

Ковалев С.Н., Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

**ПОВЕРХНОСТНАЯ И ОВРАЖНАЯ ЭРОЗИЯ В СВЕТЕ ИДЕЙ
Н.И. МАККАВЕЕВА***

Николай Иванович Маккавеев придавал большое значение практическому воплощению научных разработок и, когда после постановления о необходимых мерах по защите почв от водной и ветровой эрозии возникла острая необходимость в Генеральных схемах почвозащитных мероприятий в разрезе административно-территориального деления СССР, он без колебаний взялся за составление таких схем на договорной основе с Министерством сельского хозяйства СССР. Для проведения договорных работ была организована Эрозионно-селевая экспедиция и набраны соответствующие штаты, которые, между прочим, имели самое отдаленное представление об эрозии и мерах борьбы с ней. Первым объектом молодой экспедиции была Кабардино-Балкарская АССР, территория которой простирается практически от Прикаспийской низменности до Главного Кавказского хребта и поэтому отличается очень широким спектром факторов эрозии. Полевые изыскания начались при непосредственном участии Николая Ивановича. Под его руководством были заложены первые почвенно-геоморфологические профили. Когда набралось с десятков профилей, он собрал сотрудников и показал, как надо анализировать эти материалы и вывел зависимость между крутизной склона и сохранившейся мощностью перегнойно-аккумулятивного горизонта в предгорных районах Кабардино-Балкарии. В качестве эталона служили разрезы на пологой привершинной части склона. Такие исследования проводились в каждом административном районе республики и по их результатам были составлены графики зависимости между уклоном и мощностью гумусового горизонта. В камеральный период составлялись карты уклонов для сельскохозяйственных угодий, которые в сочетании с вышеупомянутыми графиками послужили основой для оценки опасности эрозии. Эти карты, по предложению Н.И. Маккавеева, получили название «карты эрозионоопасных земель». Много лет спустя в англоязычной литературе появился термин Erosion Hazardous Lands – полная калька названия, предложенного Николаем Ивановичем. По этой методике были проведены исследования также в Карачаево-Черкессии и Дагестане [Эрозия почв и сели ..., 1970; Защита земель..., 1972].

Потребность в картах эрозионоопасных земель сохранялась и в последующие годы, однако, сроки выполнения работ и финансирование сильно сократились, в связи с чем пришлось полностью отказаться от полевых работ, а оценку интенсивности эрозии проводить с использованием эм-

*Работа выполнена при поддержке проекта для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-1010.2014.5

пирически моделей. В качестве расчетной модели было взято Универсальное уравнение эрозии почв (USLE), широко использовавшееся в США и многих других странах, благодаря хорошей обеспеченности справочно-информационными материалами. Один из ведущих факторов эрозии — эрозионный потенциал дождевых осадков приходилось рассчитывать по данным Гидрометслужбы, составляя соответствующие факторные карты на обследуемые регионы. В конечном итоге карта эрозионного потенциала дождевых осадков была составлена в масштабе 1:8000000 на всю территорию бывшего СССР. Поскольку в отдельных регионах одновременно с процессами водной эрозии развивалась и ветровая эрозия, проводились также работы по составлению карт эрозионного потенциала ветров на территорию СССР.

Вскоре, однако, выяснилось, что использование USLE приводит к сильному завышению расчетной интенсивности эрозии на крутых и, как правило, коротких склонах, а также на длинных пологих склонах. С таким искажением реального положения вещей невозможно было мириться, поэтому были проведены работы по моделированию механизма эрозии почв на основе законов гидравлики и тех сведений о механизмах эрозии, которые были известны в общих чертах в конце 80-х годов прошлого века. Результатом этих исследований явилась гидрофизическая модель эрозии, построенная на вполне очевидных физически обоснованных постулатах и представлении о том, что наносы в потоке снижают его эрозионный потенциал, о чем неоднократно говорил Н.И. Маккавеев [Ларионов, 1993]. Результаты этих исследований послужили для усовершенствования фактора рельефа в USLE, что исключило завышение расчетных значений смыва как на крутых, так и на длинных пологих склонах. Конечным итогом работ этого этапа явилось составление Карты эрозионноопасных земель Российской Федерации в масштабе 1:1500000. На карте показаны выделы, различающиеся по средней потенциальной интенсивности смыва в т/га·год по черному пару. Кроме того, каждый выдел на карте характеризуется процентным соотношением по категориям интенсивности смыва. Такая характеристика стала возможной благодаря точечно-статистическому методу измерения фактора рельефа [Литвин, 1984]. К легенде карты была приложена экспликация — распределение сельскохозяйственных земель по количественным категориям потенциальной интенсивности эрозии в разрезе административно-территориального деления РФ. Была также разработана программа для ЭВМ-расчета комплексов противоэрозионных мер по административно-территориальным единицам Российской Федерации. На рис. 1 приведен фрагмент этой карты. В дальнейшем карта широко использовалась в экологических исследованиях. На ее основе была проведена оценка вклада эрозии почв в загрязнение поверхностных вод биогенами на всей территории России, исследовался баланс стока наносов.

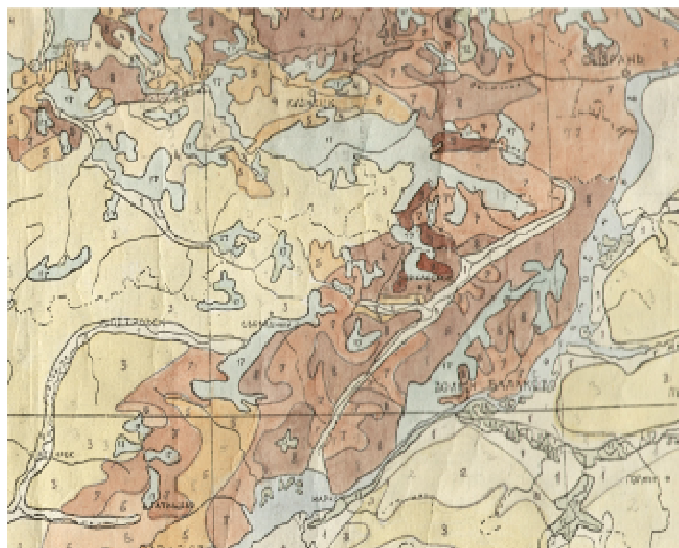


Рис. 1. Фрагмент карты эрозионноопасных земель Российской Федерации масштаба 1:150000.

Наряду с составлением этой карты разрабатывалась методика крупномасштабного картографирования эрозионноопасных земель в разрезе хозяйств. Методика была апробирована на ключевых участках, располагавшихся практически во всех основных сельскохозяйственных районах России, и снабжена комплектом информационно-справочных материалов и компьютерной программой для расчета смыва и проектирования противоэрозионных мер.

Исследования овражной эрозии основаны на учении Н.И. Маккавеева о едином эрозионно-аккумулятивном процессе, объединяющим сеть линейных эрозионных форм на водосборе. Водные потоки, образующиеся в период дождей и снеготаяния (временная сеть) и постоянная речная сеть имеют разные гидрологические и гидравлические характеристики и своеобразные русловые формы. Закономерности строения эрозионной сети, особенно верхних порядков, являются в большой степени зависимыми от морфометрических особенностей водосборов и оцениваются принятыми в практике расчетных оценок стока параметрами гидроморфометрических характеристик склонов и русла водотоков. Всю сложную сеть потоков на водосборах Н.И. Маккавеев [1971] разделяет на три основных звена: нерусловые потоки в приводораздельной части склонов, осуществляющие плоскостную эрозию (смыв почвенного покрова); временные русловые потоки в овражно-балочной сети, транспортирующие смытую почву и размытый грунт на пойму и в русла рек; нижнее звено – постоянные потоки малых и

крупных рек, долины которых и само русло являются местами развития как эрозионных, так и аккумулятивных процессов.

Н.И. Маккавеев отмечал, что наличие овражно-балочной сети обязательно для большинства речных систем. В отличие от подавляющего количества исследователей овражной эрозии, он рассматривал овраги, как естественные формы, на интенсивность появления и развития которых влияет антропогенный фактор [Маккавеев, 1955]. К таким «естественным оврагам» в первую очередь относятся склоновые, которые в процессе роста удлиняют эрозионную сеть и становятся одним из верхних ее звеньев. Овраги «вторичные», водосборами которых являются уже существующие лощины, ложбины и балки, не удлиняют линейную эрозионную сеть. Однако они способствуют углублению базисов эрозии склоновых водосборов и, соответственно, активизации оврагообразования по долинам рек и склонам балок и суходолов.

Подход к оврагообразованию как к естественному явлению, обусловленному комплексом природных факторов, на основе концепции Н.И. Маккавеева о единстве эрозионно-аккумулятивного процесса на водосборе, позволяет разработать принципиальную схему условий возникновения и роста оврагов. Она дает возможность получить закономерности и конкретные количественные характеристики для описания форм проявления овражной эрозии.

Интерес к оврагам, как к линейным эрозионным формам в бассейне реки, возможно во многом обусловлен особенностью их «промежуточного» положения во времени и пространстве. Известно, что реки, балки, суходолы, лощины существуют многие сотни и тысячи лет, оставаясь все той же формой рельефа. В свою очередь, овраг по мере выработки квазиравновесного профиля и зарастания превращается в линейную форму, которую многие исследователи считают возможным относить к балкам (собственно овражная фаза составляет 100-300 лет). Таким образом, овраг выпадает из структуры современной эрозионной сети, как он выпал тысячи лет назад после превращения крупных оврагов древних плювиальных эпох в формы, которые мы теперь относим к балкам. Как отмечалось выше, овраги занимают промежуточное положение, как во времени, так и в пространстве. Большую часть своей «жизни» овраги выполняют роль зоны транзита для материала, смытого на водосборе и переносимого потоками талой и ливневой воды в более крупные звенья эрозионной сети. Овраг – это связующее звено между поверхностью бассейнов и долинами рек и балок. При этом он оказывает непосредственное влияние как на эрозионные процессы, на площади водосбора, так и на русловые процессы в реках и процессы эрозии в днищах балок. Кроме того, овраги в качестве зоны переноса участвуют в формировании бактериального и химического состава речной воды, прямо зависящих от состава удобрений на полях, стоков с дачных участков, гаражных городков и т.д.

Все эти идеи были воплощены в серию карт, составленных под руководством Б.Ф. Косова и Е.Ф. Зориной. Были составлены карты в масштабе 1:2500000 на Европейскую территорию СССР – современной густоты и плотности оврагов, потерь площадей сельскохозяйственных земель от развития овражной эрозии, интенсивности овражной эрозии (модули выноса, м/год км²), потенциала плотности оврагов, потенциала густоты овражного расчленения, возможных потерь площадей сельскохозяйственных земель (потенциала) от развития овражной эрозии, районирования Европейской части России по устойчивости территории к развитию овражной эрозии, нереализованного потенциала плотности овражной сети, нереализованного потенциала густоты овражной сети, нереализованного потенциала потерь площади сельскохозяйственных земель, степени реализации потенциала оврагообразования (по показателю густоты овражной сети), степени реализации потенциала потерь площадей сельскохозяйственных земель, экологического состояния территории России по фактору овражной эрозии (эти материалы были использованы при составлении «Атласа природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации») (рис. 2)) и другие.

В настоящее время, в связи с уменьшением овражной опасности в районах сельскохозяйственного освоения, вызванных как сокращением сельскохозяйственных площадей и более рациональными агротехническими приемами, так и выработкой потенциала овражной эрозии в современных природно-климатических условиях, основное внимание уделяется техногенной овражной эрозии на селитебных территориях и оврагам приуроченных к линейным сооружениям. Разработана классификация населенных пунктов по соотношению к овражно-балочным системам, проведены натурные наблюдения в ряде городов – Калуге, Смоленске, Брянске, Нижнем Новгороде, Елабуге, Набережных Челнах, Муроме, Мценске, Курске. В Москве и Брянске ведутся мониторинговые наблюдения за овражной эрозией.

Большую роль в развитии представлений об овражной эрозии внесли натурные наблюдения на полигоне Боровской учебно-научной станции МГУ. Длительные стационарные исследования позволяют охарактеризовать конкретные количественные параметры соответствующей стадии саморазвития оврага, открывается возможность скорректировать алгоритм расчета интенсивности роста оврага в течение всего периода его активного развития и, что особенно важно, прогноза на перспективу.

Помимо непосредственных натуральных исследований овражной эрозии проводился лабораторный эксперимент. Лабораторный эксперимент позволяет получить характеристику общих закономерностей развития процесса (его саморазвития), исследовать влияние внешних факторов, а также проследить внутрикомпонентные связи (длина – ширина – глубина – площадь – объем), их обусловленность и изменение соотношений параметров в период роста. Это дало возможность получить количественную оценку влияния внешних факторов на развитие оврага при соблюдении постоянства, что важно при составлении алгоритмов развития процесса.

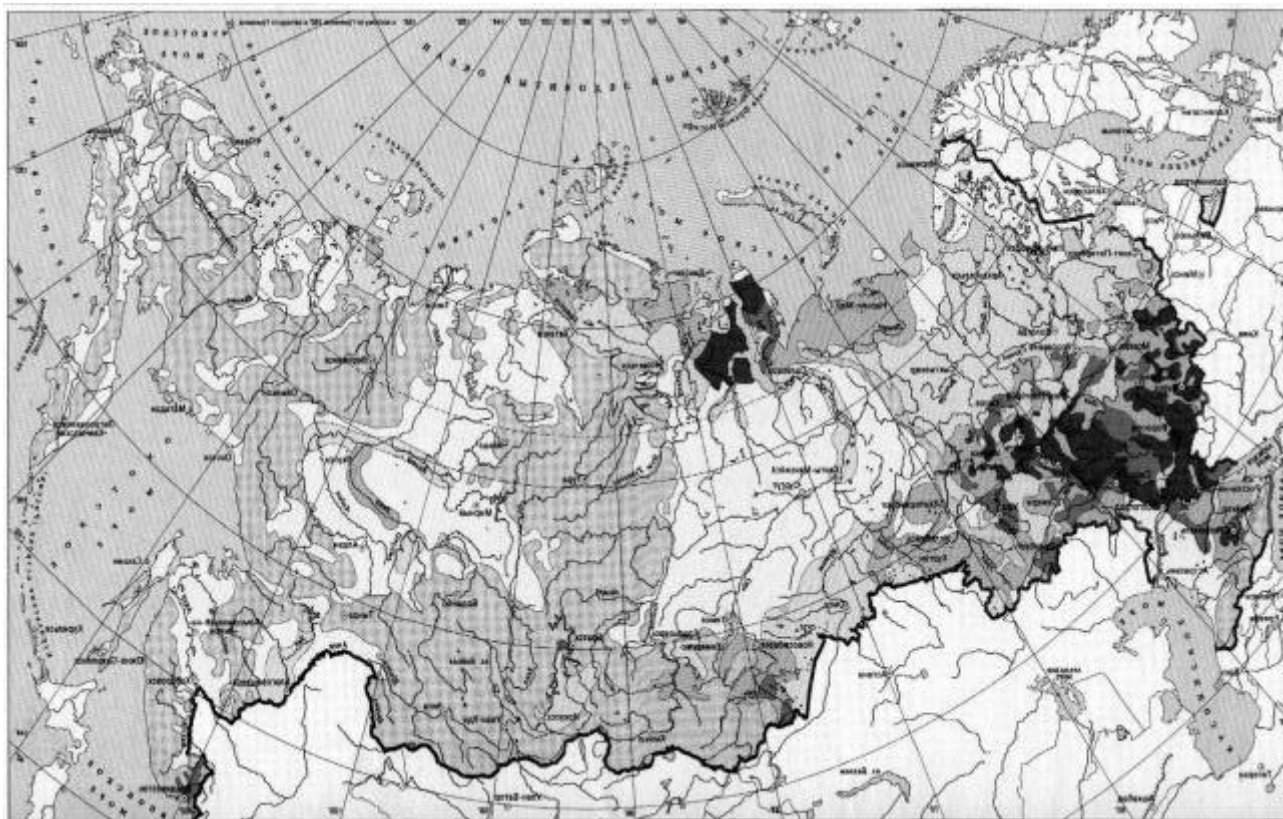


Рис. 2. Карта «Опасность овражной эрозии».

Усовершенствование уравнения фактора рельефа для эмпирических моделей эрозии дало удовлетворительные результаты. Расчетные значения эрозии показали достаточно хорошее совпадение с натурными определениями эродированности почвы на пахотных землях давнего освоения в различных регионах России. Однако такая грубо ориентировочная оценка адекватности гидрофизической модели эрозии представлялась нам недостаточной. Первая успешная верификация модели (рис. 4) была проведена по экспериментальным данным М. Нearing и др. [Nearing et al, 1991], М.С. Кузнецова, Г.П. Глазунова [1985], но, к сожалению, они были получены для узкого, практически близкого к пороговым значениям диапазона скоростей.

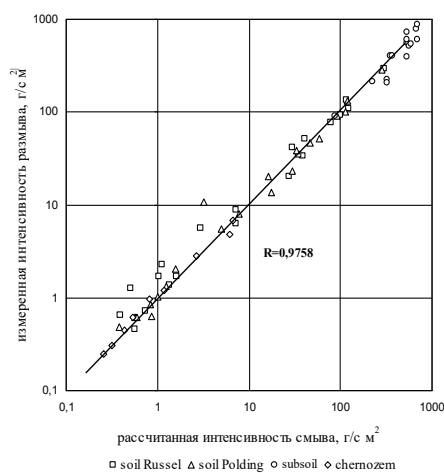


Рис. 4. Расчётные и измеренные значения смыва по данным Нearingа, Кузнецова и авторов

Каковы будут результаты при проведении экспериментов в широком диапазоне скоростей, как советовал Н.И. Маккавеев, оставалось неясным. В связи с этим был построен гидравлический лоток, и начались экспериментальные исследования отрыва частиц почвы, которые составили целый этап в работах Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов.

Прежде чем обратиться к результатам этих работ в самых общих чертах опишем оборудование и методику исследований. Лоток длиной 2,5 м и шириной 20 см располагался на опоре, позволявшей менять наклон лотка в широких пределах. В нижней трети лотка в днище имелся проем, в который помещалась кассета с почвой. Во время опыта по мере размыва образца специальным винтом почва экструдируется из кассеты для поддержания эродируемой поверхности на уровне дна лотка в продолжении всего опыта. В лотках, использовавшихся другими исследователями, [Кузнецов и др., 1985, Nearing et al., 1991] образец не экструдировался из кассеты, и поэтому эксперимент продолжается до тех пор, пока в почве не появится заметная

воронка размыва, существенно изменяющая условия отрыва частиц почвы в потоке. В нашем случае эксперимент, как правило, продолжается до полного размыва образца, что позволяет существенно уменьшить вариабельность результатов.

Глубина потока воды в лотке во всех экспериментах была постоянной и равной 1 см. Такая глубина выбрана не случайно. В гидрофизической модели эрозии смыв рассматривается как функция куба средней скорости в придонном слое воды толщиной в 1 см, а эродируемость, соответственно, определяется как частное от деления интенсивности смыва на куб скорости потока. При такой глубине исключается пересчёт средней скорости потока на среднюю скорость в придонном слое потока глубиной в 1 см, что может являться дополнительным источником ошибок. Вода в лоток подаётся из насадка с отверстием прямоугольной формы высотой 1 см и шириной, соответствующей ширине лотка. Таким образом, уже на входе потока в лоток его скорость равна заданной величине, и, если подобран соответствующий расход, остаётся только отрегулировать уклон.

Согласно гидрофизической модели эрозии смыв при скорости потока, в 1,5-2 раза превышающей пороговое значение, должен быть пропорционален кубу скорости потока. Проверка этого положения была проведена на модельных образцах почвы плотностью $1,2 \text{ г/см}^3$. Результаты подтвердили это положение (рис. 5).

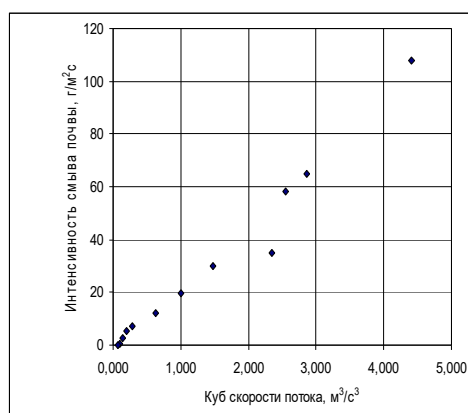


Рис. 5. Зависимость интенсивности размыва модельных образцов почвы плотностью $1,2 \text{ г/см}^3$ в диапазоне 0,3-1,7 м/с.

На следующем этапе работ исследовали влияние наносов на эродирующую способность потока, так как по этому вопросу нет единого мнения. Н.И. Маккавеев полагал, что наносы в потоке существенно снижают его эродирующую способность. Г.Р. Фостер [Foster et al., 1989] придерживался того же мнения и считал, что эродирующая способность потока пропорциональна разности между транспортирующей способностью потока и содер-

жанием взвешенных и влекомых наносов. Напротив Ц.Е. Мирцхулава [Мирцхулава, 1970], исходя из того, что в ложе склоновых ручьев никогда не наблюдается отложений наносов, если только уклон существенно не уменьшился, утверждал, что наносы не оказывают влияния на эродирующую способность склоновых потоков.

Эксперименты проводились как с влекомыми наносами различной плотности и твердости, так и с взвешенными наносами. Результаты показали, что влекомые наносы, твердость которых меньше или сопоставима с твердостью почвы, снижают эродирующую способность потока. Плотность наносов также оказывает заметное влияние на этот процесс: наносы сопоставимые по плотности с почвой снижают эродирующую способность потока меньше, чем более легкие наносы. Твердые донные наносы, (например, кварцевый крупнозернистый песок), увеличивают скорость размыва почвы благодаря коррозионному эффекту. Общее представление о роли донных наносов дает рис. 6.

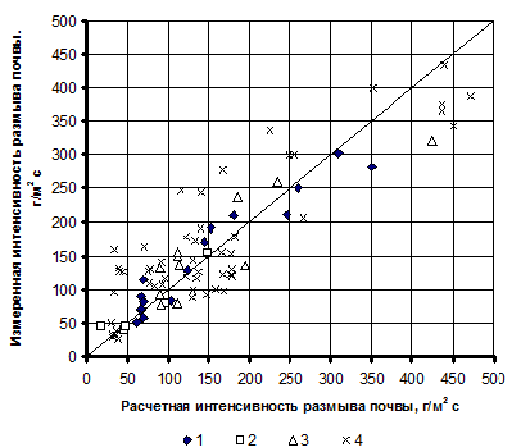


Рис. 6. Измеренная и рассчитанная по уравнению 2 интенсивность смыва почвы.

1 – провод в оболочке, 2 – резина, 3 – кварц, 4 – поролон.

Большой разброс данных объясняется недостатком насосов – искусственные частицы наносов частично задерживались в улитке насоса, и в продолжение опыта не всегда удавалось поддерживать постоянную концентрацию наносов. Уравнение, описывающее влияние наносов на смыв имеет вид

$$W_n = We^{aC_n + bC_m}$$

где W и W_n – интенсивность размыва почвы или грунта в потоке без наносов и с наносами, соответственно, г/м²с; e – основание натуральных логарифмов.

мов; C_m и C_t – количество наносов, соответственно мягких и твердых, приходящихся на единицу поверхности ложа потока, шт/м²; a и b – коэффициенты, значения которых зависят от физических свойств материала наносов. Для наносов, состоящих из эластичного материала, твердость которого меньше или равна твердости размываемой почвы или породы, коэффициент имеет отрицательное значение. Для «твердых» наносов коэффициент принимает положительное значение.

Взвешенные наносы оказывают не меньшее влияние на смыв почвы, чем влекомые, но механизм в этом случае иной. Частицы взвешенных наносов время от времени неизбежно опускаются на дно, попадая в поры между почвенными агрегатами, остаются там, цементируя поверхностный слой почвы, что приводит к уменьшению эродируемости образца. Если в эксперименте вода фильтруется через почвенный образец, то, естественно, цементация образца протекает быстрее, и снижение эродируемости протекает интенсивнее, чем при отсутствии фильтрации воды через образец. Уже при концентрации взвешенных наносов в несколько граммов на литр скорость размыва образца снижается. С уменьшением плотности почвы влияние взвешенных наносов на размыв увеличивается. Влияние взвешенных наносов описывается следующей зависимостью $\ln K_m = \ln K_c - a(\ln M - b)$ где K_m – эродируемость почвы в мутном потоке, м²/с²; K_c – эродируемость в потоке чистой воды, м²/с²; M – мутность потока, г/л.

Коэффициенты a и b определяются по зависимостям: $a = 16,15\gamma^2 - 42,02\gamma + 26,44$, $b = -7,76\gamma^2 + 21,41\gamma - 13,67$, где γ – плотность почвы, г/см³.

Так как взвешенные и донные наносы неоднозначно влияют на смыв почвы, то для оценки суммарного эффекта наносов на эрозию почвы в склоновых потоках необходимо располагать сведениями не только о количестве наносов на всем протяжении ручейков, но и соотношении донных и взвешенных наносов.

Для решения этой задачи может быть полезным исследование истирания почвенных агрегатов в процессе из транспорта потоком воды. Эксперименты проводили в лотке длиной в 10 метров и шириной 0,1 м, дно которого было выложено окатанной мелкой галькой и залито сверху смесью молотой черноземной тяжелосуглинистой почвой с клеем ПВА для придания дну шероховатости, близкой к естественной для черноземных почв. Специально отобранные из фракции 1-2 мм агрегаты в количестве 20 штук взвешивались и укладывались на фильтровальную бумагу. За 10-12 часов до эксперимента агрегаты увлажнялись снизу. Влажную навеску смывали с фильтровальной бумаги в лотке и улавливали на выходе из него на сито с ячейками 0,25 мм. И сита оставшиеся агрегаты смывали в чашку, а затем вновь переносили в начало лотка.

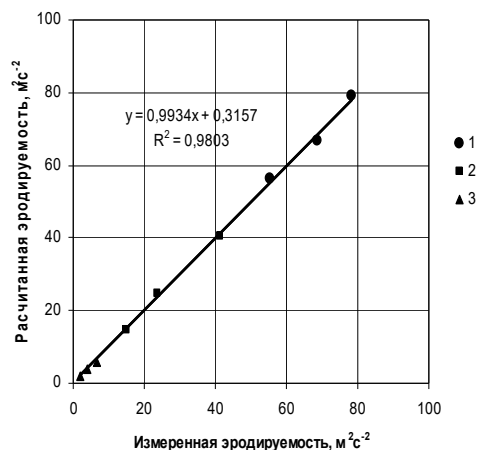


Рис. 7. Сопоставление измеренных и рассчитанных значений эродруемости почвы:

1. – плотность 1,3 г/см³; 2 – плотность 1,2 г/см³; 3 – плотность 1,1 г/см.

Такую операцию проделывали столько раз, сколько требовалось для пути пробега агрегатов: в 10, 20, 50, 100 и 200 метров. По достижении заданного пути пробега остатки навески высушивали и взвешивали. Анализ полученных материалов показал, что уравнение Штернберга не описывает истирания почвенных агрегатов, что вероятно связано с различиями в способе перемещения в потоке обломков породы и почвенных агрегатов. Как показали эксперименты, почвенные агрегаты движутся путем сальтации, и истирание может иметь место лишь при касании агрегатами дна потока, в то время как обломки породы перемещаются потоком путем качения или влечения, т.е. их истирание происходит на протяжении всего пути движения. С учетом того обстоятельства, что истирание почвенных агрегатов происходит только в момент их касания дна потока, было получено полуэмпирическое уравнение истирания агрегатов следующего вида:

$$P_x = P_0 e^{b(-dH^{-0.5} I^{0.5})x^c}$$

где P_0 и P_x – начальный и конечный, после пробега пути длиной x метров вес агрегата, I – уклон, H – глубина потока, d – диаметр агрегатов. Коэффициенты b и c определяются по следующим зависимостям:

$$b = 0,21 - 0,025d$$

$$c = 1,65 - 0,225d$$

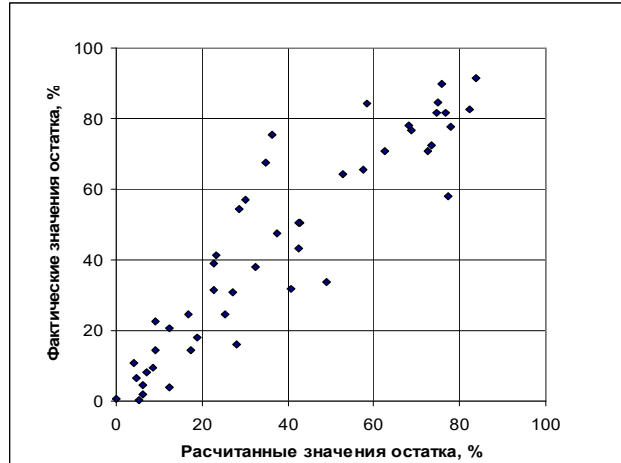


Рис. 8. Сопоставление рассчитанных и измеренных значений веса агрегатов после пробега пути длиной от 10 до 200 метров ($R=0,92$).

Для ручейков на пашне достаточно характерны резкие изломы. Н.И. Маккавеев [1971] отмечал, что на плановых изгибах русла смыв почвы усиливается благодаря «гидромониторному эффекту». В целях изучения влияния угла подхода оси струи потока к берегу (угла атаки) на интенсивность смыва почвы был изготовлен набор вкладышей, при помощи которых в лотке создавался изгиб оси потока под различными углами. Кассета с образцом почвы располагалась на боковой стенке лотка. В качестве контроля служили данные о смыве образца, расположенного на прямолинейном участке боковой стенки. Результаты показали, что во всем диапазоне углов атаки (от 0 до 500) скорость размыва образцов на боковой стенке растет. Если исходить из положений, лежащих в основе гидрофизической модели эрозии [Ларионов, Краснов, 2000], то скорость размыва борта на изгибе русла должна быть пропорциональной кубу скорости потока у стенки на изгибе. В этом случае скорость размыва (W_{40} – скорость размыва при угле атаки 400) должна быть в 1,34 раза больше чем при нулевом угле атаки (W_0), что следует из пропорции

$$W_{40} = \frac{W_0 u_{40}^3}{u_0^3},$$

где u_0 и u_{40} – скорости потока у образца на прямолинейном отрезке русла и на изгибе, соответственно. Однако экспериментальные данные показывают, что скорость размыва в этом случае существенно (в 1,73 раза) выше, чем следует из гидрофизической модели эрозии. Поиск зависимости скорости размыва от угла атаки привел к следующему уравнению

$$W_a = W_0(1 + \sin^3 a),$$

где W_0 и W_a – скорость смыва при углах атаки 0 и α , соответственно. Эта зависимость дала хорошие результаты (рис. 9) После параметризации это уравнение приняло вид:

$$W_a = W_0[0,6897(1 + \sin^3 a) + 0.3124]$$

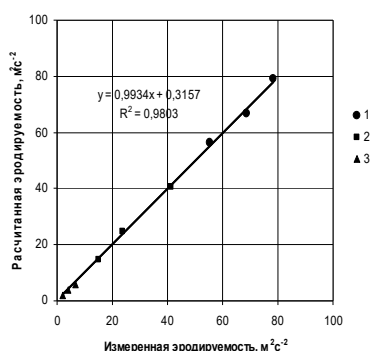


Рис. 9. Связь между $1 + \sin^3 \alpha$ и относительной интенсивность размыва на изгибе русла.

Таким образом, получено уравнение размыва борта ручейка на изгибе русла, однако, сами количественные оценки боковой эрозии не выявлены. В связи с этим был изготовлен лоток в виде гидравлической трубы, вращая которую можно было располагать поверхность образца почвы под любым углом к горизонту. Элементарный анализ сил действующих в потоке в процессе эрозии, показывает, что при отрыве частиц со дна потоку придется преодолеть силу тяжести частиц, если же поток срывает частицу с борта, то сила тяжести напротив способствует отрыву частицы. Оценить роль ориентации размываемой поверхности относительно горизонта можно по безразмерной зависимости:

$$y = 1 - \frac{\cos a(\rho_p - \rho_0)gd}{\rho_0 v^2}$$

где y – относительный размыв, ρ_p и ρ_0 – плотность частицы и воды, соответственно, g – ускорение силы тяжести, d – диаметр частицы, v – скорость потока. Из уравнения следует, что при скорости потока близкой к её критическому значению, различия между скоростью размыва дна и боковой стенки будут максимальными – дно размываться практически не будет. При большой скорости потока различия между скоростью размыва дна и борта будут

сглаживаться. Экспериментальные исследования в гидравлической трубе подтвердили теоретические выводы (рис. 10)

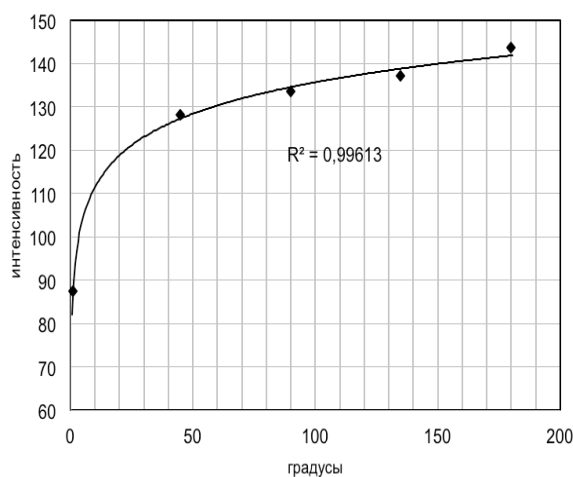


Рис. 10. Зависимость интенсивности размыва ($\text{г/м}^2\text{с}$) от положения поверхности образца относительно горизонта при средней скорости потока 0,97 м/с.

Как следует из рисунка 10, уже при крутизне в 45° скорость размыва борта почти в 2 раза превосходит скорость размыва дна. С ростом ширины потока при прочих равных условиях относительная шероховатость русла будет расти, в результате чего скорость потока упадет до критического значения, и размыв прекратится. С другой стороны, накопление в потоке крупных зерен песка может ускорить размыв дна благодаря корродирующему эффекту. Накопление же взвешенных частиц в потоке ведет к торможению размыва дна. Таким образом, результирующее соотношение ширины и глубины размыва определяется комплексом факторов.

При исследовании влияния плотности образцов на их эродируемость были получены результаты, которые вызвали сомнение в корректности одного из положений гидрофизической модели эрозии, согласно которому в области скоростей, превышающих в 1,5-2 раза пороговое значение, смыв пропорционален кубу скорости потока. При уплотнении монозернистой, увлажненной до пластичного состояния навески почвы в кассете почвенные агрегаты деформируются в точках соприкосновения. Ориентировочные расчеты показывают, что суммарная площадь контактов агрегата с соседними находится практически в линейной зависимости от плотности образца. Если принять, что общее сопротивление частиц почвы отрыву пропорционально площади ее контактов с соседними агрегатами, то эродируемость также должна находиться в обратной линейной зависимости от плот-

ности образца. Однако это достаточно очевидное заключение не согласовалось с экспериментальными данными (рис. 11).

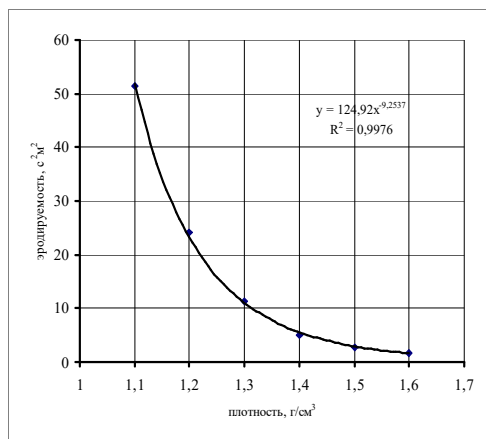


Рис. 11. Зависимость эродируемости от плотности почвы (для плотности 1,1 и 1,2 г/см³ эродируемость почвы определялась по результатам размыва при скорости 0,76 -0,77 м/с, для остальных вариантов - при скорости 1,5м/с).

Эксперименты с образцами плотностью 1,3-1,6 г/см³ проводились при скорости 1,5 м/с с целью сокращения продолжительности опытов. При этом полагалось, что проведение экспериментов при различной скорости потока не должно сказаться на результатах, так как согласно принятой модели эрозии эродируемость почвы не зависит от скорости потока. Для дополнительной проверки этого положения были проведены эксперименты с образцами плотностью 1,4 и 1,5 г/см³ в достаточно широком диапазоне скоростей. Результаты показали, что при скорости около 0,8 м/с наблюдается резкий перегиб в зависимости куб скорости потока – интенсивность смыва (рис. 12). Таким образом, эродируемость, рассчитываемая как частное от деления скорости размыва на куб средней скорости потока, скачкообразно изменяется почти на порядок величины.

Этот факт не находит объяснения в известных представлениях о механизме разрушения связей между частицами почвы. Известно, что сопротивление частиц почвы отрыву на три порядка превышает те касательные напряжения, которые склоновые потоки оказывают на свое ложе. Ц.Е. Мирцхулава [1970] полагает, что нарушение связей между частицами на ложе потока носит усталостный характер и происходит в результате пульсирующих нагрузок. М.А. Неаринг [Nearing,1991] считает, что отрыв частиц почвы совершается в точках отрыва вихрей со дна потока, где в эти моменты касательное напряжение увеличивается на 2 порядка в сравнении со средними значениями. Случай подсказал иное решение этой проблемы.

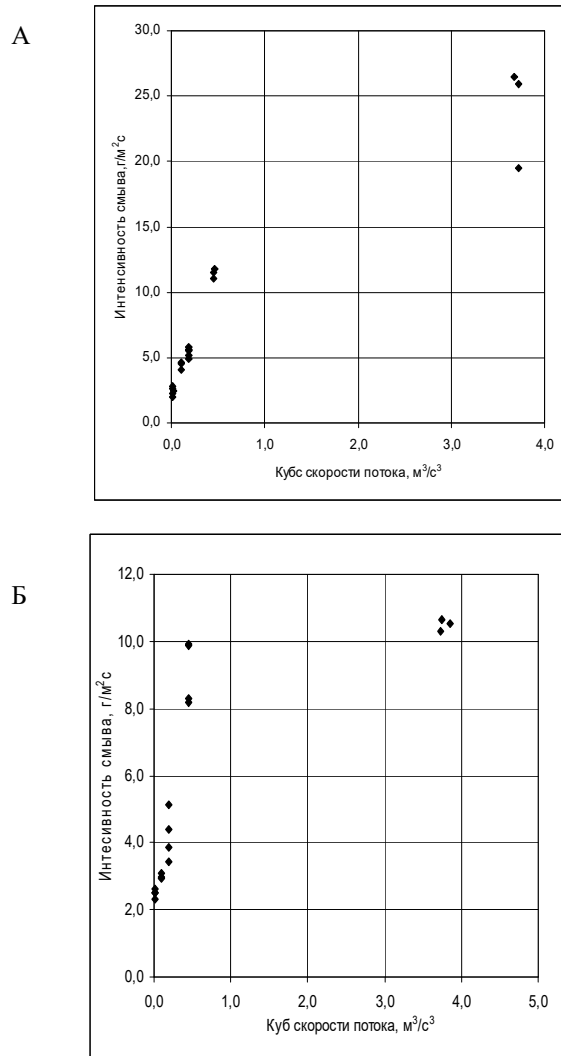


Рис. 12. Зависимость скорости размыва модельных образцов почвы от куба скорости потока. А-плотность 1,4 г/см³, Б - плотность 1,5 г/см³.

В течение одной серии опытов скорость размыва образца в каждом последующем опыте заметно увеличивалась. Все условия проведения экспериментов не изменялись, за исключением температуры воды, которая увеличивалась от 13 до 20-25С° за счет превращения механической энергии воды, сообщаемой ей насосом, в тепловую. Тогда был поставлен специальный эксперимент с целью изучения влияния температуры вода на скорость

размыва образца. В эксперименте скорость меняли с шагом в 5 градусов в диапазоне от 0 до 25°C. Результаты эксперимента показали, что температура оказывает большое влияние на скорость размыва модельных образцов почвы (рис. 13).

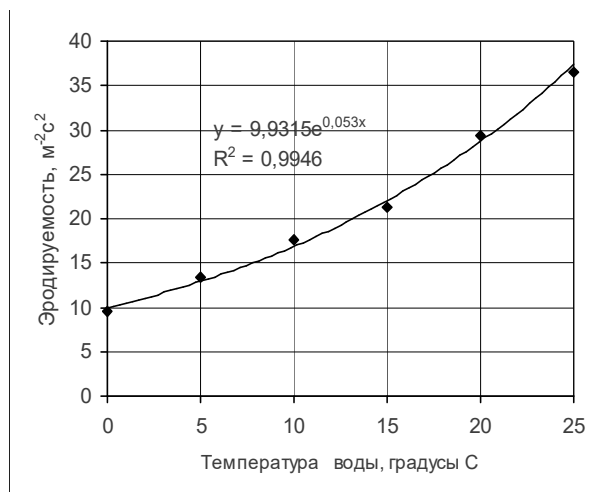


Рис. 13. Зависимость интенсивности размыва образцов от температуры воды.

При повышении температуры на 10 градусов скорость размыва увеличивается в 1,5- 1,6 раза, т.е. практически соответствует правилу Вант-Гоффа, которое отражает влияние скорости молекул и силы их соударений на скорость реакции. Поскольку при отрыве частиц почвы потоком не приходится говорить о реакциях, то, очевидно, молекулы воды тем быстрее проникают между частицами почвы, чем выше и их скорость хаотического (броуновского) движения, и тем быстрее они приводят к нарушению связей между частицами почвы, которые обусловлены Ван-дер-Ваальсовыми силами. Как известно, эти силы относятся к короткодействующим, и, вероятно, незначительное увеличение расстояния между частицами почвы, вызванное внедрением молекул воды в контактную зону между агрегатами, приводит к резкому ослаблению межмолекулярного притяжения. В связи с этим можно предположить, что разрушение связей между частицами почвы происходит под воздействием воды, но воды не в виде потока, а как химического вещества дипольного строения.

Для проверки этого предположения была проведена серия экспериментов, в продолжении которых чередовались фазы с движущейся водой (активная фаза) и фаза с неподвижной водой (пассивная фаза), в течение которой образец почвы оставался под слоем воды такой же глубины, как в

потоке. Результаты эксперимента приведены на рис. 14. Они свидетельствуют о том, что вода и в неподвижном состоянии разрушает связи между частицами почвы, а поток захватывает частицы почвы, лишившиеся сцепления с соседними и в том числе с нижележащими частицами.

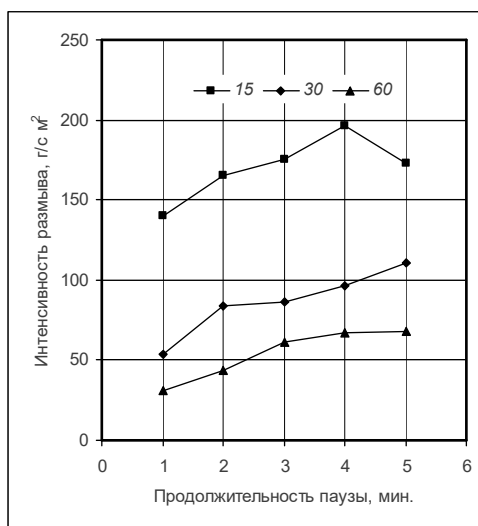


Рис. 14. Влияние продолжительности пассивных (без потока) и активных (с потоком) фаз длительностью 15, 30 и 60 секунд на интенсивность размыва образцов почвы в экспериментах с чередованием пассивных и активных фаз.

Визуальные наблюдения показали, что в первые секунды после пуска воды в активной фазе вынос частиц почвы протекает очень быстро, а затем лишь периодически срываются одна или несколько частиц, то есть в пассивную часть эксперимента происходит активное разрушение связей между частицами почвы. График показывает также, что в пассивную часть эксперимента разрушение связей между частицами происходит с замедлением. Это, вероятно, связано с пригружающим эффектом вышележащего слоя частиц почвы.

Таким образом, эксперименты подтвердили представление о том, что разрушение связей между частицами почвы происходит под воздействием молекул воды, и что поток захватывает частицы уже лишившиеся связи с нижележащими слоями почвы. Эти факты проливают свет и на резкий перегиб на графиках зависимости смыва от куба скорости потока (рис 14). На первом линейном отрезке скорость разрушения связей между частицами за счет расклинивающего действия воды превышает способность потока захватывать свободно лежащие частицы почвы. С увеличением скорости потока его эродирующая способность растёт, и свободнолежащих частиц на

поверхности почвы становится меньше, что, в свою очередь, благодаря снижению эффекта пригружения, приводит к увеличению скорости разрушения связей между частицами. Такой процесс может продолжаться до того момента, когда эродирующая, а вернее способность потока захватывать частицы, не начинает превышать темпы разрушения связей между частицами в результате расклинивающего эффекта воды. С этого момента скорость размыва лимитируется темпом разрушения связей между частицами водой, а дальнейший рост скорости размыва происходит за счет захвата потоком частиц почвы с неполностью разрушенными связями. При этом по мере дальнейшего увеличения скорости потока может срывать частицы со все менее разрушенными связями. В этой области вероятно зависимость скорости смыва также будет находиться в линейной зависимости от куба скорости, но эродируемость (тангенс угла наклона линии на графике к оси ординат) будет существенно меньше, чем в первой области.

Таким образом, благодаря экспериментальным исследованиям последних лет, в новом свете представился механизм эрозии связных грунтов. Вместе с более ранними нашими исследованиями они будут полезны при решении многих задач теоретического и прикладного характера в области поверхностной и овражной эрозии.

ЛИТЕРАТУРА

Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 1985.

Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993.

Ларионов Г. А., Краснов С. Ф. Вероятностная модель размыва почв связных грунтов // Почвоведение. 2000. №2.

Литвин Л.Ф. Оценка рельефа при средне- и мелкомасштабном картографировании эрозионноопасных земель // Актуальные вопросы эрозиоведения. М.: Колос. 1984

Маккавеев Н. И. Сток и русловые процессы. М.: МГУ. 1971.

Мирихулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 1970.

Эрозия почв и сели Кабардино-Балкарии. Нальчик: Эльбрус. 1970.

Защита земель Карачаево-Черкесской АО от эрозии и селей. Черкесск. 1972.

Foster G.R., Lane L.J., Nearing M.A., Finkner S.C., Flanagan D.C. Erosion component // USDA – Water erosion prediction project: hillslope profile model documentation. Report No 2. W. Lafayette. 1989.

Nearing M. A. A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow // Trans. ASAE. 1991. Vol. 34.

Nearing M. A., Bradford J. M., Parker S. C. Soil detachment by shallow flow at low slopes. J. of Am. Soil Si. Soc. 1991. V. 55. № 2.