

СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ ИДЕЙ Н.И. МАККАВЕЕВА О МЕХАНИЗМАХ ЭРОЗИИ НА СКЛОНАХ¹

Научные интересы Н.И. Маккавеева как ученого-географа, направленные, прежде всего, на исследования жизни речных русел, охватывали также весь комплекс флювиальных процессов, начиная от стока с единичного склона и завершая механизмом формирования пенеплена. Главное в его научном творчестве, вероятно, в системности подхода к анализу всего флювиального комплекса суши в неразрывной связи с жизнью ландшафта – идея, которая сейчас стала аксиомой, само собой подразумевающейся основой любого масштабного эрозионно-руслового исследования. Но фундаментом анализа самых сложных эрозионно-ландшафтных систем для него всегда служили исследования физических основ механизма процессов. Глобальность научных построений органически сочеталась в его трудах с детальными тонкими исследованиями физики частных проявлений и деталей функционирования отдельных элементов флювиальной системы, начиная с механизма врезания реки в растущую складку и кончая истиранием наносов в процессах транспорта или микробиологическими процессами подводного выветривания. Сейчас становится очевидным, что без знаний подобных деталей решения большого круга задач флювиальной и палеогеоморфологии – всего лишь версии с неопределенной степенью достоверности.

Разумеется, Н.И. Маккавеев не имел возможности детально проработать все свои идеи и гипотезы, но их перспективность и верность основы доказывается интересом к ним современной науки. Ниже мы попытались отразить судьбу нескольких его идей в области механизмов эрозии на склонах.

К числу таких весьма перспективных идей в области механики эрозионных процессов относится предствление о побудителе эрозии. Экспериментальные наблюдения разрушающего почву воздействия дождевых капель были проведены Н.И. Маккавеевым в 1948 г. [1] почти одновременно с известными исследованиями В. Эллисона [2]. Эти работы впервые количественно охарактеризовали важнейший аспект функционирования ливневой эрозии почв – разрушающую работу дождевых капель. По мнению Дж. Сталлингса, “открытие того факта, что дождевые капли являются главным фактором водной эрозии, кладет конец эре бесплодной борьбы человека с эрозией почв...” (цит. по Н. Гудзону, [3]). Активизация эрозионной деятельности нерусловых склоновых потоков под воздействием ударов дождевых капель и степень этой активизации установлены многочисленными экспериментами как в России, так и за рубежом. Эффект “разбрызгивания” почвы достигает десятков тонн с гектара, а мутность пластовых и мелкоструйчатых нерусловых потоков за счет разрушения структуры почв каплями и добавочной турбулентности повышается на два порядка величины [3]. Так, абсолютные значения мутности при дождевании пахотных почв различного генезиса и гранулометрического состава (серозем типичный, чернозем обыкновенный, бурая горно-лесная и др.) с помощью дождевальной установки “Эра-2”, обеспечивающей близкие к естественным параметры ливневых осадков, достигала 30–40 г/л. Интенсивность смыва эрозионно-устойчивых бурых горно-лесных почв за время дождевания (слой осадков 60 мм, крутизна склона 9° при длине склона 2.4 м) достигала 5–16 т и более в пересчете на гектар. Такая активизация эрозии обусловлена целым комплексом явлений. Помимо отрыва частиц, при ударах капель происходит разрушение почвенной структуры и образование на поверхности уплотненной слабопроницаемой “корочки”, что приводит к снижению шероховатости, росту расходов и средних скоростей сто-

¹ Выполнено при поддержке РФФИ (проект 06-05-64637) и гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-790.2008.5).

ка. При дождевании малых площадок с параметрами дождя близкими к натурным (при диапазоне уклонов склона от 0.05 до 0.2 и интенсивности дождя 0.18–4.12 мм/мин) средние скорости пластовых потоков составляли 0.01–0.07 м/с [4].

Совершенно оригинальной была идея Н.И. Маккавеева об интенсификации смыва плоскостным потоком, возникающей за счет “добавочной турбулентности” и волновой толчеи при ударах дождевых капель. Была дана первая количественная оценка турбулизирующей роли капель – максимальное воздействие капель на дно потока происходит при его глубине в 10–12 мм, а при дальнейшем увеличении глубины кинетическая энергия капель гасится, и соответственно, падают эродирующая и транспортирующая способности потока [5]. Позднее, для общей характеристики эффекта собственно турбулизации и “разбрызгивания”, была проведена серия дождеваний малых стоковых площадок, при которых в стадии установившегося стока, т.е. после образования уплотненного слоя, поверхность почвы защищалась от ударов капель тканевым экраном, легко пропускающим воду, но гасящим энергию капель. В результате оказалось, что смыв экранированной почвы снижался на порядок величины [6].

На физическом (гидромеханическом) уровне эффект собственно турбулизации изучен весьма слабо. Однако ясно, что натурные скорости стекания пластовых потоков, в большинстве случаев, недостаточны для размыва почв. Мощным фактором увеличения эродирующей способности потока при его турбулизации является рост мгновенных скоростей в турбулентных вихрях, что обеспечивает более быстрый и массовый отрыв от ложа слагающих частиц грунта. Одним из показателей турбулизации служит так называемый “коэффициент перегрузки”, равный отношению максимальных мгновенных скоростей в потоке к их осредненным величинам. В результате детальных исследований при поливе дождеванием в потоках, изолированных и не изолированных от дождевых капель, была установлена теоретически обоснованная зависимость изменения коэффициента перегрузки при добавочной турбулентности от скорости потока, размывающей скорости и величины коэффициента перегрузки аналогичных, изолированных потоков [7].

Факты постепенного ослабления эрозии вниз по склону и смене ее аккумуляцией в пластовых потоках послужили Н.И. Маккавееву обоснованием гипотезы “нивелировки склонов сверху”, т.е. снижения абсолютных отметок поверхности без изменения формы продольного профиля дельювиального склона. “Если исходить только из особенностей механизма эрозии, вызываемой нерусловым стеканием во время дождя, то под действием таких потоков склон должен, в конце концов, сnivelироваться” [5, с. 41]. В последующем, возможность такой нивелировки была подтверждена измерениями результатов эрозионного эпизода на пахотном склоне на Северном Кавказе. Подтвердилось, что на прямом склоне, если точка, “где мощность слоя аккумуляции сравнялась с мощностью денудационного среза, приурочена примерно к середине расстояния от вершины до подошвы” [8], нивелирование склона происходит без преобразования формы продольного профиля [9, с. 23]. Четкая тенденция к снижению модулей стока воды и наносов вниз по склону была зафиксирована продолжительными натурными экспериментальными наблюдениями за смывом почв с помощью малых лотков стокоуловителей на крутых склонах (24–27°) в лесу и на лугу [10]. Результаты этих наблюдений также подтверждают более быстрое снижение отметок верхней части склонов, но сохранение формы продольного склона не столь очевидно. Просматриваются три допущения: 1) обязательное срединное положение “равновесной” точки; 2) равномерное увеличение интенсивности аккумуляции вниз по склону; 3) отсутствие зоны транзита между зонами смыва и аккумуляции.

Достоверной аналогией развития процессов на прямом склоне могут служить эксперименты полива по бороздам с единым строго выдержанным уклоном, при которых протяженность зон эрозии, транзита и аккумуляции на склоне измеряется достаточно точно. Причины снижения транспортирующей способности вниз по поливной борозде здесь иные, чем в нерусловых потоках на склонах, но само снижение, так же как и на склоне, пропорционально расстоянию от головной части потока. В опытах с поливом

сероземов зона активной эрозии сменялась вниз по склону зоной аккумуляции. Промежуточные транзитные участки практически отсутствовали. Длина зоны активной эрозии, в зависимости от расхода воды, уклона борозды, продолжительности полива и других факторов, составляла от 30 до 100% длины опытной борозды [11]. Таким образом, положение равновесной точки оказалось не стабильным и в большинстве случаев приходилось, по-видимому, на нижнюю треть склона.

С.Ф. Краснов, предложив ряд уравнений, описывающих преобразования уклона и высотных отметок прямого орошаемого склона, показал, что после выполаживания привершинной части склон достигает стадии выработанного продольного профиля с одинаковыми уклонами и степенью денудации по всей длине [4]. В дальнейшем, вне зависимости от первичной формы, склон преобразуется в выпуклый, если его длина не превышает длину поливной борозды т. е. в естественных условиях ширину пояса плоскостного смыва. Для случаев ливневой эрозии расчеты дают тот же эффект, если мощность смытого слоя почвы убывает с длиной склона. Но при увеличении этой мощности, т. е. при развитой ручейковой эрозии, первоначально прямой продольный профиль приобретает выпукло-вогнутую форму. Таким образом, положение Н.И. Маккавеева о “нивелировании” склона под воздействием плоскостного стока на начальных этапах его эрозивного преобразования подтвердилось.

Для математического моделирования склоновой эрозии востребованными оказались идеи [5, 12], касавшиеся гидрофизических основ эрозивных процессов, а именно: 1) эродирующая и транспортирующая способность потока пропорциональна его мощности; 2) частицы наносов, включая и взвешенные, периодически опускаются на дно и в зависимости от ряда условий могут вновь вовлекаться в движение или покоиться на дне; 3) донные наносы в зависимости от их твердости по отношению к породе, слагающей русло потока, могут замедлять или ускорять эрозию ложа потока; 4) эродирующая способность потока возрастает, если на предыдущем отрезке пути он лишился наносов; 5) в склоновых ручьях при подходе потока к берегу под углом скорость размыва существенно возрастает вследствие “гидромониторного эффекта”.

На этих положениях основаны посылки, разработанной в НИЛ эрозии почв и русловых процессов МГУ первой гидрофизической модели склонового смыва: 1) эрозия – работа водного потока (в физическом смысле) по отрыву и последующему транспорту сорванных с его ложа частиц почвы, совершаемая за счет его кинетической энергии; 2) отрыв частиц совершается теми струями потока, скорость которых превышает величину пороговой (размывающей) скорости, т. е. превышает минимальное значение скорости, обеспечивающей массовый отрыв частиц; 3) наносы в зависимости от их свойств и содержания в потоке замедляют или ускоряют отрыв частиц почвы.

Заменяя мощность работой, для того чтобы подчеркнуть, что не вся энергия потока затрачивается на отрыв частиц почвы, после несложных математических построений получаем:

$$W = k\rho u^3, \quad (1)$$

где W – вес сорванных со дна потока частиц в единицу времени (интенсивность отрыва частиц почвы), k – коэффициент пропорциональности, ρ – плотность воды, u – скорость потока. Таким образом, следствие, вытекающее из первой посылки, полностью согласуется с идеей Н.И. Маккавеева.

Вторая посылка учитывает отсутствие/незначительность отрыва частиц почвы при средней скорости потока существенно меньшей пороговой величины. В области скоростей потока, близких к пороговым значениям, отрыв частиц могут производить только те отдельные струи потока, мгновенные значения скорости которых превышают пороговую величину. Но частицы почвы различаются по крупности, по величине сцепления с другими частицами, по положению относительно дна, что в конечном итоге обуславливает большую изменчивость сопротивления отдельных частиц отрыву. Поэтому отрыв частиц потоком имеет вероятностный характер. Его возможность и массовость определяются произведением вероятностей двух событий. Это – вероят-

ность достижения мгновенными скоростями в отдельных струях величин, обеспечивающих отрыв частиц, отличающихся минимальным сопротивлением, и одновременно, вероятность присутствия на дне потока частиц, величины сопротивления отрыву которых меньше, чем необходимое для противостояния отрыву струей с максимальной мгновенной скоростью (при данной средней скорости потока). Для описания интегральной плотности распределения мгновенных значений скорости, а также плотности величин сопротивления частиц почвы отрыву, были использованы уравнения логистической кривой. Применительно к интегральной кривой распределения пульсаций скорости в турбулентном потоке (P_w) оно имеет вид [13]:

$$P_w = [1 + 10^{a(1 - u/u_0)}]^{-1}, \quad (2)$$

где u – средняя скорость потока; u_0 – пороговое значение средней скорости; a – коэффициент, который подбирается таким образом, чтобы при $u/u_0 \geq 1.6$ $P \rightarrow 1$, так как, согласно данным Ц.Е. Мирзехулавы [14], в мелководных склоновых потоках максимальная скорость пульсации превышает осредненную по времени скорость в 1.6 раза. Исходя из нормального распределения значений пульсационных скоростей, можно принять, что минимальная пульсационная скорость составляет 0.4 от осредненной по времени скорости и, соответственно, при $u/u_0 \leq 0.4$ $P \rightarrow 0$. Чтобы удовлетворять этому условию коэффициент a должен быть равным 4.

Для того чтобы в уравнении отрыва частиц почвы иметь одну переменную, а именно u – скорость потока, представим среднюю величину сопротивления частицы наносов и сопротивление отрыву отдельных частиц почвы соответственно в виде функции квадрата пороговой скорости и скорости, обеспечивающей воздействие на частицу со стороны потока с силой, равной ее сопротивлению отрыву. Тогда интегральная кривая плотности распределения сопротивления частиц связного грунта отрыву (P_s) будет иметь вид [13]:

$$P_s = [1 + 10^{b(1 - u^2/u_0^2)}]^{-1}, \quad (3)$$

где b – коэффициент, зависящий от диапазона разброса сил сопротивления отрыву частиц почвы. Теперь уравнение отрыва частиц почвы потоком (1) может быть переписано с учетом (2 и 3) в следующем виде:

$$W = k\rho u^3 P_w P_s = k\rho u^3 [1 + 10^{a(1 - u/u_0)}]^{-1} [1 + 10^{b(1 - u^2/u_0^2)}]^{-1}, \quad (4)$$

где k – эродированность почвы, $m^{-2} \cdot c$; ρ – плотность воды, kg/m^3 ; u и u_0 – средняя скорость потока и ее пороговое значение, соответственно, m/c .

Верификация и параметризация модели отрыва частиц (размыва) почвы чистым (без наносов) потоком была проведена на экспериментальных данных по размыванию образцов почвы в потоках глубиной от 0.5 до 4 см при скоростях до 2 м/с [13, 15, 16]. По результатам верификации уравнение было дополнено блоком, описывающим размыв почвы при скорости ниже пороговой величины [13]. Отрыв частиц при этом происходит в результате размокания поверхностного слоя почвы и, соответственно, сильного ослабления межагрегатного сцепления, вследствие чего связный грунт переходит в состояние несвязного, который размывается при очень малых скоростях потока. Параметризация уравнения в свою очередь показала, что лучшие результаты дает использование для характеристики скорости потока его скорость в сантиметровом придонном слое [13]. С учетом этих моментов уравнение (4) приняло вид:

$$W = 10^{-6} \rho u^3 \left\{ k_1 [1 + 10^{-a(1 - u_s/u_{s0})}]^{-1} + k_2 [1 + 10^{a(1 - u_s/u_{s0})}]^{-1} [1 + 10^{b(1 - u_s^2/u_{s0}^2)}]^{-1} \right\}, \quad (5)$$

где W – интенсивность отрыва частиц почвы (интенсивность смыва) потоком, $г/м \cdot c$; ρ – плотность воды, $г/м^3$; u_s и u_{s0} – скорость течения в придонном слое воды толщиной

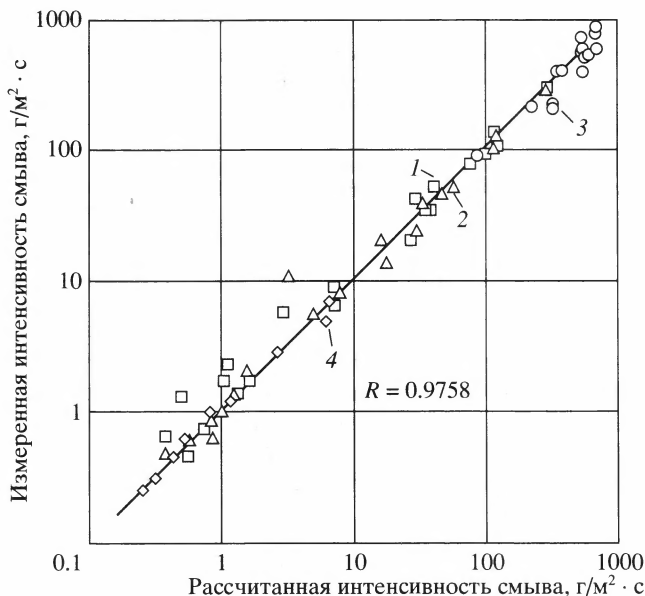


Рис. 1. Связь между измеренными и рассчитанными по уравнению (5) значениями интенсивности смыва различных образцов почв и суглинка

1 – почва серии Рассел, 2 – почва серии Полдинг, 3 – суглинок, 4 – чернозем

в 1 см и ее пороговая величина, м/с; k_1 и k_2 – эродируемость почвы или грунта, соответственно, при скорости потока меньше пороговой величины и больше ее, с/м²; a и b – коэффициенты, зависящие от дисперсии мгновенных значений скорости потока и сопротивления частиц отрыву, соответственно. Коэффициент a для склоновых потоков принимается равным четырем. Величина коэффициента b для монозернистых грунтов (рассеянных образцов) равна 14, для грунтов естественного сложения и пахотных почв – двум (рис. 1).

Все вышесказанное относилось к размыву почв и грунтов водой, не содержащей влекомых и взвешенных наносов, которые, как считал Н.И. Маккавеев [5], существенно влияют на эрозию, увеличивая или, напротив, снижая ее интенсивность. Действительно математические построения демонстрируют снижение эродирующей способности потока по мере накопления донных наносов [13]. Однако модельные эксперименты в гидрологических лотках показали, что влияние донных наносов на эродирующую способность потока зависит от соотношения твердости наносов и грунта его ложа. Если твердость наносов меньше или равна твердости материала, слагающего ложе потока, они уменьшают скорость размыва образца, а защитный эффект наносов с такой твердостью, что и размываемый материал, зависит также от их плотности (табл. 1). Песчаные твердые наносы (кварцевый песок фракции 1.5–2 мм), на-

Таблица 1

Зависимость интенсивности смыва почвы от твердости и плотности донных наносов

Модельный материал	Твердость материала наносов	Плотность наносов, г/см ³	Значение коэффициентов a и b (числитель) в уравнении (7)
Поролон	Мягкий	≈1.00	–0.00063/0.0
Вулканизированная резина	Мягкая	1.21	–0.00048/0.0
Медный провод в резиновой изоляции	Мягкий	2.36	–0.00016/0.0
Кварцевый песок	Твердый	2.65	0.0/0.00034

Эродированность монозернистых образцов почвы потоками со взвешенными наносами*

Плотность почвы, г/см ³	Концентрация взвешенных наносов, г/л			
	0	3	6	12
1.1	272.0/414.8	160.0/78.3	131.2/68.7	-/55.7
1.2	110.0/129.8	66.3/41.4	60.4/23.8	-/14.9
1.3	11.6/15.9	10.3/6.7	6.0/4.1	-/1.9

* В числителе эродированность образца (м² × с²) без фильтрации, в знаменателе – с фильтрацией.

против, увеличивают скорость размыва почв и грунтов ложа в результате коррадирующего эффекта. При этом эффект корразии перекрывает эффект снижения эродированности способности потока за счет накопления самих донных наносов. Даже незначительное содержание песка (1 г/л и менее) увеличивает интенсивность размыва в несколько раз. Суммарно влияние донных наносов на интенсивность смыва выражается показательной функцией:

$$W_{\text{дн}} = We^{aC_{\text{м}} - bC_{\text{т}}}, \quad (7)$$

где $W_{\text{дн}}$ и W – интенсивность смыва в потоке с донными наносами и без них, соответственно, г/м · с; $C_{\text{м}}$ и $C_{\text{т}}$ – соответственно количество частиц наносов из мягкого и твердого материала, приходящихся на единицу ложа потока, шт/м²; a и b – коэффициенты влияния соответственно мягких и твердых наносов на смыв связных грунтов.

Вероятно, более сложен механизм влияния на эрозию взвешенных наносов. Во всех вариантах опыта скорость размыва образцов в потоке с взвешенными наносами была ниже, чем в вариантах с чистой водой. Осмотр образцов показал, что межагрегатные поры поверхностного слоя почвы заполняются частицами взвешенных наносов. По крупным порам наносы проникают довольно глубоко. Илистые и глинистые частицы между агрегатами, как видно, исполняют роль цемента и увеличивают межагрегатное сцепление, превращая материал образца в подобие монолита. Это и является причиной снижения скорости размыва почвы в потоке с наносами (табл. 2).

Снижение скорости размыва образцов почвы и грунта зависит от их плотности и концентрации наносов в потоке. В исследованном диапазоне плотностей снижение эродированности достигало порядка величины (табл. 2).

Рост концентрации наносов менее эффективен. На первый взгляд концентрация наносов не должна оказывать влияния на конечную величину эродированности, поскольку заполнение межагрегатных пор наносами – вопрос времени, и заполнение пор произойдет при любом количестве наносов. Но следует учитывать, что одновременно с заилением пор происходит и смыв заиленного слоя. Следовательно, степень заполнения межагрегатных пор определяется динамическим равновесием между смывом и заилением. Отсюда понятно, что чем больше концентрация наносов, тем быстрее и на большую глубину успевают проникнуть наносы в почву, и тем больше динамическое равновесие смещается в сторону более быстрой кольматации межагрегатных пор.

Поиск количественных связей между рассмотренными выше факторами привел к зависимости следующего вида:

$$\ln k_{\text{м}} = \ln k_{\text{ч}} - a(\ln M - b), \quad (8)$$

где $k_{\text{м}}$ и $k_{\text{ч}}$ – эродированность почвы в мутном потоке и в потоке без взвеси, соответственно, м⁻²/с; M – мутность потока, г/л. Коэффициент a определяется по зависимости:

$$a = 16.15M^2 - 42.02M + 26.44. \quad (9)$$

Коэффициент b вычисляется по зависимости:

$$b = 16.15\rho_s^2 - 42.02\rho_s + 26.11, \quad (10)$$

где ρ_s – плотность почвы, г/см³.

Сопоставление экспериментальных значений эродированности и рассчитанных по приведенной зависимости показало хорошие результаты (рис. 2)

Наконец представление Н.И. Маккавеева [12] о “гидромониторном эффекте” как побудителе эрозионного процесса в склоновых ручейках с бурным течением также было исследовано экспериментально. Результаты опытов представлены в табл. 3. Говоря о гидромониторном эффекте, Н.И. Маккавеев подразумевал ударное разрушение почвы, которое может иметь место в бурном потоке на резких изгибах русла ручейков. Действительно при подходе потока к берегу под углом скорость размыва резко увеличивается при угле атаки больше 20°.

Имея в виду, что, по Н.И. Маккавееву, темпы эрозии пропорциональны мощности потока, по аналогии с уравнением (4) смыва под воздействием касательного напряжения, уравнение разрушения берега под действием ударной нагрузки или давления (W_n) может быть представлено в следующем виде:

$$W_n = k_n \rho u_n^3 [1 + 10^{a(1-A)}]^{-1} [1 + 10^{b(1-B)}]^{-1}, \quad (11)$$

где k_n – коэффициент ударного разрушения почвы, м⁻²/с; ρ – плотность воды, кг/м³; u_n – нормальная к берегу составляющая скорости, м/с; a и b – коэффициенты, величина которых зависит от дисперсии, соответственно, мгновенных значений нормальной к берегу составляющей скорости и сопротивления почвы ударной нагрузке. $A = u_n/u_{но}$ и $B = u_n^2/u_{но}^2$, где $u_{но}$ – пороговое значение нормальной составляющей от скорости (u) набегающего потока.

Из экспериментальных данных следует, что размыв почвы при нулевом угле атаки осуществляется, очевидно, силами касательного напряжения, а с ростом угла атаки к

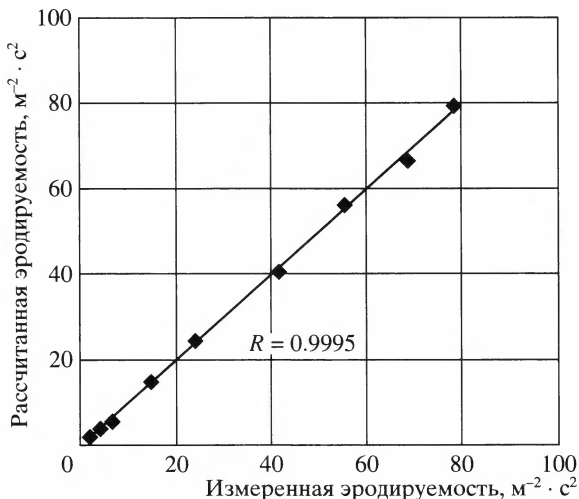


Рис. 2. Сопоставление измеренной и рассчитанной эродированности почвы для всех вариантов опыта

Влияние угла атаки на скорость размыва вертикальной стенки

Угол атаки, град.	Повторность	Скорость размыва, г/м ² × с	Коэффициент вариации, %	Скорость потока, м/с	
				у образца	напротив
0	9	363.0	9.8	1.18	1.07
10	8	367.9	5.4	1.20	0.51
20	7	394.6	4.3	1.23	0.52*
30	7	467.0	5.4	1.28	0.54*
40	6	627.6	11.5	1.21	0.54
50	6	873.2	8.1	1.18	0.64

* Противотечение у противоположной стенки.

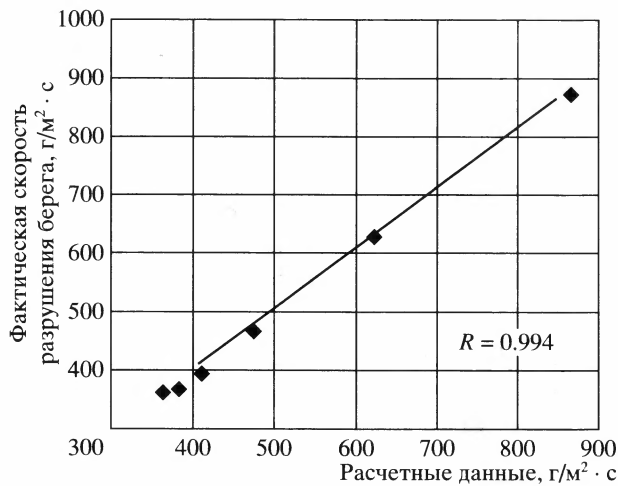


Рис. 3. Сопоставление фактической скорости разрушения берега с рассчитанными по уравнениям (4) и (11)

разрушения оказались в 1.5 раза больше, чем для разрушения почвы под воздействием касательных напряжений ($k_n = 603.13$ и $k_t = 431.58$, соответственно).

Заключение

В настоящее время научный интерес и требования самых различных отраслей народного хозяйства к исследованиям в области флювиальной геоморфологии, и делювиальных процессов, в частности, непрерывно возрастают. Будет возрастать потребность изучать и развивать идеи и методологические принципы, предложенные Н.И. Маккавеевым, чутко реагиовавшим на современные проблемы общества. К сожалению, формат журнальной публикации не позволил осветить его идеи в области территориальной оценки формирования современного делювия, зональности влияния природных условий на развитие почвенно-эрозионных процессов, предложений научных основ методики борьбы с эрозией почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маккавеев Н.И. Некоторые особенности эрозионной деятельности нерусловых потоков // Метеорология и гидрология. 1953. № 6. С. 17–24.
2. Ellison B.D. Studies of raindrop erosion // Agric. Enginrs. 1944. V. 25. PP. 131–136, 181–182.
3. Гудзон Н. Охрана почв и борьба с эрозией. М.: Колос, 1974. 304 с.
4. Краснов С.Ф. Ирригационная эрозия и ее влияние на формирование рельефа: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1982. 26 с.
5. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
6. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
7. Кузнецов М.С., Хан К.Ю. Расчет и прогноз водной эрозии почв. Плодородие почв и биологическая продуктивность агроценозов. Пушкино: Ин-т почвоведения и фотосинтеза, 1986. С. 22–32.
8. Маккавеев Н.И. Некоторые особенности эрозионно-аккумулятивного процесса // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1981. Вып. 8. С. 5–17.
9. Эрозия почв и сели в Кабардино-Балкарии. Нальчик: Эльбрус, 1970. 79 с.
10. Ажигиров А.А. Процессы современной денудации в субтропической зоне РСФСР: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1984. 24 с.
11. Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Эрозионно-аккумулятивные процессы при орошении // Прогнозирование и предупреждение эрозии почв при орошении. М.: Изд-во МГУ, 1992. С. 44–76.
12. Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971. 136 с.

13. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Вероятностная модель размыва почв и связных грунтов // Почвоведение. 2000. № 2. С. 235–242.
14. Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 1970. 239 с.
15. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 215 с.
16. Nearing M.A. A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow. Trans. ASAE. 1991. V. 34. P. 81–85.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
09.04.2007

RECENT DEVELOPMENT OF MAKKAVEYEV'S IDEAS OF SLOPE EROSION MECHANISMS

S.F. KRASNOV, G.A. LARIONOV, L.F. LITVIN

S u m m a r y

The ideas concerned with soil erosion were chosen from the extensive scientific heritage of N.I. Makkaveyev. His views on the role of kinetic energy in soil erosion were proved experimentally. The raindrops impact increases the erosive action by the order of magnitude. The other of his ideas (erosion and sediment transport are proportional to the flow power; suspended load influence sufficiently on soil loss) served as a cornerstone for physically based soil erosion model. The simple computations showed that soil erosion rate is proportional to the third power of flow velocity. The influence of sediment concentration was studied experimentally. The equations, which describe this influence, were developed.

УДК 551.435.162

© 2008 г. Е.Ф. ЗОРИНА, И.И. НИКОЛЬСКАЯ

ОВРАГИ – ОДНО ИЗ ЗВЕНЬЕВ ЕДИНОЙ ЭРОЗИОННОЙ СЕТИ¹

Основным объектом исследований Николая Ивановича Маккавеева была гидрографическая сеть. Его основополагающий труд “Русло реки и эрозия в ее бассейне” [1] – пример всестороннего анализа развития артерий стока от их зарождения в виде первичных борозд на склоне водосбора до формирования крупных рек. Единый эрозионно-аккумулятивный процесс объединяет сеть водотоков с разными закономерностями строения, своеобразными русловыми формами, а также характерными гидрологическими и гидравлическими параметрами. Этот подход к изучению флювиальных процессов позволил установить не только различия в закономерностях развития широкого комплекса форм линейной эрозии, но и создать учение об эрозионно-аккумулятивном процессе, объединяющим все виды потоков на водосборе. Разработанная схема анализа позволяет получить конкретные количественные характеристики для описания проявления линейной и, в частности, овражной эрозии в разных регионах и выявить общие принципиальные закономерности, составляющие суть закона “саморазвития” эрозионных форм.

Всю сложнейшую сеть потоков Н.И. Маккавеев разделяет на три основных звена: склоновые нерусловые потоки – верхнее, временные русловые (овражно-балочная сеть) – среднее и реки – нижнее звено. Условиями образования русловых потоков являются: 1) площадь водосбора, обеспечивающая глубину и скорость, при которых поток может вынести материал, поступающий с водосбора; 2) уклон местности, превышающий гидравлический уклон в среднем и нижнем течении потока.

¹ Выполнено при поддержке РФФИ (проект 06-05-64637) и гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-790.2008.5).