

*Бейшекеев К.К., Абдурасулов И., Ордабаев М.К., Абдурасулов А.И.*

**СУУ АГЫП ЧЫГЫП ТУРГАН КӨЛМӨЛӨРДҮН СУУ-ЭРОЗИЯЛЫК ПРОЦЕССИНИН МАТЕМАТИКАЛЫК ЖОЛ МЕНЕН МОДЕЛДӨӨ**

*Бейшекеев К.К., Абдурасулов И., Ордабаев М.К., Абдурасулов А.И.*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНО-ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРОТОЧНЫХ ВОДОЕМАХ**

*K.K. Beishekeev, I. Abdurasulov, M.K. Ordabaev, A.I. Abdurasulov*

**MATHEMATICAL MODELLING OF WATER AND EROSION PROCESSES ON FLOWING RESERVOIRS**

УДК: 26. 22 (043)

*Макалада суу агып чыккан көлмөлөрдө топурактын суудан болгон бузулуусунун физико-математикалык моделдештирүүнү өнүктүрүү максатында эрозиянын тамчыдан болгон, топурактын үстүңкү катмарын жууп кетүүдөн келип чыккан, уналардан жана суунун чайпалышынан пайда болгон, ошондой эле топографиялык жана өсүмдүктөрдүн азайышы себеп болгон учурлары тууралуу маселелер каралды.*

**Негизги сөздөр:** *физико-математикалык моделдер, суунун кыймылы, суюктуктун кинетикалык энергиясы, агымдын ылдамдыгы, топурактын суу жууп кетүүдөн бузулушу.*

*В статье изложены материалы по совершенствованию физико-математических моделей водной эрозии на проточных водоемах с учетом нескольких компонентов: капельной эрозии, поверхностного смыва почвы, транспорта и выделение наносов из воды, а также топографических и почвенно-растительных параметров водной эрозии.*

**Ключевые слова:** *физико-математические модели, движение воды, кинетическая энергия жидкости, интенсивность потока, эрозия смыва, касательное напряжение.*

*The paper presents materials on the improvement of physical-mathematical models of flow of water erosion on reservoirs based on several components: the drip erosion of surface soil loss, transport, and release of sediment from the water, as well as topographic and land parameters of water erosion.*

**Key words:** *physical and mathematical models, water movement, kinetic energy of liquid, intensity of a stream, washout erosion, tangent tension.*

Большинство существующих методов расчета водной эрозии эмпирические либо основаны на концептуальных моделях стока как правило, позволяют оценить лишь общее количество смывтой с водосбора почвы без учета пространственной изменчивости эрозионных процессов. В последнее десятилетие усилия многих исследователей сконцентрированы на развитии физико-математических моделей водной эрозии. В этих моделях водосбор рассматривается как система участков, каждый из которых характеризуется определенным набором топографических и почвенно-растительных параметров, а процесс водной эрозии описывается как взаимодействие нескольких компонентов: капельной эрозии, поверх-

ностного смыва почвы, транспорта и осаждения наносов и другие [1-6].

Совершенствование физико-математических моделей водной эрозии в настоящее время определяется возможностями сокращения числа кадируемых параметров, а также учетом новейших экспериментальных данных о характере водно-эрозионных процессов. Экспериментальные следования, в частности, указывают на наличие тесной взаимосвязи между формированием стока водоносных наносов (ВН) и временной микроручковой сетью, образующейся на склонах водосбора в период прохождения паводков [5, 6]. Появление и развитие микроручьев определяются микрорельефом склона, эрозионными свойствами почв, а также гидравлическими характеристиками потока и свидетельствуют о неравномерной интенсивности эрозионных процессов в пределах единичной площади склона. Авторы работ [3-6] попытались описать эти эффекты. Однако в существующих моделях их разработки не нашли применения и составляющие водной рассчитываются при условии, что стеральные воды по поверхности водосбора плоскопараллельное. В связи с этим в настоящей работе сделана попытка построить физико-математическую модель водной эрозии и стока ВН с учетом влияния временной микроручейковой сети на интенсивность эрозионных процессов.

Водная эрозия и формирование стока ВН происходят в результате отрыва почвенных частиц от основной почвенной массы и их последующего переноса водными потоками по склонам водосбора и русловой сети. Важнейшие факторы эрозии, действующие в период прохождения паводка, удары дождевых капель о поверхность почвы, а также размывающая способность потока.

Дождевые капли, обладающие значительной кинетической энергией, способствуют разрушению связей между почвенными агрегатами, распаду их на мелкие фракции. Тем не менее до появления поверхностного стока заметного переноса частиц вниз по склону в большинстве случаев не происходит. По мере увеличения глубины поверхностного потока разрушающее действие дождевых капель уменьшается, однако они продолжают оказывать косвенное влияние на интенсивность отрыва почвенных частиц, повышая турбулентность этого потока и тем самым увеличивая его размывающую

способность. Когда размывающая сила превышает силу сцепления почвенных агрегатов, начинается поверхностный смыв почвы. С увеличением потока в микроручейках его скорость и размывающая способность существенно возрастают, при этом обеспечивается перенос выбитых дождевыми каплями и смытых потоком частиц почвы вниз по склону.

На межручейковых участках возможен ламинарный режим, который способствует выносу выбитых каплями частиц в ручейки.

Расход ВН в любой точке склона определяется, с одной стороны, интенсивностью капельной эрозии и смыва почвы, с другой - транспортирующей способностью потока. Если расход ВН превышает транспортирующую способность потока, происходит их осаждение на поверхность склона. Осажденные частицы почвы могут быть снова смыты при увеличении транспортирующей способности потока и его размывающей силы.

Интенсивность водно-эрозионных процессов даже в пределах малого водосбора характеризуется значительной пространственной изменчивостью. Это связано с тем, что водосборы являются неоднородными системами как по гидрометеорологическим условиям, так и, например, по топографическим и почвенно-растительным характеристикам.

Пространственная изменчивость гидрометеорологических воздействий и характеристик водосбора учитывается в модели путем его разбиения на квазиоднородные участки. Для этого сначала выделяются частные водосборные площади притоков различных порядков, а русла рек разделяются на отдельные участки по очертаниям русел в плане. К каждому русловому участку слева и справа примыкают полоски склонов, основание которых равно длине участка русла, ширина меняется в соответствии с особенностями топографии склона, а верхняя граница проходит по отрезку линии главного или частного водораздела. Полоски дополнительно разбиваются на элементы четырехугольной формы для детального учета природных и антропогенных факторов формирования дождевого и твердого стока на поверхности водосбора. В соответствии с принятой схематизацией отекание воды по поверхности водосбора происходит в направлении преобладающего уклона, при этом отсутствует приток (сток) воды и ВН со смежных полосок склона.

Гидрологическая часть модели включает в себя описание поверхностного склонового отекания, движения воды в русловой сети и вертикального влагопереноса в зоне аэрации. Предполагается, что эрозионные процессы не оказывают существенного влияния на процессы формирования дождевого стока.

Движение воды по склонам водосбора и в русловой сети описывается системой одномерных уравнений кинематической волны, для численного интегрирования которой используется метод конечных элементов в сочетании с методом Галеркина. В результате получается система нелинейных уравнений, которая решается интерпретационным методом Ньютона-Рафсона.

Решение системы уравнений кинематической волны позволяет определить среднюю глубину поверхностного потока в узловых сечениях склона. Для учета эффекта концентрации поверхностного потока в микроручьях в модели принимается гипотеза о том, что в пределах каждого выделенного элемента склона значения глубины потока подчиняются некоторому закону распределения вероятностей, а вид этого распределения может быть принят одинаковым для всех выделенных элементов склона. Фактическое распределение глубин микроручейков по площади участка может быть установлено в результате специальных экспериментальных исследований. В настоящей работе в качестве гипотезы принимается, что колебания глубин потока в пределах участка склона могут быть описаны с помощью двухпараметрической зависимости к распределению. (В последующих расчетах интенсивности водно-эрозионных процессов используются глубины различной обеспеченности).

Характеристики склонового стока рассчитываются для каждой полоски, и тем самым определяется боковой приток в русло. Затем рассчитывается русловое стекание, и получаются расходы воды в замыкающем створе частного водосбора. Если в бассейне выделено несколько частных водосборов, то расчеты стока выполняются последовательно для каждого из них; на последнем этапе рассчитывается гидрограф паводка в замыкающем створе всего бассейна.

Динамика влажности почвы в зоне аэрации рассчитывается по уравнению вертикального влагопереноса. Для аппроксимации зависимостей капиллярно-сорбционного потенциала и гидравлической проводимости от влажности почвы используются эмпирические формулы, позволяющие рассчитать эти характеристики по данным о почвенно-гидрологических константах. Инфильтрация воды в почву определяется из верхнего граничного условия, в качестве которого задается либо поток влаги (интенсивность осадков), либо (при условии насыщения) полная влагоемкость. Уравнение вертикального влагопереноса численно интегрируется с использованием неявной конечно-разностной схемы с решением системы разностных уравнений методом прогонки. Влагоперенос и инфильтрация могут быть рассчитаны во всех точках водосбора, в которых проводились наблюдения за осадками и влажностью почвы.

Разработанная модель водной эрозии и формирования стока ВН позволяет рассчитать в каждом выделенном участке склона интенсивность выбивания частиц почвы в результате ударного действия дождевых капель, интенсивность смыва почв поверхностным потоком, расход ВН транспортирующую способность потока, интенсивность осаждения ВН в тех случаях, когда их расход превышает транспортирующую способность потока. Аналогичные расчеты (за исключением капельно-дождевой эрозии) выполняются и для русловой сети.

Эродирующая способность дождевых осадков определяется в основном их собственными характеристиками, особенностями почвенно-растительного

покрова водосбора и глубинами поверхностного потока. В связи с недостаточной изученностью капельно-дождевой эрозии в большинстве существующих моделей для описания этого процесса можно использовать различные имеющиеся зависимости.

Интенсивность капельно-дождевой эрозии в настоящей модели можно определять с помощью зависимости

$$D_R = I^a i a K_1 H, \quad (1)$$

Где:  $D_R$  - масса выбитой каплями почвы, поступающей в поверхностный поток с единицы площади в единицу времени, кг м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>;  $I$  - интенсивность осадков, см/ч;  $a$  - параметр меняющийся от 1.5 до 2.1 в зависимости от процентного содержания глины в почве ( $a = 2.1 - 0.01r$ );  $i$  - уклон, м/м;  $a$  - часть площади склона, свободная от растительности, камней и других факторов, препятствующих капельной эрозии;  $K_1$  - эмпирический параметр (в некоторых моделях рассматривается как коэффициент, характеризующий эрозионную способность почв;  $H$  - коэффициент, учитывающий влияние глубины поверхностного потока на ударное действие дождевых капель.

Для определения безразмерного параметра  $H$ , предложено соотношение, позволяющее учесть экспоненциальное убывание интенсивности капельной эрозии при увеличении глубины логоса. Интенсивность капельной эрозии достигает максимума при некоторой критической глубине поверхностного потока и приближается к нулю глубинах, равных примерно трем диаметрам капель. В модели для определения коэффициента  $H$  предложено:

$$H = \begin{cases} 1 \\ \exp(1 - h / \gamma \bar{D}) \\ 0 \end{cases},$$

$$\begin{aligned} &\text{при } h \leq \gamma \bar{D} \\ &\text{при } h > \gamma \bar{D} \\ &\text{при } h = 3 \bar{D} \end{aligned} \quad (2)$$

$h$  - глубина поверхностного потока, см;  $\gamma$  - параметр, определяющий условие достижения максимальной интенсивности капельно-дождевой (в настоящей модели принято равным 1/6);  $\bar{D}$  - средний диаметр дождевых капель, см, определяемый с помощью отношения:

$$\bar{D} = 0.188 I^{0.182} \quad (3)$$

В практических расчетах можно ограничиться несколькими глубинами различной обеспеченности. Для этого на теоретической кривой обеспеченности выбирают  $m$  интервалов  $[0, P_1], [P_1, P_2], \dots,$

$[P_{m-1}, I]$ . Величина каждого интервала  $f_j = P_i -$

$P_{i-1}$  представляет собой долю площади склона, в пределах которой поверхностный поток имеет глубину  $h_i$ . Глубине  $h_i$ , соответствует интенсивность капельной эрозии  $D_{Ri}$ . Средневзвешенная величина  $D_R$  в этом случае определяется по формуле:

$$D_R = \sum_i^m D_{Ri} f_i \quad (4)$$

Интенсивность смыва почвы поверхностным склоновым потоком рассчитывается с помощью соотношения:

$$D_F = \beta K_2 (\tau - \tau_0) \quad (5)$$

где:  $D_F$  - масса почвы, поступающая в поверхностный поток в результате смыва с единицы площади в единицу времени, кг м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>;  $\beta$  - коэффициент, характеризующий условия смыва (близкий по смыслу к части площади поверхности участка склона, на которой возможен смыв почвы);  $K_2$  - эмпирический коэффициент, с/м, аналогичный параметру  $K_1$  в (1);  $\tau$  - касательное напряжение, н/м<sup>2</sup>, создаваемое поверхностным потоком ( $\tau = pghi$ , где  $p$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>,  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\tau_0$  - критическое касательное напряжение, при котором начинается отрыв почвенных частиц, Н/м<sup>2</sup>. Для определения величины  $\tau_0$  можно использовать эмпирическую зависимость:

$$\tau_0 = 0.5 \times 10^{0.0183r} \quad (6)$$

С учетом принятого закона распределения глубин на участке склона величина касательного напряжения в потоке глубиной  $h_i$  составит  $\tau_i$  а величина интенсивности эрозии смыва -  $D_{Fi}$ . Суммарная интенсивность эрозии смыва определяется аналогично суммарной интенсивности капельно-дождевой эрозии по формуле:

$$D_F = \sum_i^m D_{Fi} \int i \quad (7)$$

#### Литература:

1. Абакумов А.И. Этапы математического моделирования. - Владивосток: Изд-во Дальрыбвтуза, 1997. - 19 с.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е издание перераб. и доп. - М.: Наука, 1976. - 280 с.
3. Алтуниин В.С. О кинематических и морфометрических закономерностях речного потока. - М.: Известия ТСХА, №4, 1963.
4. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1962. - 115 с.
5. Данелия Н.Ф. Водозаборные сооружения на реках с обильными донными наносами. М.: Колос, 1964. - 336 с.
6. Логинов Г.И. Гидравлические процессы при водозаборе из малых горных рек. - Бишкек: «Кут-Бер», 2014.-320 с.

Рецензент: д.т.н. Логинов Г.И.