испарение со снежного покрова за зимне-весенний период является существенной расходной статьей водного баланса и, в зависимости от продолжительности периода сохранения снежного покрова и метеорологических условий, может достигать 50 мм и более (1986/87 гг.). В среднем за 5 лет испарение со снежного покрова за сезон составило 24,1 мм, или 21,5% суммы твердых осадков за периоды сохранности снежного покрова. Суточное испарение в среднем было равно 0,31 мм в открытом поле и 0,1 мм в лесу, где ветер отсутствует.

Анемометрические наблюдения на опытных участках № 3 и 4 позволили построить графики зависимости скорости ветра от расстояния до лесных полос

различной конструкции: ажурной двухрядной (вяз приземистый, $H = 3,9$ м) и плотной семирядной (ясень ланцетолистный, $H = 8,0$ м) в безлиственном состоянии при угле подхода ветра, близком к 90° (рис. 5.25).

Поскольку измерения выполнялись с использованием одного чашечного анемометра (см. рис. 5.19), пришлось совершить большое количество переходов от точки к точке по одним и тем же створам. Скорость менялась во времени, но закономерность влияния лесной полосы на ее значения, осредненные по повторениям, проявилась четко и отражена в виде графиков (рис. 5.25).

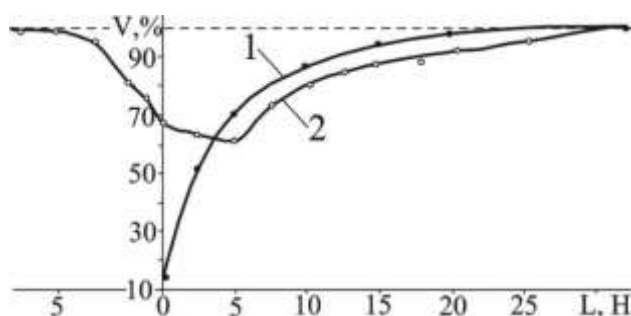


Рис. 5.25. Влияние лесных полос в безлистном состоянии на скорость ветра (высота измерения $0,2H$): 1 – плотная семирядная, 2 – ажурная двухрядная с валом-канавой в междурядье

Графоаналитическим методом были определены основные показатели ветрозащитной эффективности лесных полос (табл. 5.9).

Таблица 5.9

Показатели ветрозащитной эффективности лесных полос различных конструкций

Показатель	Лесная полоса	
	семирядная	двухрядная
Конструкция	плотная	ажурная
Высота, м	8,0	3,9
Дальность влияния, H:		
предельная	31,5	32,0
эффективная (при снижении скорости ветра более чем на 10%)	11,5	19,0
при снижении скорости ветра более чем на 20%	7,4	11,8
Минимальная скорость ветра за лесной полосой, % к контролю	14,0	61,0
Суммарная ветрозащита, %	18,2	19,7
Снижение испарения в зоне 0-30H, %	13,2	14,1

Сравнение показателей свидетельствует о том, что по эффективной дальности влияния и суммарной ветрозащите ажурные лесные полосы превосходят лесные полосы плотной конструкции.

Снижая скорость ветра, лесополосы уменьшают потери влагозапасов снега на испарение. В 1986/87 г. преобладали ветры юго-восточного и северо-западного направлений с углом подхода к исследуемой полосе $40-50^\circ$, средняя скорость ветра в зоне ветровой тени (0-20H) составила, по данным анемометрических наблюдений, 85,7% скорости ветра в открытом поле. Суточное испарение снега в зоне ветровой тени за семирядной лесной полосой (0-20H) составляло 88,3% испарения вне ее, а слой испарения за весь период сохранения снежного покрова был на 6,2 мм меньше.

5.8.4 Влияние лесных полос на промерзание почвы и поверхностный сток талых вод

Воздействуя на высоту снежного покрова, лесные полосы влияют и на степень промерзания и состояние почв в поле. Особенно сильно это проявилось в суровую и многоснежную зиму 1984/85 г., предшествовавшую наибольшему за период исследований талому стоку, приведшему к катастрофическому наводнению в Луганске. В 1985/86 г. в связи с меньшей дифференциацией снежного покрова на поле и скоплением снега в лесной полосе и коротких шлейфах промерзание почвы на поле менялось незначительно по длине склона.

Заметное действие лесные полосы оказывали на промерзание почвы в прудках ГС, совмещенных с ними или находящихся на поле в зоне их влияния на опытном участке № 4 (см. рис. 3.7). Об этом свидетельствуют измерения и расчет водопроницаемости мерзлой почвы в прудках валов-террас в условиях талого стока. В зоне влияния лесной полосы водопроницаемость почвы v в прудке вала-террасы была на 18,5-20,8% выше. Эта закономерность выражается уравнением:

$$v = 0,47 + 0,175/L, \text{ мм/мин, где } L - \text{удаленность от лесной полосы, Н.}$$

Водопроницаемость почвы v в прудках валов-террас зависит также от высоты слоя талой воды h в них: $v = 0,018h^{0,55}$, мм/мин.

Графики уравнений для интервалов значений L от 0 до 30Н и h от 0 до 20 см приведены на рис. 5.26.

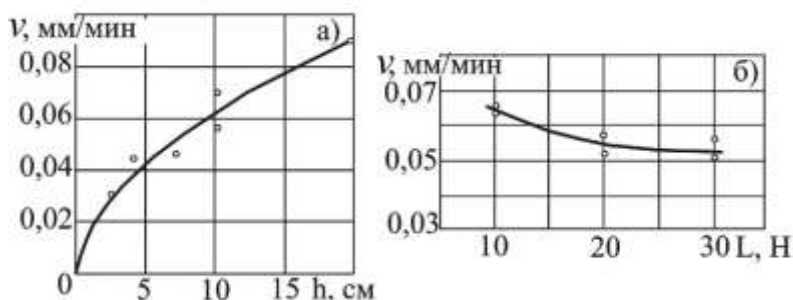


Рис. 5.26. Зависимость интенсивности впитывания воды в мерзлую почву прудков валов-террас v от уровня воды h (а) и расстояния до лесной полосы L (б)

После исключения влияния величины уровня воды в прудках валов-террас, удаленных от лесной полосы на расстояния 80, 160 и 240 м, кратные 10, 20 и 30 ее высотам (Н) на величину водопроницаемости, выполненного по методу Брандона, она приняла значения 0,062, 0,054 и 0,053 мм/мин соответственно.

Таким образом, вне зоны влияния лесополосы на снегоотложение шириной, равной в 1985 году 16,3Н, водопроницаемость почвы в прудках валов-террас мало различалась, а в зоне влияния (10Н) была на 18,5-20,8% выше. Это связано, по-видимому, с различной глубиной промерзания почвы и степенью покрытия ее поверхности ледяной коркой, обусловленными влиянием лесной полосы.

В общем виде зависимость водопроницаемости от вышеназванных факторов можно выразить двухфакторным уравнением:

$$V = 0,018 \cdot h^{0,55} \cdot (0,047 + 0,175/L_H), \quad (5.4)$$

где L_H – расстояние, выраженное в Н.

В прудках валов-канал без наполнителя, расположенных на расстоянии 0, 10

и 20Н от лесной полосы, глубина промерзания почвы $h_{\text{п}}$ к началу весеннего снеготаяния в 1986 г. (с наибольшим за период исследований смывом почвы от талого стока) составляла соответственно 13, 30 и 41% от $h_{\text{п}}$ вне зоны влияния лесополосы, т. е. возрастала с удалением от нее. В прудках валов-террас, находящихся от лесной полосы на расстоянии 10 и 20Н, $h_{\text{п}}$ достигала соответственно 63 и 79%.

В канавах с наполнителем, как в зоне влияния лесной полосы, так и вне ее, этого не происходило. О зависимости водопроницаемости почв от глубины промерзания можно судить по следующим данным: в прудках валов-канал с наполнителем она была равна 1,25, без наполнителя 0,13 мм/мин.

За период исследований много раз возникал талый сток: дважды в марте 1982 г., дважды в январе и один раз в марте 1985 г., в марте 1986, 1988 и 1989 гг., в 1992, 1994, 1996, 1997, 1999, 2003, 2007-2010, 2013 гг. Наиболее показательным был 1985 г., когда суммарный талый сток составил 47 мм и был близок к стоку 10%-ной вероятности превышения, на задержание которого и рассчитаны элементы противоэрозионного комплекса. Самым продолжительным был весенний период стока – с 16 по 22 марта. Чередование оттепелей и морозов в январе создало крайне неблагоприятные условия для функционирования агротехники и ПЭГТС, поэтому мартовский сток на контроле достиг 33,5 мм, а на вариантах 3 и 4 опытного участка № 4 был равен 15,1 и 29,3 мм.

В формировании стока по длине склона наблюдались четко выраженные различия, обусловленные влиянием лесной полосы на снегоотложение и микроклимат в приземном слое воздуха (табл. 5.10). Дальность ее влияния на снегоотложение вниз по склону была 16,3Н, максимальное влияние - в зоне 0-10Н.

Таблица 5.10

**Эрозионно-гидрологические показатели на стоковых площадках
опытного участка № 4 при талом стоке 16-22.03.1985 г.**

№ пп	Показатели	Зоны удаленности от лесной полосы, Н		
		0-10	10-20	20-30
1	Высота снега, см	28,2	21,2	19,7
2	Плотность снега, см/см	0,26	0,27	0,29
3	Запас воды в снеге	73,9	57,7	57,1
4	Осадки за период стока, мм	8,9	8,9	8,9
5	Испарение снега за период стока, мм	1,0	1,7	1,8
6	Общий слой стока, мм	34,3	41,2	41,3
7	Потери стока (дополнительное влагонакопление), мм	47,5	23,7	22,9
8	Коэффициент стока с учетом осадков и испарения	0,42	0,63	0,64
9	Средневзвешенная мутность стока, г/л	0,03	0,02	0,02
10	Смыв почвы, т/га	0,010	0,008	0,008
11	Интенсивность водопоглощения, мм/мин	0,0086	0,0043	0,0041

Самый большой сток вне зоны влияния лесной полосы отмечен на второй день. В зоне 0-10 Н полоса оказывала замедляющее действие на таяние снега, поэтому пик стока со стоковых площадок здесь пришелся на пятый день и был менее выражен. Это явление в предшествующие периоды в зоне 0-7Н способствовало лучшей сохранности снега, что снижало интенсивность образования ледяной корки на поверхности почвы и в прудках ГС.

Следствием различий в глубине промерзания почвы, степени покрытия ее ледяной притертой коркой и заполнения льдом водоудерживающей емкости нанорельефа стало резкое повышение (в 2-2,1 раза) водопроницаемости почвы в зоне активного влияния лесной полосы. Слой стока в этой зоне снизился на 7 мм несмотря на более высокие запасы влаги в снеге, а его коэффициент на 34,4%.

Водопроницаемость мерзлой почвы в период стока талых вод может быть определена и воднобалансовым методом (см. табл. 5.10). Для этого, зная слой поглотившейся воды (потери стока) и суммарное время таяния (92 часа), делили слой поглощения (строка 7) на $92 \cdot 60 = 5520$ мин. Результаты записаны в строку 11.

К началу стока почва находилась в сильносцементированном состоянии, а ее поверхность в микропонижениях была покрыта льдом толщиной до 6 см, поэтому интенсивность водопоглощения в среднем за период стока на опыте была очень низкой – 0,0053 мм/мин. Интенсивность водопоглощения в зоне активного влияния лесной полосы (условно 0-10 Н) была в 2,0 раза выше, чем в переходной зоне (10-20Н) и в 2,1 раза выше, чем на остальной части поля (20-30 Н). Такое резкое различие стало причиной заметного снижения коэффициента стока в зоне влияния лесной полосы и было следствием различий по глубине промерзания, степени покрытия почвы ледяной коркой и заполнения льдом водоудерживающей емкости нанорельефа в зонах различной удаленности от лесной полосы.

Водопроницаемость почвы, определяемая методом трубок, вблизи лесной полосы на участках свободных от льда была значительно выше, чем в целом по зоне 0-10 Н. Использовались стальные трубки с внутренним диаметром 54 мм и длиной 300 мм, забитые с осени наполовину на расстоянии 5Н выше и ниже лесной полосы и в ней самой. Трубки заполнялись талой водой, отмечалось время и объем долива воды по мере сработки ее уровня.

В среднем за 24-29 марта 1985 года она составила на зяби, стерне эспарцета и в лесной полосе соответственно 0,037, 0,03 и 0,034 мм/мин. Ледяной корки на почве в лесной полосе не было, поэтому интенсивность водопоглощения в ней была в 6,4 раза выше, чем в среднем на поле.

В зоне влияния лесных полос заметно повышается эффективность специальных агротехнических противоэрозионных мероприятий – таких, как кротование (см. рис. 3.44). Оно выполнялось поперек склона выше лесной полосы лентами через 8 м (по две кротовины через 0,8 м в ленте), смыв почвы в условиях талого стока 10-15%-ной вероятности превышения на кротовании уменьшился с 14,7 до 8,5 т/га. Такой эффект обусловлен поглощением стока щелями в почве, оставляемыми ножом кротователя. Причем активнее этот процесс происходил на стоковых площадках, расположенных в зоне 0-10Н выше лесной полосы. Об этом свидетельствует то, что прибавка влагозапасов в метровом слое почвы за период стока в пределах лент шириной 1,5 м с кротовинами была в данной зоне на 19 мм больше чем в зоне 10-20Н.

Таким образом, лесные насаждения улучшают условия функционирования почвозащитной агротехники и ПЭГТС. Стокорегулирующие лесные полосы

обеспечивают мелиоративную защиту сельхозугодий в зоне протяженностью 10-11 Н вниз и 7-8 Н вверх на склонах северной экспозиции. Воздействуя на поверхность почв, снижая в мелиоративной зоне глубину их промерзания на поле на 15-40, а в прудках гидросооружений на 20-30%, лесополосы способствуют увеличению водопроницаемости почв, поэтому стоковая нагрузка на гидросооружения снижается, а их стокорегулирующая эффективность повышается. Совместное применение лесных полос, ПЭГТС и почвозащитной агротехники эффективнее не только в мелиоративном отношении, но и в экономическом.

Общие закономерности и количественные показатели, полученные в ходе исследований, в частности при талом стоке 10-15%-ной вероятности превышения, могут быть использованы для оптимизации противоэрозионного комплекса при дифференцированном подходе к размещению его элементов.

5.8.5 Влияние лесных полос и противоэрозионных гидротехнических сооружений на накопление влаги в почве

Исследования, проводившиеся в 1996-1998 гг., показали, что противоэрозионные гидротехнические сооружения (ПЭГТС) способствуют дополнительному накоплению влагозапасов в почве (табл. 5.11). В 1996 г. почва на опытных участках промерзала в среднем на 40 см, в канавах – на 0-5 см, а в 1997 г. на поле – на 30-50 см в зависимости от агрофона и экспозиции склона, дно канав промерзало на 10-15 см.

Таблица 5.11

Дополнительное накопление влаги в метровом слое почвы в зоне влияния ПЭГТС и лесных полос

Объект	Год	Ширина зоны влияния, м	Дополнительная влага, мм
Валы-канавы	1996	10,3	18,3
	1997	8,0	25,0
	1998	13,0	24,0
	Среднее	10,4	22,4
Двухрядные лесные полосы	1996	96,0	24,0
	1997	25,0	15,0
	1998	34,0	24,4
	Среднее	51,6	21,1

Ширина зоны влияния валов-канав в открытом поле на влагозапасы в метровом слое почвы в среднем за три года в опыте № 3 составила 10,4 м, дополнительное накопление влаги в среднем по зоне влияния составило 22,4 мм. В среднем по участку с системой двухрядных лесных полос и валов-канав дополнительное накопление влаги было 11 мм.

Полученные данные свидетельствуют, как важно при оценке условий для формирования стока и смыва почвы учитывать местные различия в снегоотложении и других показателях, связанные с линейными рубежами.

РАЗДЕЛ 6

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

6.1 Усовершенствование методов изучения последствий эрозии на поверхности породных отвалов и оценка ее среднемноголетней интенсивности

Большое внимание в последние годы в эрозионно-гидрологических, дефляционных и ландшафтных исследованиях ВНИАЛМИ, как и многих других научно-исследовательских учреждений, уделяется дистанционным методам и ГИС-технологиям [99, 168, 169, 170, 210].

Нами совместно с Воробьевым С.Г. [76] предлагается усовершенствовать способ учета выноса продуктов водной эрозии С.С. Соболева применительно к крутосклоновым землям, в частности к склонам терриконов, на которых он очень трудоемок. Для этого в данном способе ширину промоин измеряют с помощью программного комплекса „Google Earth”, а площадь сечения промоин вычисляется с использованием специального алгоритма.

При осуществлении предложенного способа, защищенного патентом на полезную модель № 36884 [150], на космических снимках отвала, полученных с помощью программного комплекса «Google Earth», выбирают учетные секторы на склонах каждой экспозиции. С помощью этого же программного комплекса в пределах секторов измеряют длину каждой промоины и ее ширину в трех-пяти местах, определяют среднюю площадь сечения и объем промоины. Путем деления суммарного объема промоин на площадь сектора определяют многолетний смыв породы с единицы площади. Путем усреднения данных на разных экспозициях определяют многолетний смыв с единицы площади всего террикона, умножая который на площадь поверхности отвала можно определить многолетний смыв со всего отвала. Путем его деления на длительность существования отвала определяют модуль смыва – годовой смыв породы с единицы площади поверхности отвала.

По модулю смыва, зная содержание в породе тяжелых металлов и других опасных веществ, можно оценить интенсивность их поступления в окружающую среду, а следовательно и экологическую опасность данного отвала.

Для проверки осуществления способа на снимке террикона шахты ”Княгининская” (г. Красный Луч) был избран участок размером 58 x 56 м и площадью 3248 м² с 10 промоинами (рис. 6.1, а). Измерена их длина и ширина.

Поперечное сечение промоин чаще всего имеет вид трапеции, площадь которой можно рассчитать по формуле: $F = (b_2 + b_1)h/2$, где b_1 – ширина нижнего основания трапеции; b_2 – ширина верхнего основания трапеции; h – средняя глубина промоины.

Проблемой дистанционного метода является невозможность определения по снимкам глубины промоин, поэтому была предпринята попытка ее определения косвенными методами. Для этого на плоском отвале шахты ”Княгининская” были измерены параметры одной из промоин выбранного

участка: ширина верхнего и нижнего основания, глубина. Результаты измерений параметров и расчета площади сечения промоины длиной 58 м представлены в табл. 6.1.

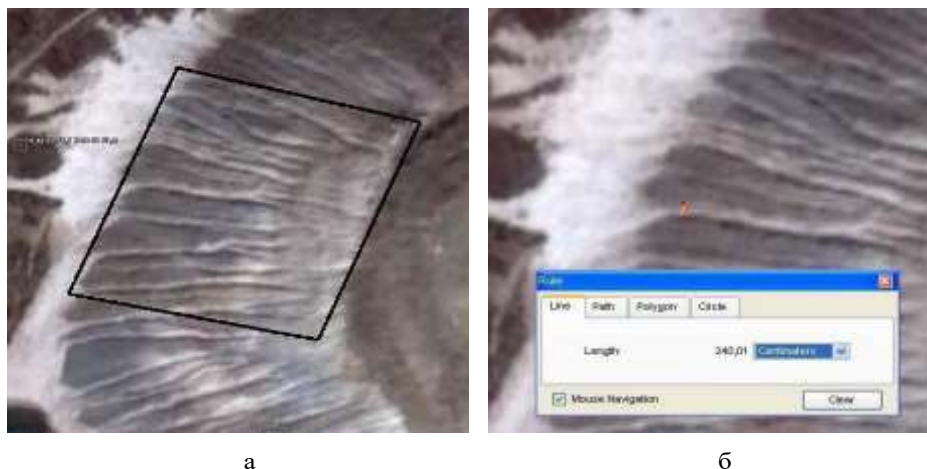


Рис. 6.1. Исследуемый отвал шахты „Княгининская”:
а – исследуемая площадка террикона; б – замер ширины промоины

Таблица 6.1

Измеренные и рассчитанные параметры промоины

Параметры сечения промоины	Номер сечения промоины от низа к верху склона									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ширина понизу b_1 , см	25	35	35	90	20	10	50	20	10	10
ширина поверху b_2 , см	250	350	350	370	130	70	120	40	20	20
глубина h , см	60	85	120	100	60	20	30	20	10	10
площадь сечения F_{ϕ} , м ²	0,83	1,64	2,31	2,3	0,45	0,08	0,26	0,06	0,015	0,015

На основании данных табл. 6.1 построен график зависимости площади сечения промоины от ее ширины (рис. 6.2).

Зависимость площади сечения промоины от ее ширины поверху, представленная на рис. 6.2, описывается уравнением: $F = 0,222 \cdot b_2^{1,69}$, (6.1) где b_2 – ширина промоины поверху, м.

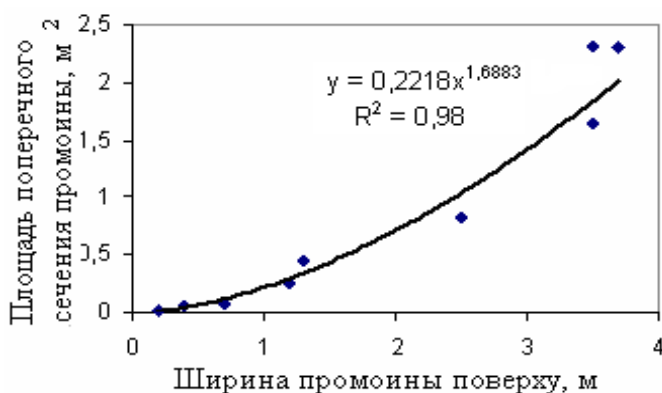


Рис. 6.2. График зависимости площади сечения промоины от ее ширины

Полученная эмпирическая формула позволяет определить площадь сечения промоины по ее ширине, измеренной на космическом снимке, однако необходимо оценить точность ее определения. Сравнение результатов измерений ширины промоины, выполненных по снимкам, с более точными измерениями, выполненными непосредственно на местности, представлено в табл. 6.2.

Оно показало, что в большинстве измерений абсолютная ошибка не превышала 10 см. Относительная ошибка не превышала 8,3% при ширине сечений поверху более 70 см и возрастала до 25-50% при ширине 40–20 см.

Таким образом, измерение ширины промоин по космическим снимкам обеспечивает вполне удовлетворительную точность ее определения.

Таблица 6.2

Оценка точности определения ширины промоин по космическим снимкам

Параметры сечения промоины	Номер сечения промоины от низа к верху склона									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
по результатам измерения на отвале										
ширина поверху b_2 , см	250	350	350	370	130	70	120	40	20	20
по измерениям на снимке										
ширина поверху b_2 , см	240	332	340	362	136	65	110	50	30	30
Ошибка измерения $\pm$ см%	$\frac{-10}{4}$	$\frac{-18}{5,1}$	$\frac{-10}{2,9}$	$\frac{-8}{2,2}$	$\frac{+6}{4,6}$	$\frac{-5}{7,1}$	$\frac{-10}{8,3}$	$\frac{+10}{25}$	$\frac{+10}{50}$	$\frac{+10}{50}$

Для уточнения полученного эмпирического уравнения аналогичные измерения были выполнены на ряде промоин отвала шахты «Матросская». При этом измерялась только ширина промоин поверху, а глубина измерялась несколько раз с шагом по ширине сечения в 10-20 см. Итоговые результаты измерений и вычислений параметров сечений представлены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Измеренные и рассчитанные параметры промоины

Параметры сечения промоины	Номер сечения промоины														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ширина поверху b_2 , см	120	140	140	145	145	110	290	134	90	60	50	85	40	70	55
Площадь F_f , м ²	0,546	0,76	0,765	0,639	0,908	0,655	2,11	0,31	0,186	0,09	0,116	0,25	0,061	0,125	0,106

На основе данных табл. 6.3 построен уточненный график зависимости площади сечения промоины от ее ширины (рис. 6.3).

Зависимость площади сечения промоины от ее ширины поверху, представленная на рис. 6.3, описывается уравнением:

$$F = 0,328 \cdot b_2^{1,9}, \quad (6.2)$$

где b_2 – ширина промоины поверху, м.

Полученная эмпирическая формула позволяет определить площадь сечения промоины по ее ширине, измеренной на космических снимках.

Для определения объема смытой за многолетний период породы с учетной площадки на склоне отвала шахты «Княгининская» с 10 промоинами по их ширине, измеренной дистанционным методом в 5 сечениях, были рассчитаны, используя эмпирическую формулу, площади этих сечений. Данные сведены в табл. 6.4.

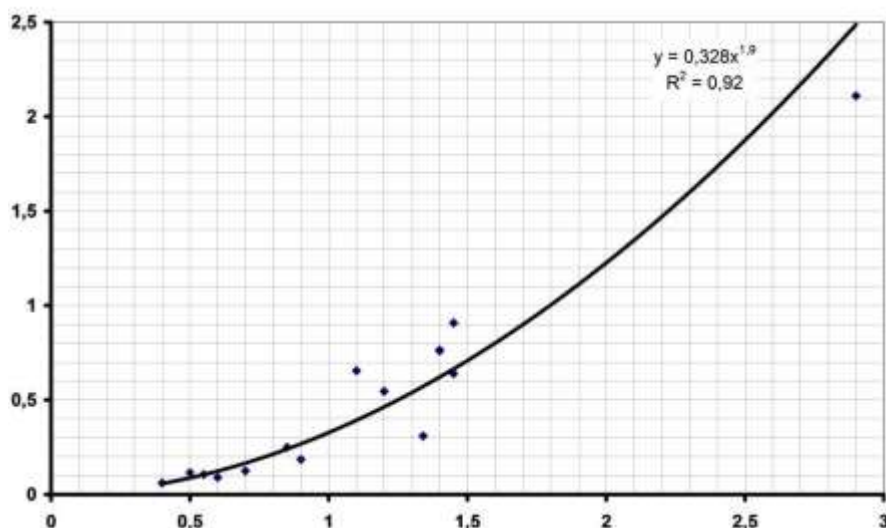


Рис. 6.3. График зависимости площади поперечного сечения промоины (м², ось ординат) от ее ширины поверху (м, ось абсцисс)

Таблица 6.4

Результаты вычислений площади сечений промоин по эмпирической формуле

№ промоины	Длина промоины l , м	Параметры сечения промоины: ширина b , см площадь сечения F , м ²	Номер сечения промоины от низа к верху склона (1-5)					Средние ширина $b_{ср}$, см и площадь $F_{ср}$, м ²
			1	2	3	4	5	
1	62	b	2,14	2,67	3,14	2,24	1,78	2,39
		F	0,80	1,17	1,53	0,87	0,59	0,97
2	63	b	1,49	1,75	1,60	1,84	1,75	1,68
		F	0,44	0,57	0,49	0,62	0,57	0,53
3	47	b	2,15	2,40	1,85	3,40	2,13	2,38
		F	0,81	0,97	0,63	1,75	0,80	0,96
4	45	b	2,15	2,30	2,56	1,14	1,12	1,85
		F	0,81	0,91	1,09	0,28	0,27	0,63
5	58	b	2,40	3,40	3,62	1,10	0,30	2,16
		F	0,97	1,75	1,95	0,26	0,03	0,82
6	50	b	1,88	1,69	2,04	1,50	0,35	1,49
		F	0,64	0,54	0,74	0,44	0,04	0,44
7	41	b	0,77	1,01	1,80	0,90	0,30	0,96
		F	0,14	0,23	0,60	0,19	0,03	0,21
8	42	b	0,80	1,05	1,74	0,85	0,35	0,95
		F	0,15	0,24	0,57	0,17	0,04	0,20
9	43	b	1,16	1,38	3,14	2,20	1,10	1,79
		F	0,29	0,38	1,53	0,84	0,26	0,59
10	50	b	1,50	2,01	2,27	3,11	1,20	2,02
		F	0,44	0,72	0,89	1,51	0,30	0,73

Суммарная площадь сечения промоин рассчитана по формуле:

$$F_{\Sigma} = F_1 + F_2 + \dots F_{10} = 6,07 \text{ м}^2,$$

где F_{1-10} – площадь сечения каждой из промоин.

Смыв породы с учетной площадки $V = 6,07 \text{ м}^2 \cdot 58 \text{ м} = 352,1 \text{ м}^3$.

Объемный модуль смыва (смыв с единицы площади S) рассчитан по формуле:

$$W = V/S = 352,1 \text{ м}^3/3248 \text{ м}^2 = 0,1083 \text{ м}^3/\text{м}^2 = 1083 \text{ м}^3/\text{га}.$$

С учетом объемной массы породы ($d = 1,29 \text{ т}/\text{м}^3$) массовый модуль смыва $M = W \cdot d = 1083,0 \text{ м}^3/\text{га} \cdot 1,29 \text{ т}/\text{м}^3 = 1397 \text{ т}/\text{га}.$

Таким образом, за все время существования отвала с каждого квадратного метра его поверхности смыто 139,7 кг породы или 10,8 см.

Предложенный способ позволяет без дополнительных наземных исследований определить смыв породы с отвала, что в свою очередь создает значительную экономию материальных средств и времени.

6.2 Разработка методики оценки защищенности территории агроландшафта лесными насаждениями по космическим фотоснимкам и получения картограмм ее состояния

При решении задачи оценки степени эрозионной опасности или деградированности почв в агроландшафте часто возникает проблема оценки реальной полевостойкой лесистости и наличия лесонасаждений различных видов, в том числе на дне балок и лощин, где потенциально возможна активная водная эрозия и образование оврагов.

По научно-технической и патентной литературе известны различные исследования и технические решения по оценке состояния территории агроландшафта на предмет деградации, эродированности с использованием данных аэрофотосъемки и космических снимков [168, 170, 210 и др.]. В современных условиях очень удобным является использование снимков, предоставляемых сервисом Google Earth.

Была выдвинута гипотеза о возможности диагностики состояния участка поверхности по ее цвету на космических снимках. Однако в ходе наших исследований выяснилось, что визуальная оценка цвета поверхности снимка для сравнения с эталоном недостаточно объективна, поскольку снимки характеризуются различной освещенностью. Так, например, участки, визуально оцениваемые как черные, впоследствии - после применения описанного ниже подхода оказывались участками с красной перегоревшей породой, сильно затененной растительностью, или водной поверхностью. Поэтому для решения выявленной проблемы было предложено анализировать *соотношение интенсивности* (яркости) трех главных цветов.

Известно, что любой цвет и оттенок можно разложить на три составляющих (аддитивных) цвета – красный (R), зеленый (G) и голубой (B) цветовой шкалы RGB [210], снимать которые можно с космических и аэрокосмических фотоснимков при помощи программы Adobe Photoshop.

Нами разработан метод распознавания различных участков поверхности (в том числе и лесонасаждений) и количественной оценки их доли в ландшафте. Этот метод был применен для решения задачи пригодности техногенно нарушенных земель, а именно терриконовых ландшафтов, к использованию в качестве элементов экосети и детально описан в монографии [76].

Аналогом способа, защищенного патентом, стал способ ВНИАЛМИ по оценке эродированности территории (патент № 2265839, Россия, МПК7 G01N33/24, G01V9/00, 2005. - Бюл. №34): способ определения состояния почвы, подверженной деградации, по содержанию гумуса, включающий аэрокосмическую съемку поверхности открытых участков почвы, преобразование полученного изображения, оценку фототона этих участков по 256-уровневой шкале серого цвета, выделение контуров по уровням шкалы серого цвета, вычисление площадей выделенных контуров, привязку обработанного изображения к почвенной карте и его трансформацию.

Прототипом нашего способа [149] стал способ, разработанный во ВНУ им. В. Даля Воробьевым С.Г.; способ оценки состояния почвы на территории, прилегающей к породным отвалам угольных шахт, включающий аэрокосмическую съемку территории с отвалом, преобразование полученного полицветного изображения в три монохромные изображения красного (R), зеленого (G) и синего (B) цветов, оценку фототона (яркости) участков по 256-уровневой цветовой шкале RGB, выделение контуров почвы, загрязненных продуктами водной эрозии поверхности террикона, осуществляемое путем сравнения фототонов участков изображения с фототонами эталонных участков с известным содержанием характерных опасных компонентов терриконовой породы, и вычисление площадей выделенных контуров (патент № 38586, Украина, МПК(2006) E21, C41/00, Бюл. №1, 12.01.2009).

Недостатком известного способа является то, что он основан на сравнении с эталоном осредненных фототонов достаточно больших участков территории, которые могут быть неоднородными по степени загрязнения, и поэтому точность их распознавания снижается. Кроме этого на точность сравнения влияет тот факт, что снимки и эталонные участки могут иметь различную освещенность, зависящую от времени года и времени суток, когда сделан космический снимок.

В основу полезной модели поставлено задание усовершенствования и повышения точности способа определения состояния поверхности террикона и почвы путем использования более объективных показателей фототонов, не зависящих от общей яркости снимка, путем снижения неоднородности сравниваемых с эталоном контуров и автоматизации процесса, которая приведет к повышению качества и точности информации о состоянии почв и уменьшения затрат труда, времени и материальных средств.

Поставленное задание достигается тем, что в способе определения состояния почвы, который включает аэрокосмическую съемку поверхности участков, преобразование полученного изображения в три монохромные изображения красного (R), зеленого (G) и синего (B) цветов, оценку фототона (яркости) участков по 256-уровневой цветовой шкале RGB, выделение контуров почвы, загрязненных продуктами водной эрозии поверхности террикона, осуществляемое путем сравнения фототонов различных участков (контуров) изображения с фототонами эталонных участков с известным содержанием характерных опасных компонентов терриконовой породы и

вычисление площадей этих контуров, согласно полезной модели: дополнительно выполняют нормирование фототонов путем деления на их среднее арифметическое значение Y_{RGB} с получением коэффициентов отношения k_R , k_G и k_B , а сравнение коэффициентов выполняют с коэффициентами фототонов эталонных участков, причем сравнение осуществляется для каждого отдельного пикселя автоматизированно с использованием алгоритма, основанного на использовании новой последовательности известных программных продуктов, который включает:

- преобразование монохромных изображений красного, зеленого и синего цветов в двумерные цифровые матрицы, каждый элемент которых равен фототону одного из трех цветов соответствующего пикселя исходного изображения;
- расчет по цифровым матрицам матриц коэффициентов k_R , k_G и k_B ;
- сравнение каждого элемента матриц коэффициентов k_R , k_G и k_B с предельными значениями интервалов варьирования коэффициентов k_R , k_G и k_B фототонов эталонных участков;
- присвоение по результатам сравнения элементам матриц коэффициентов одного из баллов шкалы признаков состояния почвы или породы;
- присвоение каждому баллу определенной расцветки или штриховки;
- визуализацию матрицы баллов, в результате чего исходное полицветное изображение поверхности отвала и прилегающих загрязненных почв превращается в картограмму, на которой одинаковые по баллу, а значит и признаку пиксели исходного изображения имеют одинаковую расцветку или штриховку;
- суммирование количества пикселей каждого контура с одинаковым значением признака с последующим преобразованием суммы пикселей в площадь контура и занесением результатов в таблицу площадей.

Для осуществления предложенного способа разработан специальный алгоритм, в котором, как и в прототипе, получение космических снимков территории осуществляется с помощью программного сервера Google Earth, преобразование полученного изображения в три монохромные осуществляется с помощью программы Adobe Photoshop, но, в отличие от прототипа, в дальнейшем происходит преобразование монохромных изображений в цифровые матрицы с использованием программы TNT Lite, которые визуализируются в виде таблицы Excel, и с которыми, используя аппарат Excel, выполняются математические действия в виде вычисления суммы матриц, вычисления матрицы среднеарифметических значений Y_{RGB} , на которую делятся матрицы фототонов и получаются матрицы коэффициентов k_R , k_G и k_B . Далее, используя аппарат Excel производится сравнение полученных коэффициентов с эталонными значениями и, путем решения системы неравенств, получают матрицу баллов, соответствующих тем или иным интервалам значения количественного признака или тем или иным качественным признакам. Далее ячейки таблицы автоматически окрашиваются в принятые цвета для каждого значения балла, и таблица распечатывается или

визуализируется на экране в виде картограммы, на которой ячейки с одинаковым значением признака сливаются в единый контур, а площадь одинаковых контуров определяется путем суммирования количества ячеек с одинаковым баллом.

Примером конкретного использования способа является его применение для одного из отвалов Донбасса. Предварительно были проведены исследования космических снимков ряда различных терриконов с помощью программы Фотошоп. Путем наведения точечного курсора на определенные точки изображения определялась яркость (фототона) каждого из трех составляющих цветов изображения, а затем рассчитывались коэффициенты фототонов.

Исследования, проведенные для 246 пунктов на 82-х таких характерных участках, как участки с растительным покровом зеленого цвета различных оттенков, участки с различными оттенками красноватого, желтого, бурого цветов, характерных для перегоревшей породы и участки с оттенками серого цвета, свойственного неперегоревшей породе на поверхности отвалов и прилегающей к ним территории, были установлены интервалы варирования коэффициентов их фототонов.

Анализ интервалов варьирования коэффициентов яркости фототонов различных участков позволил установить условия их идентификации: участки с перегоревшей породой различных оттенков красного и желтого цвета распознаются двумя условиями: $k_R \geq 1,05$, $k_B < 0,97$; участки с неперегоревшей породой различных оттенков серого цвета - тремя условиями: $k_R < 1,1$, $k_G < 1,03$, $k_B \geq 0,97$; участки с различными видами растительности - одним условием: $k_G \geq 1,03$.

Более простой системой идентификации является следующая: участки перегоревшей породы: $k_R \geq 1,07$; неперегоревшей: $k_R < 1,07$; $k_G < 1,03$; участки с растительностью: $k_G \geq 1,03$.

Эти условия, занесенные в алгоритм, позволили преобразовать исходное изображение (рис. 6.4, слева) в картограмму (справа) и рассчитать относительные площади участков различного состояния породы: защищенной растительностью, а для незащищенной части различить потенциально опасные и неопасные на возгорание участки (рис. 6.5).

Разработанный алгоритм позволяет более точно определить участки, поскольку визуально на космических снимках они не всегда точно распознаются, кроме того позволяет определить относительную площадь участков. Он позволяет без дополнительных наземных исследований определить деградацию почвы на прилегающей к терриконам территории, что, в свою очередь, создает значительную экономию материальных средств и времени.

С целью проверки возможности оценки необходимости мероприятий по привязке отвалов к местной сети экокореидоров разработанный алгоритм был применен к изображению территории с несколькими отвалами и разветвленной балочной сетью. Была выполнена проверка возможности распознавания балочной сети, которая визуально отличается от окружающего зеленоватого фона более насыщенным зеленым цветом. Используя ранее описанный подход,

были сняты показатели яркости цветов R, G и B в 30 точках сети коридоров, 30 точках на окружающей территории и в 15 точках на имеющихся терриконах, выделяющихся на территории красноватым оттенком.

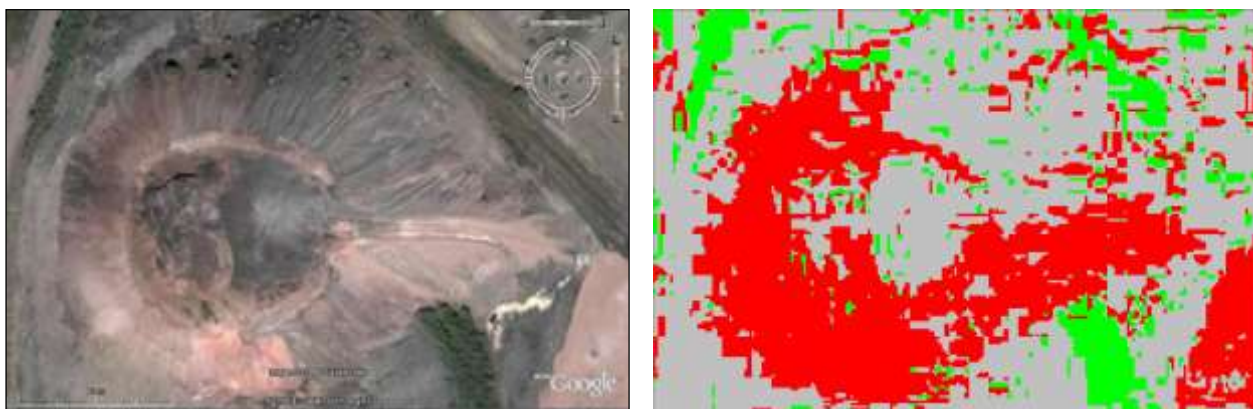


Рис. 6.4. Исходное и преобразованное изображения террикона

	A	C	D
1		количество	площадь, %
2	Сумма ячеек окрашенных в зеленый цвет (древесная растительность)	3999	16,53%
3	Сумма ячеек окрашенных в красный цвет (перегоревшая порода)	17951	74,20%
4	Сумма ячеек окрашенных в серый цвет (неперегоревшая порода)	2242	9,27%
5	Сумма ячеек всех цветов	24192	100,00%

Рис. 6.5. Вид итоговой таблицы соотношения площадей характерных диагностических участков

В результате были установлены диагностические признаки распознавания экологических коридоров в виде балочной сети и ядер (лесных массивов и перегоревших терриконов, пригодных к облесению) на фоне окружающей территории, покрытой преимущественно менее развитым растительным покровом выгонов и пашни, землями населенных пунктов. Как было установлено, терриконы на 97% и коридоры на 100% распознаются на окружающем фоне по нижеследующему сочетанию диагностических признаков:

экологические коридоры: $1,074 \geq k_R \geq 0,92$; $k_G \geq 1,15$; $Y_{RGB} < 68$;

терриконы: $k_R \geq 1$; $k_G < 1,03$; $k_B \geq 0,97$; $Y_{RGB} \geq 95$.

Таким образом, доказано, что в результате применения вышеописанного алгоритма по найденным диагностическим признакам на космических снимках можно распознать экоккоридоры и терриконы. Важно отметить, что они *оцифрованы*. Это позволяет с помощью математических действий определить удаленность отвалов от экологических коридоров, что является одним из критериев оценки пригодности отвалов к использованию в составе региональных и местных экологических сетей.

РАЗДЕЛ 7

НЕКОТОРЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ХОДЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

7.1 Ливневые осадки и поверхностный сток. Особенности проявления эрозии при осадках различной обеспеченности

За время наших исследований талый сток на всех экспериментальных водосборах в СХП «Ударник» и «Металлист» или на их части формировался в 1984-1986, 1989, 1991, 1994, 1996-1999, 2003, 2004, 2006, 2007, 2009, 2010 и 2013 гг. Ливневый сток имел место в 1987, дважды в 1989, в 1992, 1996, 1998, 2006 гг.

Особенностью дождевых осадков является то, что сток воды формируется лишь при определенной их интенсивности, которая позволяет квалифицировать дождь как ливень ($\geq 0,5$ мм/мин), и при слое осадков не менее 15-25 мм, необходимом для заполнения емкостей нанорельефа почвы и ее увлажнения [70]. Поэтому, несмотря на большое ежегодное количество жидких осадков, сток формируется не каждый год и не всегда сопровождается смывом. Наибольшие потери почвы бывают при осадках малой обеспеченности (вероятности превышения).

Чрезвычайные ливневые осадки на территории Луганской обл. отмечались в 1992 г. В ходе экспедиции, организованной Институтом охраны почв УААН, руководимой Зубовым А.Р., при участии к.с.-х.н. Тарасова В.И. были обследованы 28 полей в 13 хозяйствах четырех районов южной части области с суточными осадками от 35 до 141 мм (вероятность превышения от 35 до 0,7%).

Выбор хозяйств и полей осуществлялся на основании общения с главными специалистами районных управлений сельского хозяйства и предоставленной ими информации о количестве осадков в каждом из хозяйств районов.

По этим данным в период с 23 по 26 мая в ряде хозяйств юго-западной части области за 3-4 суток выпало до 200 мм осадков, а местами и больше. Максимальное количество осадков за сутки достигло 141 мм, что соответствует крайне малой обеспеченности, которая для всей северной степи не превышает 1%.

Участниками экспедиции измерялись местные потери почвы на разном расстоянии от естественных и искусственных водоразделов (по методу водороев) и общие (по объему наносов перед лесополосами и в кюветах дорог). Выявленные факты визуально заметных эрозионных процессов обобщены в табл. 7.1.

Анализ места и вида эрозионных процессов в зависимости от суммы осадков свидетельствует, что наиболее уязвимым местом на полях были тальвеги ложбин. На межложбинной части склонов, даже на посевах пропашных культур, смыв был замечен только при наиболее сильных осадках (196-207 мм). Исключением является мелкоструйчатый смыв почвы до $108 \text{ м}^3/\text{га}$ в СХП "Самсоновский" Краснодонского района при суточных осадках 40 мм, происшедший при крайне неблагоприятном сочетании факторов (послепосевное боронование подсолнечника вдоль склона крутизной 4° и длиной 850 м). Потери

почвы на пропашных при осадках 196-207 мм поражают размером – до 295 т/га при послевсходовом бороновании вдоль склона длиной 300 м и крутизной 3,5°.

Таблица 7.1

Эрозионные проявления при разном количестве ливневых осадков

Слой осадков, мм за период (числитель) и сутки (знаменатель)	Вероятность превышения суточных осадков, %	Вид эрозии	Агрофон	Кол-во обследованных полей	Осредненные наибольшие потери почвы, м ³ /га
$\frac{\geq 60}{> 35}$	< 54	Линейная в ложбинах	Пропашные	11	37,0
$\frac{\geq 155}{> 70}$	< 7	Тот же	Озимые	3	10,7
$\frac{196-207}{115-141}$	< 1	Склоновая (струйчатая)	Пропашные	12	75,0
			Озимые	2	15,6

Пространственные закономерности варьирования размера мелкоструйчатой эрозии на пропашных при осадках 196-207 мм характеризует математическая модель ($r = 0,98$) локальных (местных) потерь почвы, м³/га:

$$V = 1,47i_n^{1,18}L^{0,75}K_o, \quad (7.1)$$

где i_n – крутизна склона в месте учета потерь почвы, град; L – длина склона от водораздела или стокорегулирующего рубежа до места учета потерь почвы, м; K_o – коэффициент влияния направления послепосевого боронования, равный при бороновании вдоль склона 1,00, а поперек склона - 0,23.

Анализ данных, отобранных по принципу единственного различия, показал, что на площади с озимой пшеницей, которая в период ливней имела уже высокое проективное покрытие, смыв был в 5,5 раз меньшим, чем на всходах подсолнечника (при севе и бороновании вдоль склона крутизной 2,0-2,5° и длиной 100 м). Роль поперечного направления сева на полях озимой пшеницы проявилась в снижении потерь почвы с 15,6 до 8,3 м³/га, роль послевсходового боронования на полях пропашных культур – в уменьшении смыва в 2,4-4 раза.

При **талом стоке** роль длины и крутизны склона характеризует модель потерь почвы, полученная по данным 1996 г. на контрольном варианте 4 опыта № 3 с посевом озимой пшеницы вдоль склона длиной 590 м. Крутизна склона - от 1,5° в верхней части до 4,3° в нижней. Вариант защищен от притока сверху лесной полосой с валом и траншеей. На аналогичном по размеру и крутизне варианте 1 с контурно-параллельными валами-канавами тоже была озимая пшеница, но посеянная соответственно их направлению, т. е. поперек склона. Смыв почвы имел место на обоих вариантах. Но если на варианте 1 с контурно-параллельной организацией территории он происходил только в ложбинах, то на контрольном развита была и мелкоструйчатая эрозия вне ложбин - вдоль бороздок между рядками растений. Визуально заметные промоинки начали появляться на расстоянии 90 м от вала, а в нижней части склона потери почвы достигли 44,3 м³/га. В среднем они равнялись 24,6 м³/га. Связь потерь почвы V (м³/га) с длиной склона L (м) в упрощенном виде выражается уравнением: $V = 0,00143L^{1,64}$ ($R = 0,79$).

Необычно высокое значение показателя степени при L , равное 1,64, связано с тем, что эта зависимость в скрытой форме отражает и роль крутизны склона, поскольку та тесно коррелирует с его длиной ($R = 0,85$). Корреляция ослабляется в интервале расстояния $L = 260-480$ м, где уклон варьирует от 0,040 до 0,062 (2,3-3,7°). Для этого отрезка склона была получена двухфакторная модель ($r = 0,85$):

$$V = 59,5 i_n^{0,98} L^{0,38} \quad (7.2)$$

7.2 Математические модели потерь почвы на ложбинном водосборе при талом и ливневом стоке (рельефный блок)

С помощью разработанных нами алгоритма и компьютерной программы "Ложбина" выполнены расчеты и составлены электронные таблицы для опытного участка № 1 с системой стокорегулирующих лесных полос без гидротехники и опытного участка № 4 с разными вариантами гидросооружений, куда занесены свыше 10 показателей (рис. 7.1), характеризующих рельеф водосбора каждой ложбины в точках, расположенных на ее тальвеге соответственно через 50 и 10 м его длины.

Это L - длина линии стока – расстояние от водораздела или линейного рубежа, разделяющего водосбор ложбины на изолированные части (для опыта № 4 такими рубежами являются вал-траншея по нижней опушке лесной полосы или валы-террасы; для водосбора № 1 – некоторые из лесных полос); $L_{рб}$ - расстояние от тормозящего рубежа, т. е. от гидросооружения, которое не было способно существенным образом повлиять на размер стока, а только подпирало его во

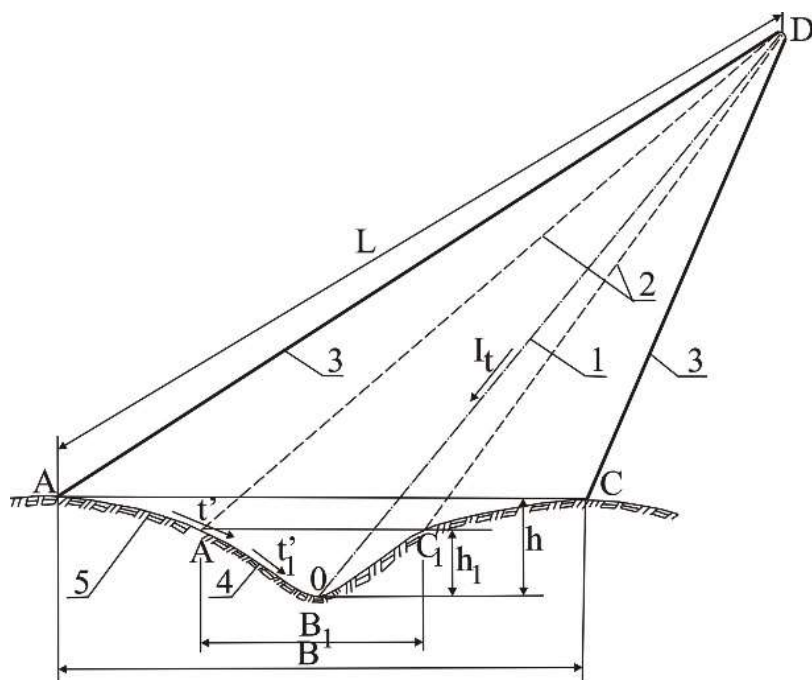


Рис. 7.1. Элементы и параметры поперечного сечения ложбины и ее водосбора в плане: 1 – тальвег, 2 – бровки ложбины, 3 – боковые границы ее водосбора (водоразделы), 4 – склоны ложбины, 5 – склоны ее водосбора

временных прудках; f_1 - площадь ложбины (части ложбинного водосбора, расположенной между ее бровками (2); f - площадь всего водосбора ложбины между боковыми его водоразделами (3), расположенного выше данного ее поперечного сечения; B_1 и B – средневзвешенные по длине ложбины ее ширина и ширина ее водосбора; t_1 и t – соответственно наклон склонов ложбины и ее водосбора в целом в направлении к тальвегу (вторичный наклон), средневзвешенный по длине и ширине ложбины и ее водосбора;

t'_1 и t' – локальный вторичный наклон склонов ложбины и ее водосбора;
 I'_t и I_t – соответственно локальная и средневзвешенная крутизна тальвега ложбины между водоразделом и данным створом; h_1 и h – средневзвешенная глубина ложбины и ее водосбора (рис. 7.1).

При прохождении стока на опыте № 4 контурные валы-канавы и валы-террасы расчленили водосбор на изолированные части, в пределах которых отсчет площади и длины разгона начинался от вышерасположенного сооружения. Контурно-параллельные валы-канавы, в сущности, работали как распылители стока, которые гасят энергию потока, но не уменьшают площадь водосбора для нижерасположенного створа. Поэтому отсчет площади выполнялся от лесной полосы, только длина разгона измерялась от вышерасположенного сооружения.

Обработка данных по эрозии в 1986, 1987, 1989, 1994, 1996, 1997 и 1998 гг. с помощью программы «Фактор» позволила получить математико-статистические модели *текущей площади* поперечного сечения промоин в ложбинах (площади сечения в заданной точке тальвега). Иначе этот показатель можно интерпретировать как *локальные потери почвы* с единицы длины тальвега ложбины ($\text{м}^3/\text{м}$). Главными факторами потерь почвы оказались площадь водосбора ложбины f , наклон ее тальвега I_t (град) и вторичный наклон его склонов к тальвегу t (град), длина разгона потока $L_{\text{рб}}$.

В общем виде для талого и ливневого смыва модель имеет вид:

$$V = (A_1 f^m)(A_2 I_t^n)(A_3 t^p)(A_4 L_{\text{рб}}^r) \quad (7.3)$$

Величина коэффициентов A_{1-4} и показателей степени m, n, p, r представлена в табл. 7.2. Согласно методу Брандона, лежащего в основе алгоритма программы «Фактор», только первый множитель модели выражает зависимость локальных потерь почвы (от площади водосбора ложбины) в натуральных единицах (м^2 или $\text{м}^3/\text{м}$), остальные имеют характер коэффициентов без размерности.

Рассматривались два подхода в определении площади водосбора. Первый – традиционный не учитывает направление обработки поля и состоит в построении перпендикуляров от точки пересечения замыкающего створа и линии тальвега к ближайшей горизонтали, от нее – к следующей и т. д. Но более весомой оказалась площадь водосбора, которая определяется как прямоугольник или трапеция между двумя створами, ограничивающими водосбор сверху и снизу, и линиями, которые ограничивают зону, в который горизонтали начинают отклоняться от направления обработки почвы (при обработке строго по основному направлению горизонталей последняя пара линий ни что иное, как боковые водоразделы водосбора ложбины).

Коэффициент A_1 в уравнении (7.3) выполняет двойную роль – служит коэффициентом размерности и одновременно обобщает метеорологические, почвенные и другие факторы. Поэтому, как видим в табл. 7.2, он так сильно варьирует по годам. Коэффициенты A_2, A_3, A_4 по своей сути являются только коэффициентами размерности, поэтому, как можно видеть в табл. 7.2, они варьируют по годам значительно меньше. Но поскольку их варьирование все же имеет место, можно предположить, что от прочих факторов они тоже зависят. Варьируют по годам и показатели степени.

Поэтому, чтобы построить универсальную модель, которая учитывала бы влияние всех факторов помимо топографических, надо изучить их влияние на коэффициенты и показатели степени уравнения (7.3). Наиболее простым путем является поиск эмпирической зависимости от этих факторов коэффициента A , равного произведению коэффициентов A_{1-4} и представленного в табл. 7.2.

При введении коэффициента A уравнение (7.1) приобретает вид:

$$V = Af^m I_t^n t^p L_{p6}^r, \text{ где } A = A_1 A_2 A_3 A_4 \quad (7.4)$$

Таблица 7.2

**Параметры математических моделей текущих потерь почвы
на ложбинных водосборах опытного участка № 4**

Год	A	Аргументы функций-множителей							
		F		I _t		t		L _{p6}	
		A ₁	m	A ₂	n	A ₃	p	A ₄	r
При талом стоке									
1986	0,0034	0,019	0,57	0,25	1,33	0,91	0,30	0,78	0,070
1994	0,0029	0,050	0,57	0,21	1,32	0,57	0,64	0,48	0,200
1997	0,0012	0,008	0,37	0,22	1,50	0,91	0,43	0,79	0,060
1998	0,0032	0,008	0,30	0,50	0,50	0,99	0,21	0,80	0,060
В среднем	0,0038	0,021	0,54	0,30	1,13	0,88	0,38	0,69	0,100
При ливневом стоке									
1987	0,0048	0,034	0,55	0,31	1,17	0,76	0,49	0,60	0,110
1989 ₁	0,0108	0,073	0,73	0,20	1,61	0,95	0,45	0,78	0,060
1989 ₂	0,0077	0,081	0,87	0,21	1,45	0,87	0,40	0,52	0,160
1996	0,0210	0,035	0,43	0,63	0,46	0,99	0,12	0,96	0,010
1998	0,0025	0,045	0,74	0,11	2,10	0,88	0,31	0,59	0,120
В среднем	0,0098	0,054	0,73	0,29	1,24	0,91	0,36	0,68	0,090
При обоих видах стока									
В среднем	0,0700	0,039	0,68	0,29	1,20	0,90	0,37	0,68	0,095

Примечание: в 1989 г. ливневый сток был дважды: 1989₁ и 1989₂.

Для периодов талого стока осредненная модель текущих потерь почвы с единицы длины тальвега ложбины имеет вид:

$$V_T = 0,021f^{0,54} \cdot 0,30I_t^{1,13} \cdot 0,88t^{0,38} \cdot 0,69L_{p6}^{0,095} = A_T f^{0,54} I_t^{1,13} t^{0,38} L_{p6}^{0,095} \quad (7.5)$$

Для периодов ливневого стока:

$$V_L = 0,054f^{0,73} \cdot 0,29I_t^{1,24} \cdot 0,91t^{0,36} \cdot 0,68L_{p6}^{0,09} = A_L f^{0,73} I_t^{1,24} t^{0,36} L_{p6}^{0,09}. \quad (7.6)$$

Интервалы варьирования факторов для условий опытного участка следующие: $f = 0,05-3,0$ га; $I_t = 1,9-3,5^\circ$; $t = 0,4-2,4^\circ$; $L_{p6} = 10-300$ м.

На рис. 7.2, 7.3 представлены графики функций. Графики функций от факторов I_t , t , L_{p6} не имеют размерностей, так как они выражают роль этих факторов в виде коэффициентов, равных 1 при некотором значении, которое находится в пределах интервалов варьирования этих факторов.

В отличие от факторов I_t , t , L_{p6} , функция от площади водосбора ложбины f (см. рис. 7.2) имеет размерность $\text{м}^3/\text{пог. м}$ и характеризует текущие потери почвы при единичных значениях других функций в зависимости не только от площади водосбора ложбины, но и от гидроклиматических условий стока, состояния почвы, агрофона и др.

Как видим, для условий талого и ливневого стока графики зависимостей от факторов I_t , t , $L_{рб}$ довольно близки друг другу. Это говорит об универсальности этих зависимостей и позволяет объединить парные модели.

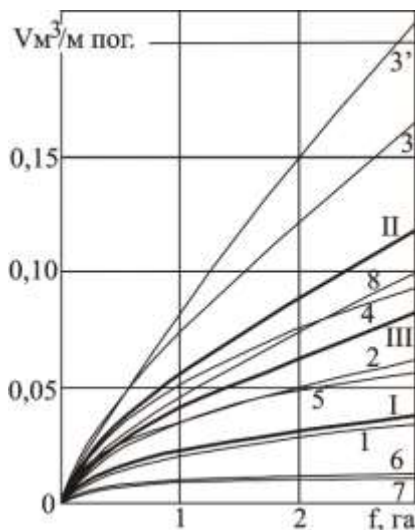


Рис. 7.2. Связь потерь почвы V с тальвега ложбин на опыте № 4 с площадью их водосбора f : при талом стоке в 1986 г. (1), 1994 г. (4), 1997 г. (6), 1998 г. (7); при ливнях в 1987 г. (2), 1989 г. (3 и 3'), 1996 г. (5), 1998 г. (8); в среднем при талом (I), ливневом (II) стоке; при обоих видах стока (III)

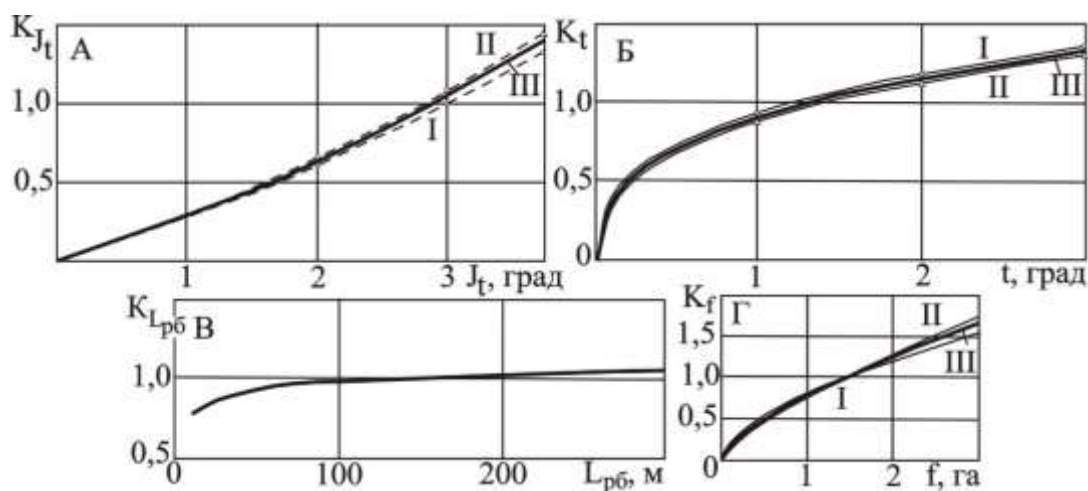


Рис. 7.3. Связь потерь почвы с тальвега ложбин в коэффициентном виде с его средней крутизной I_t , вторичным уклоном t , длиной разгона потока $L_{рб}$, площадью f их водосбора при талом (I), ливневом (II), обоих видах стока (III)

Расчеты были выполнены и для научно-производственного опыта № 1. Здесь есть 12 разветвленных ложбин длиной до 3,6 км с площадью водосбора $f = 0,9 \dots 87,0$ га, крутизной тальвега $I_t = 1,0 \dots 2,5^\circ$, вторичным уклоном $t = 0 \dots 1,4^\circ$.

Более чем в 400 точках через каждые 50 м, а возле лесных полос чаще после талого стока в 1994, 1996 и 1998 гг. выполнялись детальные измерения поперечного сечения промоин в ложбинах, рассчитывалась его площадь. Эти данные осреднялись по участкам ложбин, расположенных между соседними лесными полосами, поэтому фактор $L_{рб}$ не учитывался. Параметры моделей площади поперечного сечения промоин или потерь почвы с единицы длины ложбин и множественное корреляционное отношение приведены в табл. 7.3.

**Параметры математических моделей текущих потерь почвы
при талом стоке в ложбинах на водосборе № 1**

Год	A	Аргументы функций-множителей						R
		f		l _t		t		
		A ₁	m	A ₂	n	A ₃	p	
1994	0,0388	0,0470	0,46	0,710	0,73	1,16	0,30	0,80
1996	0,0067	0,0095	0,62	0,448	1,32	1,58	0,95	0,86
1998	0,0035	0,0050	0,70	0,467	1,43	1,49	0,61	0,93
Среднее	0,0163	0,0154	0,59	0,510	1,16	1,42	0,65	

Как видим, функции влияния площади водосбора, крутизны тальвега на потери почвы при талом стоке на двух очень различающихся водосборах довольно близки по значению показателей степени m (0,54 и 0,59) и n (1,13 и 1,16).

Этот факт еще раз подтверждает универсальность этих зависимостей в многолетнем аспекте. Более отличающимися оказались показатели p функции фактора t за счет большого значения p в 1996 г.

Анализируя роль фактора t , можно предположить, что она связана с его влиянием на размер стока. Эта мысль базируется на различии слоев стока на двух стоковых площадках (9 и 14,6 мм), различающихся величиной показателя t (0,02 и 0,03). Различия роли этого фактора на опытах № 1 и 4 ($p = 0,65$ и $0,38$ соответственно) связаны, возможно, с тем, что водосборы ложбин на опыте № 1 более широкие и пологие в поперечном направлении, поэтому величина вторичного уклона больше влияет на поступление стока с периферийных частей водосбора ложбин.

7.3 Комплексное влияние зимних осадков и температурного режима воздуха на формирование предпосылок, определяющих величину склонового и речного стока в период весеннего снеготаяния

Характерной фазой гидрологического режима равнинных рек степной зоны является весеннее половодье - наиболее многоводная фаза. Вызванные им разливы рек нередко достигают характера стихийного бедствия, наносящего большой ущерб жилому фонду населенных пунктов, хозяйственным объектам.

Наибольшими потрясениями XX века, связанными с водной стихией для десятков тысяч жителей Луганской области стали разливы реки Лугань в 1903, 1917, 1963, 1985 гг., приведшие к массовому затоплению их домов и усадеб, описанные в монографии [68]. Колоссальный ущерб был нанесен наводнением 1985 года флагману тепловозостроения СССР – Луганскому заводу им. Октябрьской революции. Этот же год охарактеризовался и значительными потерями почвы с зяби, но почти отсутствовал на многолетних травах (опыт №4).

Поэтому задача долгосрочного прогнозирования возможных последствий многоснежных зим является очень актуальной как для Луганска, так и для многих других городов и населенных пунктов. Актуальна она и с точки зрения прогнозирования поверхностного стока и потерь почвы от эрозии.

Как известно, основа долгосрочных прогнозов объема весеннего половодья — уравнение водного баланса. Главными его элементами являются:

а) запасы воды в снежном покрове к началу весеннего таяния, осадки за период таяния, потери влаги на испарение;

б) потери стока вследствие поверхностного задержания и инфильтрации в почву, которая зависит от глубины промерзания почвы и ее влажности.

В связи с этим роль снежного покрова, как уже отмечалось, имеет двоякий характер: с одной стороны, с ним напрямую связан потенциально возможный сток; с другой — он защищает почву от промерзания и тем снижает сток.

Роль температурного режима воздуха тоже неоднозначна - с одной стороны, от него зависит сохранность снежного покрова, с другой — тающий при оттепелях снег повышает влажность почвы. Учесть все эти взаимосвязи путем детерминированного математического моделирования сложно, поэтому в практике гидрологического прогнозирования прибегают к разработке региональных методик прогнозирования на основе ретроспективного сопоставления показателей весеннего стока с условиями его формирования за длительный период предшествующих наблюдений. К таковым условиям и относятся, в первую очередь, влагозапас в снеге, глубина промерзания почвы и ее влагозапас. Необходимость разработки такой методики для рек Луганска обусловили такие цель и задачи наших исследований:

- 1) изучить динамику промерзания почв за многолетний период;
- 3) оценить роль снежного покрова в промерзании почв;
- 3) найти альтернативный способ оценивания влагозапаса в почве.

Последняя задача была обусловлена тем, что в практике разработки методики долгосрочного прогноза весеннего половодья принято оценивать увлажненность почвы по величине модуля речного стока с сентября по январь [20, 48, 106]. Поскольку получение таких данных требует гидрометрических наблюдений, была сделана проверка возможности оценки вероятного увлажнения почвы по количеству осадков за холодное время года и температурному режиму этого периода.

Методология исследований. Для получения необходимой информации были использованы фондовые материалы Луганского ЦГМ за 1959-2010 годы. Их анализ выполнен при участии А.А.Чепурного и Д.И.Дементьева [67, 68].

Исследование возможности косвенной оценки весеннего влагозапаса почвы как фактора размера стока весеннего половодья

Казалось бы, зимние осадки не должны влиять на влагозапасы в почве к началу весеннего снеготаяния, поскольку имеют вид снега. Однако для региона исследований характерны оттепели, которые приводят к неоднократному сходу снежного покрова. Можно предположить, что если не возникает поверхностный сток (а зимой он редкость), то снеговая влага уходит в почву, а влагозапас ее повышается на величину, пропорциональную слою выпавших осадков.

Была подсчитана сумма осадков за все дни с ними до конца последней оттепели за холодное время каждого года с 1957 по 1999 гг.

На рис. 7.4 представлены характеристики изменчивости высоты снежного покрова к началу весеннего таяния - дифференциальный закон распределения и кривая обеспеченности.

Повышенный снежный покров способствует увеличению весеннего стока, но как он зависит от суммы осадков, если зимой часты оттепели, и поэтому он неустойчив? Для ответа была проверена взаимосвязь высоты снега перед заключительным таянием и суммы осадков за холодное время года (рис. 7.5).

Коэффициент корреляции $R=0,49$ свидетельствует о почти хорошей связи. Таким образом, в многоснежные зимы вероятность большого стока увеличивается как по причине более высокой влажности почвы, связанной с оттепелями, так и в результате увеличения влагозапасов снега, несмотря на оттепели. Но как связаны промерзание почвы и высота снега перед началом его таяния и стокообразования? Ответ на этот вопрос дает график на рис. 7.5.

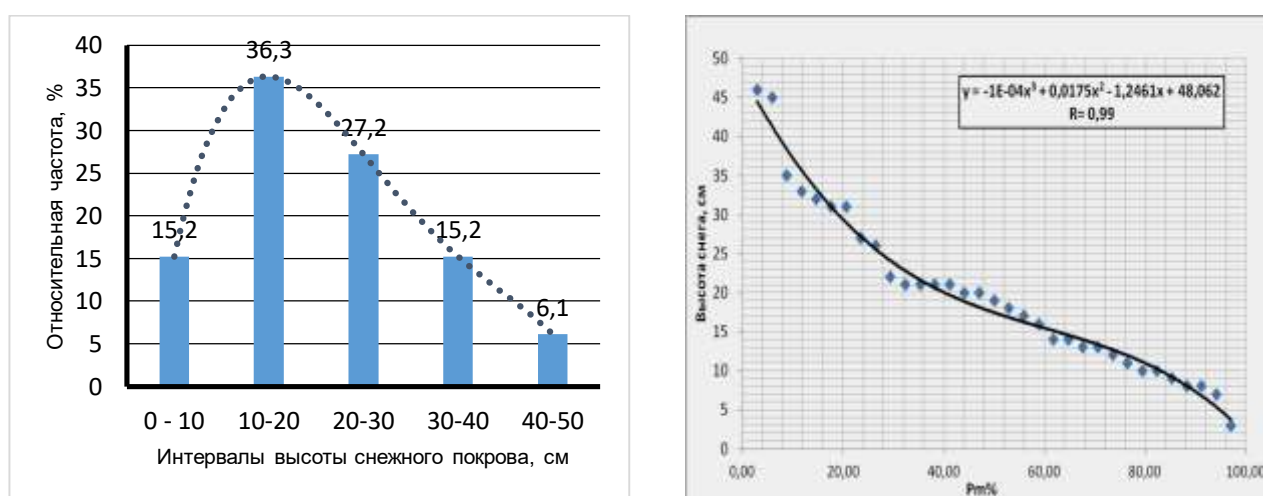


Рис. 7.4. Дифференциальный закон распределения высоты снежного покрова и кривая обеспеченности высоты снежного покрова

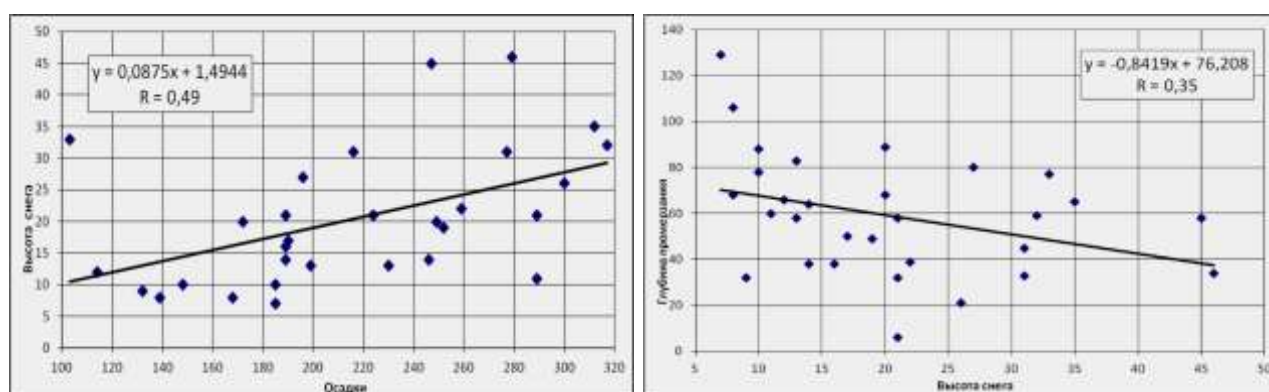
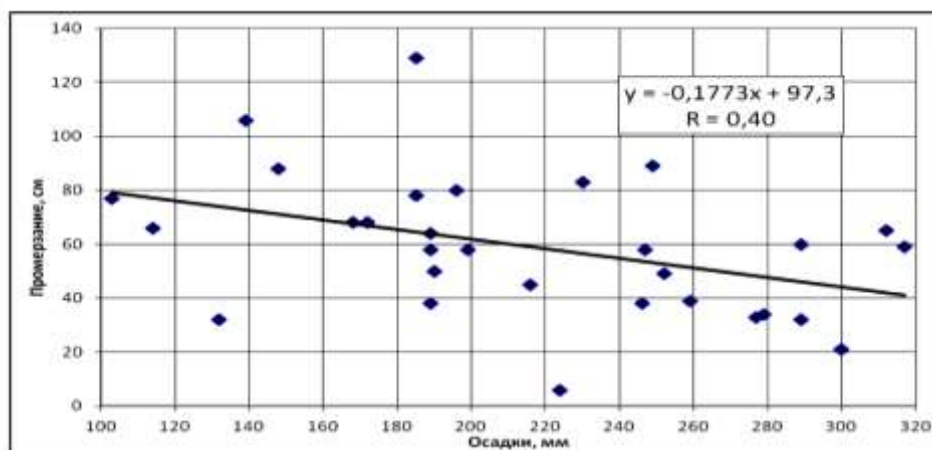


Рис. 7.5. Зависимость высоты снега перед таянием от суммы осадков (слева) и глубины промерзания почвы от высоты снега (справа)

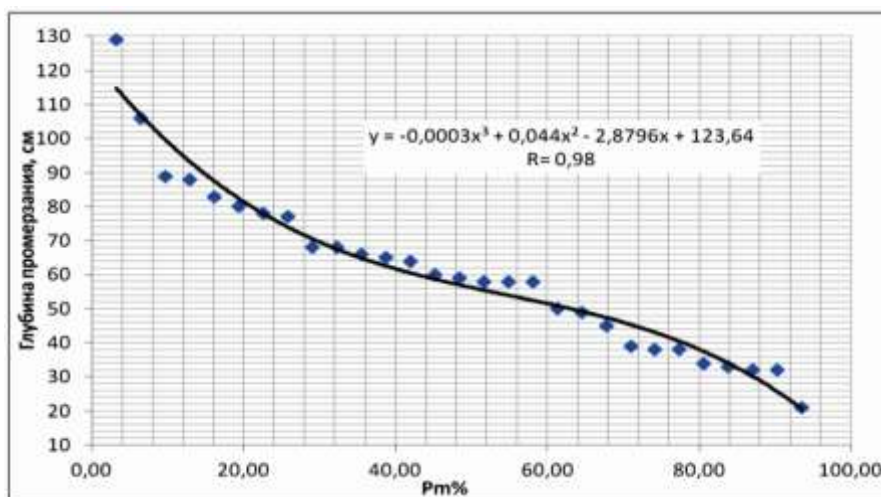
Как видим, с увеличением итоговой высоты снега глубина промерзания уменьшается в обратной линейной зависимости с коэффициентом корреляции $R=0,35$, т.е. зависимость есть, но характеризуется как удовлетворительная.

Из-за оттепелей делать долгосрочный прогноз высоты снега к началу

весеннего таяния сложно. Однако, раз доказано, что есть зависимость высоты снега от суммы зимних осадков, можно предположить возможность прогноза и промерзания почвы по сумме осадков, прогнозируя ее. Зависимость глубины промерзания от осадков подтверждается графиком на рис. 7.6. Она имеет обратный характер и удовлетворительную степень связи ($R = 0,4$). Однако для прогнозирования глубины промерзания как фактора величины весеннего стока с высоким качеством такой уровень взаимосвязи не достаточен, поэтому нужен учет более сильных факторов, например суммы отрицательных температур, как было показано в подразделе 5.3., и, как можно предположить, нужен учет показателей режима солнечной радиации.



Эмпирическая кривая обеспеченности глубины промерзания почвы, характеризующая ее многолетние колебания, представлена на рис. 7.7.



Назначение кривой обеспеченности состоит в том, что она показывает вероятность того, что фактическое значение той или иной переменной случайной величины будет выше чем заданное, интересующее нас. Например, вероятность превышения глубины промерзания 60 см равна 42% (42 года из 100). Согласно [20, 106] 60 см - это критерий того, считать промерзание большим или малым.

Анализ роли различных факторов в формировании стока талых вод и разработка методики его прогнозирования.

Расчет был выполнен на примере реки Ольховой (приток реки Лугань). В качестве прогнозных показателей расхода стока реки были выбраны наиболее простые для получения в областных ЦГМ (центрах гидрометеорологии) данные о них. Ими стали высота снежного покрова перед началом весеннего таяния $H_{\text{сн}}$ как фактор, определяющий его влагозапас; глубина промерзания почвы перед началом таяния $H_{\text{пром}}$. В качестве показателя, определяющего величину увлажнения почвы перед началом таяния был выбран традиционный показатель – сумма модулей речного стока за сентябрь-январь $\Sigma q_{\text{IX-I}}$, л/с·км², рекомендуемый в [106]. Однако, поскольку данные по этому показателю не всегда имеются, особенно, если ведутся только метеорологические наблюдения без гидрометрических, на изучение был поставлен новый, предложенный нами показатель – сумма осадков за холодное время года, выпавших до конца последней зимней оттепели - ΣX , мм. На основании наблюдений предполагается, что талая вода оттепелей, в основном, поглощается почвой, повышая ее увлажненность, и мало расходуется на поверхностный сток.

На рис. 7.8 показаны колебания среднемесячного максимального расхода половодья на р. Ольховой за период 1959-2010 гг. Как видим, в отдельные годы расход превышал 70 м³/с при том, что среднемноголетний среднегодовой расход воды в реке равен 1,63 м³/с. Имеет место и линейный отрицательный тренд расхода, характеризуемый уравнением $Q = (26,31 - 0,136T) \text{ м}^3/\text{с}$.

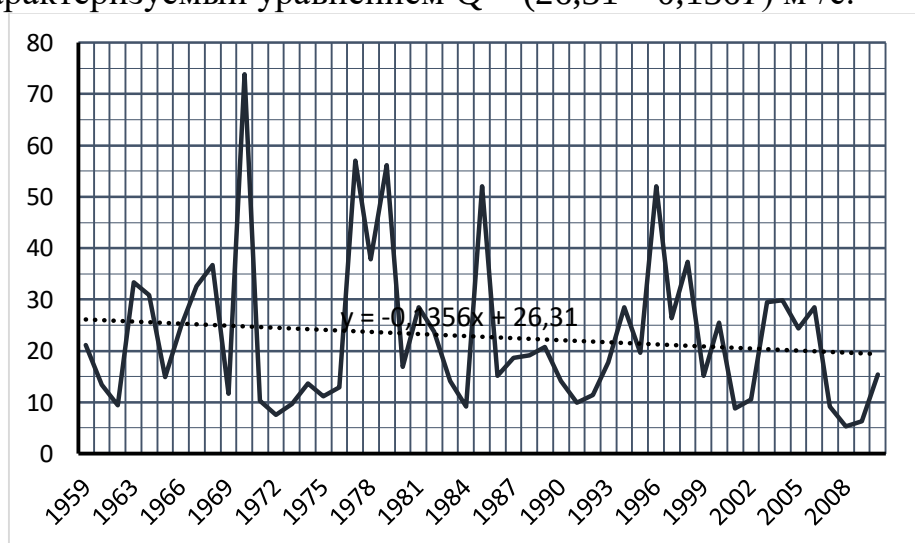


Рис. 7.8. Колебания и тренд максимального среднемесячного расхода реки Ольховая в Луганске за 1959-2010 гг.

Для количественной оценки комплексного влияния запаса воды в снеге, глубины промерзания почвы и ее увлажненности на величину среднемесячного расхода стока в период половодья была построена математическая модель, которая в общем виде может быть представлена уравнением:

$$Q = f_1(X_1) \cdot f_2(X_2) \cdot f_3(X_3) \cdot f_4(X_4) .$$

Параметры уравнений-множителей модели представлены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Параметры модели расхода половодья для р. Ольховой (г. Луганск)

№ пп	Уравнение частной зависимости	Независимая переменная X_i	Параметры уравнений			Коэффициент корреляции R в динамике
			A	B	C	
1	$f_1=A+BX_1^C$	ΣX , мм	1,14	-3,336	-1,5	0,51
2	$f_2=A+BX_2 + CX_2^2$	$H_{сн}$, см	-3,93	0,058	$-7 \cdot 10^{-5}$	0,53
3	$f_3=A+BX_3 + C/X_3^2$	Σq_{IX-I} , л/с · км ²	0,712	0,0049	-2,56	0,57
4	$f_4=A+BX_4 + CX_4^2$	$H_{пром}$, см	0,7	0,0175	$-8,76 \cdot 10^{-5}$	0,62

Итоговый вид модели:

$$Q = (1,14 - 3,34\Sigma X^{-1,5})(0,058H_{сн} - 7 \cdot 10^{-5}H_{сн}^2 - 3,93) \cdot (0,71 + 0,005\Sigma q_{IX-I} - 2,56/\Sigma q_{IX-I}^2) \cdot (0,7 + 0,0175H_{пром} - 8,76 \cdot 10^{-5}H_{пром}^2). \quad (7.7)$$

Как выяснилось, из двух испытуемых факторов, косвенно характеризующих влажность почвы, значительно более влияющим на сток оказалась сумма зимних осадков до конца последней оттепели. Она же оказалась и наиболее влияющим фактором из всех отобранных. Коэффициент корреляции ее влияния на расход стока, равный 0.51, более чем втрое превышал коэффициент корреляции стока со вторым испытуемым традиционным фактором – средним модулем зимнего стока, равным 0,15.

Выводы по подразделу и перспективы использования результатов.

Полученная математическая модель среднемесячного максимального расхода стока половодья может быть использована для долгосрочного прогнозирования размера половодья и опасности затопления земельных участков и жилья частного сектора г. Луганска и села Роскошное, которые находятся в пойме реки Ольховой. А также для оценки потенциального стока при прогнозе эрозии. Однако, поскольку разработанная модель еще не характеризуется достаточно высокой точностью, ее следует усовершенствовать путем использования метеорологического и гидрологического рядов большей длины, а также путем вовлечения дополнительных факторов и использования не среднемесячных, а мгновенных расходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами выполненного авторами анализа литературных источников, интернет-ресурсов и собственных исследований стали следующие:

- Охарактеризованы закономерности формирования поверхностного стока талых и дождевых вод, механика водной эрозии, предложены принципы управления эрозионно-гидрологическими процессами.
- Приведена классификация существующих моделей эрозии.
- Представлена классификация методов изучения эрозионно-аккумулятивного и дефляционного процессов, рассмотрены виды пассивного эксперимента в природе, приведены методы и устройства для измерения потоков почвы в процессе водной и ветровой эрозии, определения потерь почвы от них.
- Рассмотрены основные виды активного эксперимента в природе: изучение эрозии на стоковых площадках и малых водосборных бассейнах, применяемое при этом оборудование для учета стока воды и наносов. Охарактеризован метод искусственного дождевания, рассмотрены конструкции полевых дождевальных установок. Описан метод напуска и результаты его применения.
- Ввиду неоднозначного толкования в научной литературе понятия обеспеченности слоя жидких осадков предложена методика для ее оценки.
- Рассмотрено моделирование ветровой эрозии с помощью полевой и лабораторных аэродинамических установок, моделирование водной эрозии в лаборатории – в эрозионном лотке и путем искусственного дождевания.
- Разработаны новые методики: перехода от показателей дефляции породы, полученных в лаборатории, к естественным условиям; расчета продолжительности ветров различной силы за различные расчетные периоды времени. Разработана теоретическая модель дефляционного выноса породы с отвалов и ее отложения на прилегающей к ним территории, новый метод оценки степени загрязненности почвенного покрова прилегающей к отвалам территории продуктами ветровой и водной эрозии их поверхности.
- Рассмотрены методы и приборы сопутствующих метеорологических и почвенных исследований: изучения водопроницаемости почвы, мониторинга выпадения атмосферных осадков, наблюдений за снежным покровом, учета промерзания почвы и температурного режима почвы с помощью нового метода. Рассмотрены существующие и предлагаемые авторами методы измерения скорости ветра и изучения структуры крупномасштабного воздушного потока.
- Дана комплексная оценка влияния лесных полос на ветровой режим и факторы водообразования в агроландшафтах.
- Разработаны дистанционные методы исследований по космическим фотоснимкам: среднемноголетней интенсивности эрозии на породных отвалах, защищенности территории агроландшафта лесными насаждениями.
- Получена математическая модель потерь почвы на тальвеге ложбинного водосбора при талом и ливневом стоке, отражающая влияние комплекса геоморфологических характеристик водосбора на смыв почвы.

Примеры использования охарактеризованных методов и приборов в исследованиях авторов свидетельствуют о том, что в условиях сложного рельефа защита почв от водной эрозии является очень актуальной задачей, без решения которой невозможно устойчивое земледелие. За 28 лет исследований и наблюдений гидрологические предпосылки эрозии в виде талого стока возникали 20, а ливневого - 7 раз, т.е. практически ежегодно. Максимальные зафиксированные потери почвы от ливней достигают 295, от талого стока 44 т/га.

Анализ существующих методик проектирования систем почвоохранных мероприятий показал несовершенство их основы – различных моделей эрозии – даже наиболее признанных, и прежде всего, недопустимое упрощение чрезвычайно сложной картины формирования водных потоков на склонах с ложбинами и вызываемых ими видов эрозии. Ведь реальная длина склонового стока здесь зачастую ограничивается десятками, реже - первыми сотнями метров, то есть она гораздо меньше длины самих склонов, а наибольшую длину имеют линии стока только вдоль тальвегов ложбин, где и происходят наибольшие потери почвы, причем при стоке гораздо меньшем чем сток, вызывающий мелкоструйчатую эрозию вне ложбин.

Сложное сочетание видов эрозии – струйчатой склоновой, происходящей при очень разнообразном стекании воды (поперек, вдоль и под различным углом к линиям обработки поля), и русловой эрозии вдоль тальвега ложбин требует применения комплекса методов учета смыва – по объему водоросин в ложбинах, на их склонах, по отложению наносов и мутности транзитного стока.

Совершенствование существующих моделей эрозии и методик расчета потерь от нее невозможно без активизации эрозионных исследований, развития их методологии и научной координации – от регионального уровня до межгосударственного. Ведь изучение эрозии необходимо не только для оценки темпа деградации почвенного покрова и оценки эффективности почвозащитных мероприятий. Главная задача эрозионных исследований, требующая наиболее сложного комплекса методов, - это проверка существующих моделей эрозии и получение данных для их совершенствования и создания новых - необходимых для проектирования по-настоящему действенных систем почвозащитных мероприятий.

Очень важна поэтому и комплексность исследований – учет как можно большего количества факторов эрозии – почвенных и гидрометеорологических.

Не следует недооценивать и такое направление, как развитие эмпирико-статистических моделей. Ведь даже при таком ответственном виде прогнозирования, как прогнозирование половодий, имеющих общую природу со склоновым стоком, пользуются именно этим подходом. И он же лежит в основе наиболее известных моделей эрозии – отечественных и зарубежных.

Считаем важным предостеречь начинающих исследователей от неизбирательного применения представленных методов исследований. Так, недопустимо в экспериментах с дождеванием искать зависимость стока от водопроницаемости почвы, полученной попросту по разности осадков и стока. Недопустимо переносить результаты изучения межручейковой эрозии на

участки, где присутствует и ручейковая, а результаты с небольших площадок, где имеются только зачатки последней, переносить на длинные склоны без специальных методик. Нельзя переносить результаты даже с больших стоковых площадок на ложбинный водосбор, где есть и русловая эрозия.

С целью повышения сопоставимости результатов, полученных исследователями из различных научно-исследовательских учреждений и вузов, важно приводить результаты эрозионных исследований к единой форме, например, к разработанной во ВНИИЗиЗПЭ и ГГИ (см. Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва при изучении водной эрозии. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 88 с.).

Но главное, необходимо сделать эрозионные исследования массовыми, как это было в прошлом веке в СССР и США. Важно придать защите почв от эрозии статус одной из национальных идей, как в США, где, к примеру, написаны около 20 песен о почве, эрозии и пыльных бурях, исполняемых известными бардами.

Трудно искусственно вовлечь в массовые эрозионные исследования «движущую силу науки» - аспирантов. Но можно и нужно больше вовлекать в них студентов. Надо активнее использовать такой потенциал, как аграрные вузы, ведь будущие почвоведы, агрономы и мелиораторы, другие специалисты, работающие на полях, должны с вузовской скамьи проникнуться пониманием того, что без сохранения почвенного плодородия нельзя достичь высокой эффективности агротехнологий.

Необходимо вовлечь в эрозионно-гидрологические исследования и географов, особенно студентов направления «Гидрометеорология». Ведь без понимания того, как зарождается сток, трудно понять механизм половодья.

Выражаем надежду, что данная книга поможет студентам вышеназванных специальностей, а также биологам и экологам лучше осознать важность эрозионных исследований, увлечься проблемами эрозиоведения, освоить его методы.

Необходимо расширить перечень измерений на метеостанциях, дающих информацию для анализа происходящих эрозионных процессов, следует расширить сеть воднобалансовых стационаров. Ведь это будет способствовать и решению такой важной, в современных условиях активизации наводнений, задачи, как совершенствование методик гидрологических прогнозов.

И, конечно же, важно вернуться к межгосударственной интеграции и координации исследований ученых стран бывшего СССР. Примером такой интеграции является и данная монография.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агролесомелиорация и плодородие почв / Е. С. Павловский и др.; под ред. Е. С. Павловского. – М.: Агропромиздат, 1991. – 288 с.
2. Акшалов К.А. Методические рекомендации по изучению и контролю водной эрозии почв в современных системах земледелия.- Астана: Научно-производственный центр зернового хозяйства им. А.И.Бараева, 2010.- 20 с.
3. Альбом типичных решений размещения линейных рубежей при почвозащитной контурно-мелиоративной организации склонов в хозяйствах лесостепной, степной и степной засушливой зон УССР. – Киев: УкрНИИземпроект, 1990.
4. А. с. СССР № 1250219. Система внутрпочвенного орошения для склоновых земель/ Н. М. Шелякин, А. Р. Зубов // Открытия, изобретения. –1986. – № 30. – С. 13.
5. А. с. СССР № 1142009. Способ борьбы с водной эрозией почв / Н.М. Шелякин, А.Р. Зубов, В.А. Белолипский // Открытия, изобретения. – 1985. – № 8. – С. 3.
6. А. с. СССР № 1771545, МКИ 3 А 01 В 13/16. Способ борьбы с водной эрозией / А.Р. Зубов, Н. М. Шелякин, В. А. Белолипский (СССР). – № 4748723/15; заяв. 17.10.1989; опубл. 30.10.1992, Бюл. № 40. –3 с.
7. А. с. № 1743385 СССР, МКИ 3 А 01 В 13/16. Способ борьбы с эрозией почв / А. Р. Зубов, Н. М. Шелякин, В. А. Белолипский (СССР). – № 4764361/15; заяв. 04.12.1989; опубл. 30.06.1992, Бюл. № 24. –3 с.
8. А. с. № 1765706 СССР, МКИ 3 G 01 F 23/04 Уровнемер / А. Р. Зубов, Ю. И. Колесников (СССР).– № 4769418/10; заяв. 18.12.898; опубл. 30.09.92, Бюл. № 36. –3 с.
9. А. с. № 895297 СССР, МКИ А 01 В 13/16.. Способ борьбы с водной эрозией на склонах / И. Г. Зыков, Ю. В. Бондаренко // Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки. – 1982. – № 1. – С. 3.
10. А. с. № 1210068 СССР, МКИ G01F23/04, A01B 13/16. Устройство для учета поверхностного стока / Н.М. Шелякин, В.А. Белолипский, А.Р. Зубов, Ю.И. Колесников, А.П. Самойленко (СССР).- № 3770686/30-15; заявл. 26.07.84; опубл. 07.02.86, Бюл. №5.
11. А. с. № 1367875 СССР, МКИ G01F23/04, A01B 13/16. Устройство для учета поверхностного стока. / В.А. Белолипский, А.Р. Зубов, Н.М. Шелякин, И.Н.Головченко (СССР).- № 4104713; заявл. 26.05.86; опубл. 22.09.87, Бюл. № 35.
12. А. с.№ 1454267 СССР. Способ подготовки поверхности терриконов под облесение / А.Р.Зубов, Л.Г.Зубова, Н.П.Тимошенко (СССР).- Бюл. №4, 1989.
13. А. с. №1724091 СССР. Способ определения ажурности лесных полос / И. Г. Зыков, А. Р. Зубов, В. И. Тарасов // Изобретения, 1992. – № 13.
14. А. с. № 1042628. Способ создания противоэрозионных лесных полос / И. Г. Зыков, В. М. Ивонин, Ю. В. Бондаренко // Открытия, изобретения. – 1983. – № 35. – С. 4.
15. Барабанов, А. Т. Агролесомелиорация в почвозащитном земледелии / А. Т. Барабанов. – Волгоград, 1993. – 156 с.
16. Барабанов А.Т., Гаршинев Е.А. Контурная организация территории и лесомелиорация / Лесомелиорация и ландшафт; Волгоград: ВНИАЛМИ, 1993. – Вып. 1(105). – С. 92-106.
17. Барабанов А.Т., Кулик А.В. Роль стокорегулирующих лесополос в регулировании снегоотложения и промерзания почв в Европейской части РФ / Известия Нижневолжского Агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование №2(46).- Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2017 С. 85-90.
18. Белолипский В.А., Н.М. Шелякин, А.Р. Зубов. Ливневый сток и его регулирование

/ Земледелие. – 1987. – № 7. – С. 28-31.

19. Беннетт Х.Х. Основы охраны почв. – М.: Изд-во ин. лит., 1958. – С. 244-257.
20. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам: учебное пособие. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965.- 440 с.
21. Бодров В.А. Лесная мелиорация. – М.: Гослесбумиздат. –1952. – С. 8-134.
22. Бобровицкая Н.Н., Корнилов Ю.Н. Применение стереокамер для исследования временной ручейковой сети / Комплекс противоэрозионных мероприятий в действии / УНИИЗПЭ. – Ворошиловград, 1985. – Т. II. – С. 62-63.
23. Бояринцев Е.Л. Максимальный сток / Конспект лекций/ Одесса: ОГЭУ, 2003.- 66 с.
24. Будник С.В. Талый сток со склонов.- Житомир, 2010. - 342 с.
25. Будник С.В., Хильчевский В.К. Гидродинамика и гидрохимия склоновых водотоков. – К.: ИГЛ «Обрії», 2005.- 368 с.
26. Булыгин С.Ю., Неаринг М. А. Формирование экологически сбалансированных агроландшафтов: Проблема эрозии. – Харьков: Изд-во «Эней», 1999. – 272 с.
27. Булигін С.Ю., Думін Ю.В., Куценко М.В. Оцінка географічного середовища та оптимізація землекористування: Харків: ТОВ «Світло зі сходу», 2002.- 168 с.
28. Бураков В. І. Грунтозахисно-меліоративне впорядкування агроландшафту як основний етап культурного агроландшафтогенезу (теоретичне обґрунтування практичної сфери діяльності): автореф. дис....докт. геогр. наук / В. І. Бураков. – Харків, 1997. – 34 с.
29. Быков В. Л. Сток воды и наносов на территории Донбасса. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – Т. 45. – С. 95-101.
30. Вадюнина В. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
31. Васильев Ю.И. Противодефляционная устойчивость почв Северного Кавказа.- Волгоград, 1997.- 188 с.
32. Васильев И.П., Туликов А.М., Баздырев Г.И. Практикум по земледелию.- М.: КолосС, 2004.- 424 с.
33. Вергунов В. А. Агроекологічна ефективність валів-терас та ґрунтозахисна технологія вирощування озимої пшениці на сірих лісових еродованих ґрунтах Лісостепу / 36. наукових праць Луганського с.-г. ін-ту. – Луганськ: Видавництво ЛСПІ, 1998. – С. 37-46.
34. Вид В.Э. Методическое пособие к курсовой работе по регулированию стока, Херсон: ХСХИ, 1967, 104 с.).
35. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. - 304 с.
36. Волощук, М. Д. Микророзбінна ерозія і заходи боротьби з нею на території південно-західної частини Причорноморської низовини / Ерозія ґрунтів і заходи боротьби з нею: матеріали республ. міжвуз. конф. – Одеса, 1964.
37. Временные методические рекомендации по разработке почвозащитной системы земледелия с контурно-мелиоративной организацией территории / УНИИЗ, Укрземпроект. – Киев, 1987. – 66 с.
38. ВСН 10.15 УССР. – 1-87. Правила по определению максимальных расходов воды дождевых паводков с малых водосборов (площадью до 2,0 км²) при проектировании противоэрозионных гидротехнических сооружений на равнинной территории Украинской ССР/ Госагропром УССР. – Киев, 1987. – 25 с.
39. Гаршинев, Е. А. Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация: монография. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1999. – 196 с.

40. Гаршинев Е. А. Самописец уровня воды / Инф. листок № 396-79. – Курск: ЦНТИ, 1979. – 4 с.
41. Глазунов Г.П. Теория ветровой эрозии почвы: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. биол. наук: спец. 03.00.27 «Почвоведение». – М., 2004. – 36 с.
42. Головченко, И.Н. и др. Дождевальная установка для изучения закономерностей развития ливневой эрозии / И.Н. Головченко, Ю.Н. Мельников, Н.М. Шелякин, В.А. Белолипский // Комплекс противоэрозионных мероприятий в действии / УНИИЗПЭ. – Ворошиловград, 1985. – Т. II. – С. 14-16.
43. Головченко И.Н., Белолипский В.А., Шелякин Н.М. Метод моделирования эрозионного действия водного потока на всей длине склона / Комплекс противоэрозионных мероприятий в действии / УНИИЗПЭ. – Ворошиловград, 1985. – Т. II. – С. 50-51.
44. Горя, В. Д. Почвозащитная роль стокорегулирующих лесных полос при контурно-мелиоративной организации территории юга ЦЧО: автореф. дис....канд. с.-х. наук: 06.03.04 / В. Д. Горя. – Воронеж, 1994. – 24 с.
45. Гудзон Н. Охрана почвы и борьба с эрозией. – М.: Колос, 1974. – С. 24-79.
46. Демидов В. В. Комплексное влияние лесных полос и агротехнических приемов на эрозию почв и урожайность сельскохозяйственных культур на черноземах Курской области: автореф. дис...канд. с.-х. наук: 06.03.04. – Волгоград, 1983. – 22 с.
47. Джос, А. М. Влияние молодых стокорегулирующих лесных полос на эрозионно-аккумулятивные процессы и их выращивание в Донбассе: автореф. дис....канд. с.-х. наук: 06.03.04 / А. М. Джос. – Волгоград, 1996. – 24 с.
48. Довгостроковий прогноз елементів весняного водопілля на рівнинних річках/ Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни «Гідрологічні прогнози» /Укладачі: Лобода Н.С., Шакірзанова Ж.Р. - Одеса, ОДЕКУ, 2003.- 39 с.
49. Долгилевич М. И., Швец Г.И., Зыков И.Г. Научные основы прогнозирования и система предупреждения эрозионных процессов. – М.: Колос, 1992. – 146 с.
50. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. – М.: Колос, 1979. – 322 с.
51. Зайченко, К. И. Роль лесных насаждений в повышении плодородия смытых почв степи и лесостепи европейской территории РСФСР: автореф. дис.... канд. с.-х. наук: 06.03.04 / К. И. Зайченко. – Волгоград, 1986. – 24 с.
52. Заславский М. Н. Эрозиоведение с основами противоэрозионного земледелия. – М.: Высшая школа, 1987. – 376 с.
53. Заславский М. Н. Эрозиоведение. – М.: Высшая школа, 1983. – 320 с.
54. Захаров П. С. Эрозия почв и меры борьбы с ней. – М.: Колос, 1971. – 116 с.
55. Зубов А.А. Экологическая опасность территории размещения породных отвалов угольных шахт: методы оценки, система и алгоритм управления: дис. ... канд. техн. наук (21.06.01 – экологическая безопасность) / А.А. Зубов; рук. работы В.А. Ульшин. – Днепропетровск: ДНГУ, 2012. – 183 с.
56. Зубов А.Р. Особенности контурно-мелиоративной организации территории в условиях сложного рельефа / Охрана почв и оптимизация агроландшафтов // Сборник научных трудов. - Луганск: «Элтон-2», 1998. С.134-140.
57. Зубов А. Р. Эффективность стокорегулирующих лесных полос и противоэрозионных гидротехнических сооружений в Донбассе: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.04 / А. Р. Зубов. – Волгоград, 1988. – 18 с.
58. Зубов А. Р. Принципы размещения противоэрозионных гидротехнических сооружений на пашне / Мелиорация и водное хозяйство. – 1991. – № 8. – С. 29-32.
59. Зубов О. Р. Запобігання водній ерозії засобами постійної дії / Вісник аграрної науки.

- 1998. – № 8. – С. 64-67.
60. Зубов О. Р. Критерії оцінки рельєфу при впровадженні контурно-меліоративного землеробства / Вісник аграрної науки. – 1998. – № 4. – С. 16-20.
61. Зубов О. Р. Роль заходів постійної дії в системі контурно-меліоративного землеробства / О. Р. Зубов // Агроінком. – 1998. – № 7.– 8. – С. 12-14.
62. Зубов О. Р. Моделювання протиерозійних споруд / О. Р. Зубов // Вісник аграрної науки. – 1999. – № 12. – С. 64-66.
63. Зубов О. Р. Використання і розміщення ґрунтозахисних заходів постійної дії в агроландшафті / Вісник аграрної науки. – 2000. – № 11. – С. 60-62.
64. Зубов О. Р. Закономірності ерозійно-аккумулятивних процесів в лісоаграрному ландшафті балкового водозбору / Меліорація і водне господарство, 2000. – Вип. 87. – С. 146-153.
65. Зубов О. Р. Особливості будови ґрунтового профілю в умовах складного рельєфу / О. Р. Зубов [і ін.]. – Вісник Харківського державного аграрного університету. – 2000. – № 1. – С. 187-190.
66. Зубов О. Р. Теоретичні та прикладні основи формування систем ґрунтоохоронних заходів постійної дії в агроландшафтах (на прикладі східної частини України): автореф. дис....докт. сільськогосп. наук: спец. 06.01.03 – агроґрунтознавство і агрофізика.- Харків, 2001.- 32 с.
67. Зубов А.Р., Чепурной А.А., Дементьев Д.И. «К вопросу гидрологической безопасности предприятий Луганска / Сборник научных трудов «Ресурсо-сберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении.- Луганск, Изд-во ЛГУ им. В.Даля, 2016.- С. 156-162.
68. Зубов А.Р., Зубова Л.Г. Гидрологические особенности рек бассейнов Азовского и Черного морей: монография. - Луганск: Издательство ФЛП Пальчак А.В., 2017.- 230 с. (Режим доступа в интернете: <https://www.twirpx.com/file/2418456/>).
69. Зубов А.Р., Гречишкина Н.В. Оценка качества воды в Луганском водохранилище / Инженерная биология в современном мире: сборник материалов. "Майкопский государственный технологический университет", 2013. С. 34-35.
70. Зубов А. Р., Зубова Л. Г. Климат Луганска и его прикладные аспекты: монография. – Луганск. - Изд-во «Ноулидж», 2016. – 180 с.
71. Зубов А.Р., Зубова Л.Г. Новые инженерно-биологические способы облесения терриконов / Инженерная биология в современном мире // Междунар. конференция. "Майкопский гос. технологический университет", Майкоп, 2011. С. 84-89.
72. Зубов А. Р., Зыков И. Г., Тарарико А. Г. Формирование эрозионно-устойчивых агроландшафтов в бассейне Северского Донца: монография. - ГНУ ВНИАЛМИ, Волгоград, 2010. - 240 с.
73. Зубов А. Р., Ульшин В. А., Зубов А. А., Зубова Л. Г. Моделирование процесса дефляции породы отвалов угольных шахт и техногенное загрязнение почв Донбасса Агрохімія і ґрунтознавство. 2012. № 77. С. 52-56.
74. Зубова Л. Г. Основы математической обработки экспериментальных данных: учебное. пособие / Л. Г. Зубова.– Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2013.– 60с.
75. Зубова Л. Г., Гречка В. А., Матюшенко Ю. В. Воздействие горнодобывающей промышленности на естественные ландшафты Донбасса Экотехнологии и ресурсосбережение. 1999. № 4. С. 63.
76. Зубова Л.Г., Зубов А.Р., Зубов А.А. и др. Терриконы: монография / Л.Г. Зубова, А.Р. Зубов, А.А. Зубов, А.В. Харламова, С.Г. Воробьев, Ю.И. Макаришина, В.В. Буняченко.– Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2015. - 712 с. (<https://www.twirpx.com/file/2298003/>)

77. Зубова Л.Г., Зубов А.Р., Макаришина Ю.И. влияние растительности на процесс формирования дождевого стока на поверхности отвалов угольных шахт / Научное обозрение. 2015.- № 15. С. 28-33.
78. Зуза А. Г. и др. Почвозащитное земледелие с контурно-мелиоративной организацией территории в Донецкой области / А. Г. Зуза [и др.] // Охрана почв и оптимизация агроландшафтов. – Киев: УААН, 1995. – С. 99-105.
79. Зыков И. Г. Научные основы лесной мелиорации эрозионных ландшафтов / Научные основы противозэрозийной лесомелиорации. – Волгоград, 1982. – Вып. 1(75). – С. 3-15.
80. Зыков И. Г. Основные параметры комплекса лесных полос и гидротехнических сооружений на склонах / Проблемы и резервы контурного земледелия / ВАСХНИЛ. – М.: Колос, 1982. – С. 71-78.
81. Зыков И. Г., Зубов А. Р. Противозэрозийные гидротехнические сооружения в ландшафтной системе земледелия / Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 1996. – № 2. – С. 36-39.
82. Зыков И. Г., Ивонин В. М. Повышение эффективности противозэрозийных лесных полос. – М.: Колос, 1979. – 5 с.
83. Зыков И. Г., Панов В. И. Изучение эффективности зональных систем защитных лесных насаждений на водосборах / ВНИАЛМИ. – Волгоград, 1985. – С. 59-60.
84. Ивонин В. М. Теория агролесомелиорации водосборов / Лесомелиорация склонов. – Волгоград, 1985. – Вып. 3(86). – С. 14-27.
85. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противозэрозийных мероприятий на европейской территории СССР; ВСН 04-77. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 59 с.
86. Калиниченко Н. П., Зыков И. Г. Противозэрозийная лесомелиорация. – М.: Агропромиздат, 1986. – 280 с.
87. Калюжный И. Л., Павлова К. К. Формирование потерь талого стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 160 с.
88. Исследование структуры водного баланса экосистем (биогеоценозов) /Под ред. А.М.Грина // М.: Институт географии АН СССР, 1973. - 40 с.
89. Каштанов А. Н., Заславский М. Н. Почвоводоохранное земледелие. – М.: Россельхозиздат, 1984. – 462 с.
90. Козменко А. С. Основы противозэрозийных мероприятий. – М.: Сельхозиздат, 1954. – 421 с.
91. Константинов А. Р., Струзер Л. Р. Лесные полосы и урожай. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 216 с.
92. Константинов, И. С. Микроложбинная эрозия и урожай сельскохозяйственных культур / Вопросы эрозии и повышение продуктивности склоновых земель Молдавии. – Кишинев, 1962. – Т. 2. – С. 50-54.
93. Коптєв В. І., Ліщенко А. А. Полезахисне лісорозведення.– Київ: Урожай, 1989.– 168 с.
94. Кубышкин П. П., Полубояринов И. И. Сельскохозяйственные мелиорации и лесоводство. – 2-е изд. – М.: Колос, 1971. – 407 с.
95. Кузнецов М. С., Глазунов Г. П. Эрозия и охрана почв: Учебник. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, Изд-во «КолосС», 2004. – 352 с.
96. Кузнецов М. С., Глазунов Г. П., Зорина Е. Ф. Физические основы эрозии почв: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1992.- 95 с.
97. Кузнецов М. С., Демидов В. В. Эрозия почв лесостепной зоны центральной России: Моделирование, предупреждение и экологические последствия. - М.: Изд-во

ПОЛТЕКС, 2002.-184 с.

98. Кулик К.Н., Рулев А.С., Сажин А.Н. Методы исследований глобального переноса минерального вещества / Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование, 2017. № 2 (46). С.37-43.
99. Кулик К. Н., Кошелев А. В. Геоинформационные технологии в оценке защитных лесных насаждений / В сборнике: Проблемы устойчивого развития и эколого-экономической безопасности регионов материалы XII Межрегиональной научно-практической конференции. Волжский гуманитарный институт, 2016. С. 122-124.
100. Кулик К. Н., Дубенок Н. Н., Барабанов А. Т. Стокорегулирующая и противозрозионная эффективность агротехнических противозрозионных мероприятий в системе адаптивно-ландшафтного земледелия Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2017. № 1 (30). С. 47-52.
101. Кулик В. Я. Инфильтрация воды в почву: Краткий справочник.- М.: Колос, 1978.- 93 с.
102. Куценко М. В. Науково-методологічні засади формування ґрунтозахисних та водоохоронних агроландшафтів /Науково-методичний посібник/ Харків Вид-во «13 типографія», 2006 р. 90 с.
103. Ландшафтное земледелие. Вопросы теории, методики исследований, проектирования и агроэкологического мониторинга / под ред. акад. Г. А. Романенко и А. Н. Каштанова. – М.: Изд-во РАСХН, 1994. – 91 с.
104. Лидов В. П., Сетунская Л. Е., Хмелева Н. В. Исследование микроформ размыва количественными методами / Сельскохозяйственная эрозия и борьба с ней. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – С. 47-69.
105. Лисецкий Ф. Н., Светличный А. А., Черный С. Г. Современные проблемы эрозиоведения / Под ред. А. А. Светличного. – Белгород: Константа, 2012. – 456 с.
106. Лобода Н. С. Гідрологічні прогнози : конспект лекцій.- Одеса: Видавництво ТЭС, 2009.- 172 с.
107. Логгинов Б. И. Основы полезащитного лесоразведения. – Киев: Изд-во УАСХН, 1961. – С. 49.
108. Лопырев М. И., Постолов В. Д. К вопросу эрозионной опасности ложбин / Повышение эффективности использования земель на основе землеустройства. – Воронеж: ВСХИ, 1982. – Т. 117. – С. 58-63.
109. Лопырев М. И., Постолов В. Д. Противозрозионная организация территории склонов: метод. рек. и указ. для противозрозионного проектирования. – Воронеж: ВСХИ, 1986. – 48 с.
110. Лукиша В. В. Оценка мелиоративной роли водорегулирующих лесных полос на пахотных склонах правобережной степи УССР: автореф. дис... канд. с.-х. наук / В. В. Лукиша. – Киев, 1975. – 26 с.
111. Лунев П. Ф. Повышение эффективности комплекса противозрозионных мероприятий с контурно-полосной организацией территории / Русский виноград. – Новочеркасск, 1976. – Т. 10(21). – С. 46.
112. Лучшева А. А. Практическая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 440 с.
113. Малютяк В. Т., Дубровин А. В., Клименко Н. П. Метод изучения поверхностного стока на выположенных оврагах. земледелия / Комплекс противозрозионных мероприятий в действии. – Ворошиловград: УНИИЗПЭ, 1985. – Т. 1. – С. 74-75.
114. Методика изучения агроэкономической эффективности противозрозионных лесных насаждений. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1981. – 24 с.
115. Методика полевого моделирования эрозии, расчета смыва и расстояний между лесополосами /Е.А.Гаршинев, А.Т. Барабанов, И.Г. Зыков и др. //М.: ВАСХНИЛ,

1991.- 42 с.

116. Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва при изучении водной эрозии. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 88 с.
117. Методические рекомендации по обоснованию оптимальных параметров систем полевых защитных лесных полос на землях, подверженных ветровой эрозии / ВНИАЛМИ. – Волгоград, 1989. – 60 с.
118. Методические рекомендации по определению объема эродированной почвенной массы / Г. Е. Кошкин, Н. И. Панин, А. С. Извеков / М.: ВАСХНИЛ, 1985. – 14 с.
119. Методические рекомендации по определению расстояний между стокорегулирующими рубежами при проектировании почвозащитной системы земледелия с контурно-мелиоративной организацией территории / А. Г. Тарарико [и др.]; Госагропром УССР, ЮО ВАСХНИЛ, УкрНИИЗ. – Киев, 1987. – 22 с.
120. Методические рекомендации по оценке эффективности почвозащитных мероприятий / ВНИИЗиЗПЭ. – М.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1987. – 76 с.
121. Методические рекомендации по полосному размещению посевов и залужению ложбин / УНИИЗПЭ. – Луганск, 1990. – 51 с.
122. Методические рекомендации по проектированию комплекса противоэрозионных мероприятий для территории УССР / УНИИЗПЭ. – Ворошиловград, 1982. – 56 с.
123. Методические рекомендации по проектированию комплексов противоэрозионных мероприятий на расчетной основе / ВНИИЗиЗПЭ. – Курск, 1985. – 167 с.
124. Методические рекомендации по разработке почвозащитной системы земледелия с контурно-мелиоративной организацией территории / Госагропром УССР. – Киев, 1989. – 36 с.
125. Методические рекомендации по разработке почвозащитной системы земледелия с контурно-мелиоративной организацией территории / УкрНИИЗ. – Киев, 1989. – 53 с.
126. Методические указания по моделированию процессов ливневой эрозии с использованием искусственного дождевания / Д.Е. Ванин [и др.] / М.: ВАСХНИЛ, 1980.- 72 с.
127. Методические указания по определению потенциального стока с элементарных водосборов и проектированию почвоводоохранных мероприятий при контурно-мелиоративном земледелии /В.А. Белолипский, Н.М. Шелякин, А.Р. Зубов и др./.- Луганск УНИИЗПЭ, 1990.- 36 с.
128. Методические указания по проектированию противоэрозионной организации территории при внутрихозяйственном землеустройстве в зонах проявления водной эрозии / Госагропром СССР, ГИЗР. – М., 1989. – 80 с.
129. Мирцхулава, Ц. Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1970. – 240 с.
130. Митрофанов А. Полеты в струе и наяву / Квант. – Москва. – 1991. – № 9. – С. 2–10.
131. Можейко Г. А. О принципах построения и эксплуатации экологически сбалансированных и высокопродуктивных агроландшафтов / Вісник аграрної науки. – 1997. – № 4. – С. 31-36.
132. Мольчак Я.А. Дождевой сток зоны избыточного увлажнения Украины (исследования и расчеты).- Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1984.– 144 с.
133. Музыченко Б. А. Теория и практика контурного земледелия в зоне недостаточного и неустойчивого увлажнения / Проблемы и резервы контурного земледелия. - ВАСХНИЛ. – М.: Колос, 1982. – С. 5-14.
134. Новаковський Л. Я., Канаши О. П., Леоніс В. О. Консервація деградованих і малопродуктивних орних земель України/ Вісник аграрної науки.– 2000.– № 11.– С. 54-59.

135. Нормативи ґрунтозахисних контурно-меліоративних систем землеробства // За ред. О. Г. Тараріко і М. Г. Лобаса / Інститут агроекології та біотехнології УААН, Аграрний інститут НБАТ Агроінком. – Київ, 1998. – 158 с.
136. Нормативы формирования оптимальных лесомелиоративных комплексов на пахотных землях с учетом факторов деградации агроландшафтов в хозяйствах разной формы собственности / А.Т.Барабанов, Е.А.Гаршинев, Ю.И.Васильев / Волгоград: ВНИАЛМИ, 2002.- 56 с.
137. Определение податливости почв к ветровой эрозии при крупномасштабных эрозионных обследованиях в Степной зоне УССР: Методические рекомендации / Г.А.Можейко, З.И.Лукьянченкова, Д.О.Тимченко Д.О., В.И.Бураков. - Харьков, Укр. НИИ почвоведения и агрохимии им. А.Н.Соколовского, 1980.- 14 с.
138. Ободовський О. Г. Руслові процеси: Навч. посібник.- К.: РВЦ «Київський університет», 1998.- 134 с.
139. Остапенко Б. Ф., Величко Б. Л., Вербейко А. П. Комплекс противоэрозионных мероприятий: учеб. Пособие. - ХСХИ. – Харьков, 1982. – 108 с.
140. Павловский Е.С., Зыков И.Г. Агролесомелиоративная защита почв от эрозии и комплексное освоение овражно-балочных систем/ Вестн. с.-х. науки.– 1984.– № 12.– С.41-48.
141. Панов В. И., Зыков И. Г., Петров В. И. Теоретические и практические вопросы совершенствования комплекса противоэрозионных мероприятий / Эрозия почв, защитное лесоразведение и урожай. – Куйбышев: Кн. изд-во, 1982. – С. 3-6.
142. Патент № 30243 А, Україна, МКП 6 А01 В13/16. Спосіб боротьби з водною ерозією ґрунтів на схилах з улоговинами / О.Р.Зубов: власник Луганський інститут агропромислового виробництва УААН; заявл. 04.02.1998; опубл. 15.11.2000, Бюл. № 8.
143. Патент на винахід № 42978, Україна, МПК E21C 41/32. Спосіб обліку продуктів водної ерозії з териконів / О. Р. Зубов, Б.Т. Харківський, Н.В. Колтунова, Л. Г. Зубова; заявл. 17.10.2000; опубл. 15.11.2001, Бюл. № 10.
144. Патент на корисну модель № 28795, Україна. Лабораторна дощувальна установка / Зубов О.Р., Єрьоменко А.О.: власник СНУ ім. В.Даля; опубл. 25.12.2007, Бюл. № 21.
145. Патент на винахід № 62336 А, Україна, МПК (2006) А01В 13/16, А01G 25/00, Дощувальна установка для вивчення ерозії ґрунтів / В.І. Тарасов, О.Р. Зубов, Колесніков Ю.І., Полулях М.М. Власник: Луганський інститут агропромислового виробництва УААН; заявл. 06.03.2003; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.
146. Патент на винахід № 63224 А, Україна, МПК 7 А01В13/16. Лабораторна установка для вивчення міграції речовини в ґрунті при ерозійно-гідрологічних процесах / О.Р. Зубов, В.І. Тарасов, В.В. Михайлов: власник Луганський інститут агропромислового виробництва УААН; заявл. 6.03.2003; опубл. 15.01.2004, Бюл. №1.
147. Патент на корисну модель № 53815, Україна, МПК (2009) F15C 1/00 Аеродинамічна установка для моделювання процесу вітрової ерозії ґрунтів та гірських порід / О.Р. Зубов, А.О. Зубов: власник: Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля ; заявл. 18.02.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
148. Патент на корисну модель № 52356, Україна, МПК (2009) G01N 7/00, G01NC 33/24 Спосіб оцінки впливу породних відвалів на ґрунтовий покрив прилеглої території / А.О. Зубов, С.І. Сиволап: власник: Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля; заявл. 18.02.2010; опубл. 25.08.2010, Бюл. № 16.
149. Патент на корисну модель № 74772, Україна, МПК (2006) E21C 41/32. Спосіб визначення стану поверхні териконів і ґрунтів на прилеглий до них території / А.О. Зубов, О.Р. Зубов: власник Східноукраїнський національний

- університет ім. Володимира Даля заявл. 23.04.2011; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.
150. Патент на корисну модель № 36884, Україна, МПК (2008) E21C 41/32 Спосіб обліку виносу продуктів водної ерозії з териконів / О.Р. Зубов, Л.Г. Зубова, С.Г. Воробійов: власник: Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля; заявл. 21.05.2008; опубл. 10.11.2008, Бюл. №21.
151. Петров В.И. Применение электрометрии для изучения стока в горах / Комплекс противоэрозионных мероприятий в действии / УНИИЗПЭ. – Ворошиловград, 1985. – Т. II. – С.33-34.
152. Петров Ю. П., Сластухин В. Е. О методике учета ложбинных форм эрозии на пахотных склонах / Методы исследования водноэрозионных процессов: сб. науч. тр. – Кишинев, 1976. – С. 99.
153. Подгорный В. К. Почвоохранная роль валов-террас на склоновых землях центра Русской равнины: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.01.03 / В. К. Подгорный. – Харьков, 1988. – 32 с.
154. Полупан, Н. И. Особенности склонового почвообразования и развития эрозии / Н.И. Полупан [и др.] // Вісник аграрної науки. – 1996. – №7. – С. 15-23.
155. Полуэктов Е. В. Водный режим аграрных ландшафтов юга России: монография.- Новочеркасск: Изд-во Новочеркасская государственная мелиоративная академия, 1998.- 176 с.
156. Потапенко Я. И., Манченко В. И., Музыченко Б. А. Защита почв от эрозии. – М.: Колос, 1975. – 128 с.
157. Практикум по почвоведению / под ред. И.С. Кауричева. – М.: Колос, 1980. – 272 с.
158. Природа Украинской ССР. Климат / В. Н. Бабиченко [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1984. – 232 с.
159. Прогноз возможных потерь почвы от ветровой эрозии в степной зоне Украины: метод. указ. / Ин-т почвоведения и агрохимии им. Г. Н. Соколовского [составители Г.А.Можейко, В.М. Москаленко, С.Ю.Булыгин, Д.О.Тимченко, А.Б.Лавровский, А.П.Канаш]. УААН.– Харьков, 1993. – 84 с.
160. Прогноз эрозии для целей проектирования почвозащитно устроенных агроландшафтов в лесостепи и северной степи левобережной Украины: метод. указ. / УНИИПА – Харьков, 1988. – 40 с.
161. Проездов П. Н. Противоэрозионные гидротехнические сооружения: учеб. Пособие. - Саратов. с.-х. акад. – Саратов, 1996. – 196 с.
162. Рекомендации по лесной мелиорации при контурной организации территории в районах активного проявления водной эрозии / ВНИАЛМИ. – Волгоград, 1989. – 35 с.
163. Рекомендации по расчету максимального стока с малых водосборов для проектирования противоэрозионных гидротехнических сооружений (для условий Одесской и Ворошиловградской областей) / УкрНИИГиМ. – Киев, 1974. – 37 с.
164. Рожков А. Г. Предупреждение образования оврагов и борьба с ними / Почвозащитное земледелие на склонах. – М.: Колос, 1983. – С. 63-75.
165. Руководство по производству наблюдений над испарением с почвы и снежного покрова. – Л., 1963. – Ч. 1. – С. 81-133.
166. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик.- Ленинград: Гидрометеиздат, 1973.- 112 с.
167. Руководство стоковым станциям / Под ред. З.М.Богомазовой, А.П.Бочкова, С.Н.Боголюбова. - Л.: Гидрометеиздат, 1954.
168. Рулев А.С. Оценка эрозионного состояния агроландшафтов Доно-Чирского междуречья по материалам дистанционного зондирования / А.С. Рулев,

- Е.А. Литвинов, М.М. Кочкарь, О.М. Воробьева //Научная жизнь. 2012. № 2. С. 19.
169. Рулев А.С., Солодовников Д.А., Шинкаренко С.С., Рулев Г.А. Георадарные исследования почвогрунтов Ергеней / В сборнике: Инновационные агро- и биотехнологии в адаптивно-ландшафтном земледелии на мелиорированных землях: Материалы Международной научно-практической конференции ФГБНУ ВНИИМЗ, 2016. С. 281-284.
170. Рулев А.С., Юферев В.Г., Юферев М.В. Геоинформационное картографирование и моделирование эрозионных ландшафтов. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2015. – 150 с.
171. Сазонов И.Н., Штофель М.А., Пилипенко А.И. Система мероприятий против эрозии почв. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1984. – 248 с.
172. Світличний О.О., Чорний С.Г. Основи ерозієзнавства: Підручник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. – 266 с.
173. Светличный А.А., Черный С.Г., Швобс Г.И. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты: Монография. – Сумы: Университетская книга, 2004. – 410 с.
174. Скородумов А. С. Земледелие на склонах. – Киев, 1970. – 427 с.
175. Смалько Я. А. Ветрозащитные особенности лесных полос различных конструкций. – Киев: Госсельхозиздат УССР, 1963. – С. 147-157.
176. Смирнова Л.Ф. Ветровая эрозия почв: Учеб. пособие. - М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1985. - 136 с.
177. Соболев С. С. Развитие эрозионных процессов на территории европейской части СССР и борьба с ними. – М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – Т. 1. – 307 с.
178. Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. – Киев: Вища школа, 1977. – 280 с.
179. Справочник по почвозащитному земледелию / И. Н. Безручко, Л. Я. Мильчевская, В. М. Москаленко. – Киев: Урожай, 1990. – 278 с.
180. Степанов Н. М., Овчаренко М.Х., Захаров П.С. Гидротехнические противоэрозионные сооружения. – М.: Колос, 1974. – 144 с.
181. Сурмач Г. П. Ложбинная эрозия и меры борьбы с ней в сети лесных полос / Сб. науч. тр. – Волгоград, 1960. – Вып. 28.
182. Сурмач Г. П. Теоретические основы контурного размещения лесных полос на территории / Проблемы и резервы контурного земледелия. – М.: Колос, 1982. – С. 36-47.
183. Сурмач Г. П. Очерк истории противоэрозионной мелиорации в стране / Лесомелиорация склонов. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1985. – Вып. 3(86). – С. 3-127.
184. Сурмач Г. П. Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозионные мероприятия. – Волгоград, 1992. – 175 с.
185. Тарарико А. Г. Теоретические и практические основы почвоводоохранных систем земледелия и реализация их в производство / Вісник с.-г. науки.– 1991.– № 10.– С. 11-15.
186. Тарарико, А. Г. Почвозащитная контурно-мелиоративная система земледелия / А. Г. Тарарико, В. А. Вергунов; УкрИНТЭИ, УкрНИИЗ. – Киев, 1992. – 72 с.
187. Тараріко О. Г., Москаленко В. М. Каталог заходів з оптимізації структури агроландшафтів та захисту ґрунтів від ерозії.- Київ: Фітосоціоцентр, 2002. – 64 с.
188. Тарасов В. И. Метод биологических в исследованиях процессов дефляции почв на сельскохозяйственных угодьях / Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету//Ред. В.Г.Ткаченко.- Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2001.- №30 (42).- С.58-61.
189. Тарасов В. И. Стокорегулирующая роль лесных насаждений на склоновых землях Донбасса: автореф. дис....канд. с.-х. наук: 06.03.04/ В.И. Тарасов. – Волгоград, 1988.– 24 с.
190. Тарасов В. И. Процессы поглощения стока и распределения смытого мелкозема на

- малых водосборах противоэрозионных комплексов / В зб.: Агрохімія і ґрунтознавство. 2002. - Вип.63. - С.98-103.
191. Ткач Л. И., Бородавка В.А., Суслов Н.А. Полезащитное лесоразведение - важный элемент противоэрозионного комплекса / Комплекс противоэрозионных мероприятий в действии / УНИИЗПЭ. – Ворошиловград, 1985. – Т. 1. – С. 100.
192. Толоков Н. Р., Бердников В.П. Состояние противоэрозионных водопоглощающих устройств в условиях зимы 1971-1972 гг. / Русский виноград. – Новочеркасск, 1974. – Т. 7(16). – С. 179.
193. Толстых Г. И., Головкин М. И. Почвозащитная эффективность полосного размещения сельскохозяйственных культур на ложбинистых склонах / Комплексное использование овражно-балочных земель Украинской ССР. – Киев: Изд-во Южн. отд. ВАСХНИЛ, 1988. – 120 с.
194. Узолин А.И., Кулик А.В. Экологическая роль прудов: состояние, проблемы, перспективы / Стратегические ориентиры инновационного развития АПК в современных экономических условиях: Материалы международной научно-практической конференции. - Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2016. - С. 185-189.
195. Узолин А.И., Кулик А.В. Экологическая роль гидротехнических сооружений / Эволюция и деградация почвенного покрова: Сб. научных статей по материалам IV Международной научной конференции. – Ставрополь: Издательство «АГРУС», 2015.- С.142-144.
196. Указания по разработке проектов внутрихозяйственного землеустройства с контурно-мелиоративной организацией территории / Укрземпроект. – Киев, 1986.
197. Устойчивость земледелия – проблемы и пути решения / В. Ф. Сайко [и др.]; под ред. В. Ф. Сайко. – Киев: Урожай, 1993. – 320 с.
198. Холупяк К. Л. Эрозия почв и борьба с нею путем противоэрозионного устройства линейных элементов организации территории: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук / К. Л. Холупяк. – Харьков, 1963. – 1007 с.
199. Чорний С. Г. Схилові зрошувані агроландшафти: ерозія, ґрунтоутворення, раціональне використання. – Херсон: Борисфен, 1996. – 171 с.
200. Чуян Г. А. К оценке смывности почвенного покрова / Науч.-техн. бюл. по защите почв от эрозии. – Курск, 1976. – Вып. 8. – С. 8-12.
201. Шабаев А. И. Противоэрозионные рубежи на пашне / Комплекс противоэрозионных мероприятий в действии / УНИИЗПЭ. – Ворошиловград, 1985. – Т. 1. – С. 81-82.
202. Швец Г.И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка (на примере Украины и Молдавии). Л.: Гидрометеиздат, 1974.- 184 с.
203. Шеин Е.В. Агрофизика / Е.В.Шеин, В.М.Гончаров.- Ростов н/Д.: Феникс, 2006. – 400 с.
204. Шелякин Н. М. Комплекс противоэрозионных мероприятий – основа почвозащитной системы контурно-мелиоративного земледелия / Комплекс противоэрозионных мероприятий в действии/ УНИИЗПЭ.– Ворошиловград, 1985.– Т. 1.– С. 13.
205. Шелякин Н.М. Проблема учета стока воды и смыва почвы при изучении эрозионных процессов / Комплекс противоэрозионных мероприятий в действии / УНИИЗПЭ. – Ворошиловград, 1985. – Т. II. – С.35-37.
206. Шелякин Н. М. Теоретические основы почвозащитной контурно-мелиоративной системы земледелия / Основы построения контурно-мелиоративного земледелия на ландшафтной основе в степной зоне: тез. докл. Всесоюз. науч.-практ. конф. – Луганск, 1991. – Т. 1. – С. 7-10.
207. Шикула Н. К. Борьба с расчленением склонов ложбинами – один из важнейших

- вопросов склонового земледелия / Пути увеличения производства сельскохозяйственной продукции. – Киев: Госсельхозиздат УССР, 1963. – С. 136-142.
208. Шикула Н.К., Кабаченко Б.Т., Капштык М.В. Почвозащитная и агрономическая эффективность напашных валов-террас/Комплексное использование овражно-балочных земель УССР. – Киев: Изд-во Южн. отд. ВАСХНИЛ, 1988. – С. 102-113.
209. Эрозия почвы // пер с англ. М. Ф. Пушкарева. – М.: Колос, 1984. – 407 с.
210. Юферов В.Г. и др. Геоинформационные технологии в агролесомелиорации / Юферов В.Г., Кулик К.Н., Рулев А.С. и др.- Волгоград: ВНИАЛМИ, 2010. – 102 с.
211. Brandon D.B. Developing mathematical models for computer control / "G-SAL".– 1959.– N7.
212. Carlos B. Irurtia, Rodolfo Mon. Microsimulador de lluvia para determinar infiltracion a campo. – Castelar, Buenos Aires, Republica Argentina. –17 с.
213. Chepil, W.S. Dynamics of wind erosion: III. The transport capacity of the wind.- / W. S. Chepil. – Soil Sci., 1945.- V. 60, No 6.- P. 474-480.
214. Ellison W.D., 1944. Studies of Raindrop Erosion. *Agricultural Engineering*, 25: 131-136, 181-182.
215. Flanagan, D. C. Water Erosion Prediction Project (WEPP) / D. C. Flanagan, J. M. Laflen // International Workshop on Soil Erosion. – Moscow, Russia. – 1993. – С. 16-35.
216. Free G.R., 1960. Erosion Characteristics of Rainfall. *Agricultural Engineering*, 41, 447-449.
217. Harris Warren S., Watson William S. Graded rows for the control of rill erosion. – "Trans ASAE", 1971. – V. 14. – No 3. – P. 577-581.
218. Hauser, V. L. Evaluation of the Zingg conservation bench terrace / V. L. Hauser, M.B. Cox // American Society of Agricultural Engineers, 1961. – P. 11-14.
219. Hauser, V. L., Van Doren C. E., Robins J. S. A comparison of level and graded terraces in the Southern High Plains / V. L. Hauser, C. E. Van Doren, J. S. Robins. – Translations of the ASAE, 1962. – V. 5. – No 1. – P. 75-77.
220. Morgan, R. P. C. The European Soil Erosion Model: an update on its structure and research base / R. P. C. Morgan // Conserving Soil Resources. – CAB INTERNATIONAL. – 1994. – С. 286-300.
221. Wischemyer, W. H. and Smith D. D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook 537, Washington, D. C. 1978. – № 1685274, 1991.

Интернет-ресурсы

222. Soil conservation in Europe / Frans J.P.M Kwaad. Режим доступа: <http://www.kwaad.net/SoilConservation.html>
223. Сайт НПО «Эргомера. Режим доступа: <https://3432-ua.all.biz>
224. Сайт ФГБНУ «Всероссийский НИИ земледелия и защиты почв от эрозии». Режим доступа: <http://vniizem.ru/> .
225. Сайт Департамента сельского хозяйства США. Режим доступа: <https://www.ars.usda.gov/>
226. Сайт Компании «Измеркон». Режим доступа: <http://izmerkon.ru>
227. Сайт АО "Сафоновский завод "Гидрометприбор". Режим доступа: <http://www.meteogmp.com/products/view/5501>
228. Сайт ЧАО «Тэра». Режим доступа: <http://www.ao-tera.com.ua>.
229. Сайт интернет-магазина Aliexpress <https://www.ru.aliexpress.com/>
230. Сайт ООО «Сибаналитприбор». <http://meteosap.ru/development/optios/>

К. Н. Кулик, А. Р. Зубов, И. Г. Зыков, А. А. Зубов

**МЕТОДОЛОГИЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЛЕСОАГРАРНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ**

В авторской редакции

Компьютерная верстка Зубова А. Р.

Ответственный за выпуск Корпушов С. А.

Подписано в печать 30.04.2018.

Формат 60 x 84/16. Объем 14,0 уч.-изд. л.

Тираж 200 (первый завод 75). Заказ 4.

Отпечатано в соответствии с предоставленным оригинал-макетом
в копировально-множительном бюро ФНЦ агроэкологии РАН
400062, Волгоград, Университетский проспект, 97.