

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ ЭРОЗИИ ОТ СТОКА ТАЛЫХ ВОД, РАЗРАБОТАННОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ ИНСТИТУТОМ, ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ МЕР

Во многих регионах России вклад смыва почвы за период снеготаяния в годовые темпы эрозии на пахотных землях является преобладающим или весьма значительным [1], поэтому отечественные исследователи уделяли большое внимание его изучению. Конечным результатом этих усилий явилось несколько моделей эрозии для периода весеннего снеготаяния. Первая модель была предложена Г.И. Швевсом [2], но, к сожалению, она не была обеспечена необходимыми приложениями и поэтому не использовалась в практике проектирования противоэрозионных мер и, по этой же причине, не может быть проверена. Модели Государственного Гидрологического Института (ГГИ) [3] и Г.П. Сурмача [4] были представлены в виде инструкций и использовались для экспериментального проектирования противоэрозионных мер. Модель В.Д. Иванова и М.И. Лопырева [5] была опубликована с необходимыми исходными данными для определения смыва за период снеготаяния.

Проблема эрозии почв в период стока талых вод в большинстве стран не столь остра, и поэтому там ей не уделялось такого внимания, как в России. Так, в универсальном уравнении эрозии [6] смыв от стока талых вод учитывается совместно со смывом от стока ливневых вод. Эрозионный потенциал талых вод предлагается оценивать как сумму (в дюймах) осадков с декабря по март включительно, умноженную на 1,5, полученный результат прибавляется к эрозионному индексу жидких осадков с введением соответствующей поправки во внутригодовое распределение эрозионного индекса. Это решение представляется слишком упрощенным и пригодно лишь для регионов, где на долю смыва от стока талых вод приходится незначительная часть от суммарной годовой величины смыва. В модели WEPP предлагается рассчитывать интенсивность стока с учетом поступления тепла, запасов воды в снеге и промерзания почвы, а затем по зависимости, предложенной для ручейковых размывов, рассчитать и величину смыва за период снеготаяния. Проверка этого блока на данных многолетних наблюдений за смывом на юго-западе лесной зоны ЕТ России показала, что гидрологический блок модели WEPP не пригоден для применения в условиях России. Сроки снеготаяния оказались сдвинутыми на январь-февраль, тогда как обычно снеготаяние происходит здесь в конце марта – начале апреля, а расчетные значения талого стока оказались сильно заниженными по сравнению с наблюдавшимися. Поэтому дальнейшая проверка модели WEPP оказалась невозможной.

Проверка моделей Г.П. Сурмача, В.Д. Иванова и Государственного Гидрологического Института на независимых данных Л.Н. Гавриленко и В.Г. Гусарова [7] показала, что модель ГГИ дает наилучшие, хотя и заниженные результаты, среднее отклонение 49,9%. По моделям Г.П. Сурмача и В.Д. Иванова были получены сильно завышенные результаты, среднее отклонение соответственно 62,8 и 582,0% (табл. 1).

Таким образом, по точности модель ГГИ превосходит остальные, но по своей структуре и некоторым другим параметрам она не вполне отвечает требованиям, которые предъявляются к моделям эрозии, используемым для проектирования противоэрозионных мер. В первую очередь это относится к блоку рельефа. Структура модели такова, что смыв рассчитывается по ручьям первого, второго и третьего порядков, протяженность которых, конечно, некоторым образом увязывается с длиной склонов, поскольку речь идет о склоновых водосборах. Следовательно, функция длины склона присутствует в модели, но в явном виде она не задана. Между тем, в модели, предназначенной для проектирования противоэрозионных мер, длина склона должна быть представлена в явном виде, на что указывал Г.И. Швевс [8]. Следует также отметить, что склоновые водосборы на пахотных землях далеко не всегда могут быть выделены. На так называемых рассеивающих склонах [9], на долю которых приходится до 55% площади пахотных земель на юге лесной зоны [10], где смыв в период снеготаяния преобладает или составляет существенную часть от годовой величины, использование модели ГГИ с неявной функцией длины склона вообще невозможно.

Сопоставление расчетных значений смыва с замеренными на площадках

Натурные данные по Гавриленко, Гусарову [1977]				Расчетные значения по моделям							
Длина, м	Уклон, %	Сток, мм	Смыв, т/га	Г.П. Сурмача		ГГИ		В.Д. Иванова		Авторов	
				Смыв, т/га	Откл., %	Смыв, т/га	Откл., %	Смыв, т/га	Откл., %	Смыв, т/га	Откл., %
350	10,7	17,8	2,04	2,96	+45	0,79	-55	14,2	+596	1,66	-18,7
350	10,7	134,9	7,23	15,68	+117	6,88	-5	107,7	+1390	10,04	+38,9
350	10,0	29,6	4,87	4,67	-4	1,51	-69	23,6	+385	2,48	-49,1
350	10,0	144,2	12,5	15,34	+26	7,35	-40	102,3	+742	9,96	-20,4
350	10,0	28,4	2,46	5,90	+62	1,45	-41	20,2	+719	2,39	-2,8
350	10,0	37,5	2,64	4,90	+35	1,91	-49	26,6	+631	3,06	-15,8
350	10,0	30,9	4,79	4,78	0	1,58	-67	21,9	+358	2,58	-46,2
350	10,0	188,1	13,67	15,58	+14	9,59	-30	133,4	+876	12,56	-8,1
350	10,0	37,8	4,18	6,03	+44	1,93	-54	26,8	+542	3,09	-26,2
200	9,3	35	3,17	5,02	+58	1,79	-77	14,9	+370	2,81	-11,4
200	10,7	161,0	4,27	14,26	+274	8,21	92	68,7	+1510	11,48	+168,8
200	10,7	69,8	3,07	9,68	+215	3,56	+18	29,3	+854	5,74	+87,1
210	10,0	44,2	4,57	6,23	+36	2,52	-51	18,6	+307	3,66	-19,9
210	10,0	64,8	4,30	8,96	+108	3,31	-22	27,2	+532	5,04	+17,2
210	10,0	39,0	3,02	5,53	+83	1,99	-34	16,4	+433	3,29	+9,1
210	10,0	154,7	8,15	14,1	+73	7,89	-3	65	+698	10,40	+27,6
210	10,0	57,0	6,87	7,39	+8	2,91	-42	23,9	+248	4,53	-34,1
150	5,3	143,8	2,62	3,41	+30	4,82	+84	22,0	+740	5,08	+93,8
150	5,3	19,5	0,85	0,69	-19	0,13	-85	3,0	+249	0,99	+16,8
140	5,4	144	4,58	3,79	-17	4,83	+5	16,13	+252	5,14	+12,2
140	5,4	30,5	1,80	1,2	-33	0,30	-83	3,42	+90	1,47	-18,1
140	5,4	143,5	2,72	4,29	+58	4,79	+76	16,0	+488	5,13	+88,5
140	5,4	25,5	0,60	1,11	+85	0,21	-65	2,86	+377	1,27	+112,0

Оценку влияния уклона на смыв в модели ГГИ предлагается проводить лишь на склонах круче 5°, между тем большая часть пашни расположена на склонах крутизной до 3° [11], поэтому для того, чтобы она могла использоваться для проектирования противоэрозионных мер, метод оценки фактора уклона должен быть также переработан.

В пересмотре нуждаются и такие важные блоки модели, как почвенный блок и блок поверхностного стока. По противоэрозионной устойчивости почвы разделены на три группы. К первой отнесены черноземы, ко второй – серые лесные и каштановые почвы, а к третьей – дерново-подзолистые и светло-каштановые. Если содержание гумуса, от которого во многом зависит эродируемость почвы, в значительной мере определяется генетическим типом почвы, то роль этого фактора, следовательно, в какой-то мере учтена в модели, но что касается влияния гранулометрического состава почвы на ее эродируемость, то это вовсе не нашло отражения. Между тем этот фактор практически полностью определяет изменчивость эродируемости почв в пределах генетического типа [12].

Наконец, представляется неправомерным использование слоя речного стока за полове для определения смыва со склонов. Хотя предлагается определять слой стока по гидрометрическим наблюдениям на малых реках, тем не менее эти данные являются интегральной характеристикой условий стокообразования в бассейне и нивелируют влияние уклона пахотных склонов и гранулометрического состава почвы. Между тем, по данным стоковых площадок, на песчаных и супесчаных почвах сток существенно меньше, чем на почвах суглинистого состава, а на крутых склонах он значительно больше, чем на пологих [13]. На слой поверхностного талого стока может оказывать влияние также и экспозиция склона, как вследствие метелевого переноса снега, так и в результате перераспределения инсоляции, играющей большую роль в снеготаянии, особенно в годы с преобладанием антициклонического типа погоды.

Таким образом, ни отечественные, ни зарубежные модели по разным причинам не пригодны для практического использования. Учитывая, что модель эрозии, предложенная ГГИ для определения смыва в период снеготаяния, существенно превосходит другие отечественные эмпирические модели по точности, то представление ее в форме, пригодной для использования при проектировании противоэрозионных мер, будет иметь большое практическое значение. Поэтому цель настоящей работы – адаптация модели ГГИ к требованиям, предъявляемым к моделям эрозии, предназначенным для разработки проектов внутрихозяйственного землеустройства с комплексом почвозащитных и водоохранных мер.

Зависимость для расчета смыва, предложенная ГГИ, имеет вид:

$$W_{sp\%} = H_p^n abk_l, \quad (1)$$

где $W_{sp\%}$ – модуль смыва (средний смыв со склона) заданной ($p\%$) вероятностью превышения за период весеннего снеготаяния, т/га; H_p – слой стока заданной ($p\%$) вероятностью превышения за полове, мм; a , n – параметры, зависящие от типа ручейковой сети и типа почвы; b – коэффициент, учитывающий влияние агрофона на смыв; k_l – коэффициент, учитывающий влияние уклона на смыв. При уклоне $l > 10\%$ коэффициент принимается равным 0,1; при $l < 10\%$ $k_l = 1$.

В моделях эрозии, использующихся для проектирования почвозащитных мер, влияние уклона и длины склона обычно описывается степенной зависимостью следующего вида:

$$W \sim l^n L^p, \quad (2)$$

где W – средний смыв почвы со склона, l – уклон поверхности склона, L – длина склона, n , p – показатели степени при уклоне и длине склона соответственно. Для прямого склона с постоянным уклоном на всем протяжении, разбитого на k равновеликих отрезков длиной l , зависимость (2) может быть записана в виде

$$W \sim l^n (kl)^p. \quad (3)$$

Тогда средний смыв с k -го отрезка, W_k , может быть представлен как разность между смывом со всего склона шириной b , состоящего из k равновеликих отрезков (W_{kl}), и смывом со склона такой же ширины, но состоящего из $k-1$ равновеликих отрезков ($W_{(k-1)l}$):

$$\begin{aligned} W_k &= [W_{kl} - W_{(k-1)l}] / bl = [l^n (kl)^p bkl - l^n (k-1)^p l^p b(k-1)l] / bl = \\ &= l^n l^p [k^{1+p} - (k-1)^{1+p}]. \end{aligned} \quad (4)$$

Как упоминалось выше, по модели ГТИ смыв рассчитывается по ручьям первого, второго и третьего порядков. Длина склонов, на которых образуются только ручьи первого порядка, составляет около ста метров. Ручьи второго порядка образуются на склонах длиной около 200 метров [14]. Для ручьев третьего порядка приводится площадь водосборов и соотношение длины и ширины водосборов [3], что позволило приближенно определить длину склонов, на которых образуются ручьи третьего порядка. Она достигает 1000–1100 метров. Располагая этими сведениями, показатель степени при длине склона (p) может быть вычислен как

$$p = (\lg W_t - \lg W_{t-1}) / (\lg L_t - \lg L_{t-1}), \quad (5)$$

где W_t – средний смыв почвы для ручьев t -го порядка; L_t – длина склона для ручьев t -го порядка.

Для того, чтобы воспользоваться зависимостью (5), по зависимости (1) были вычислены значения смыва для трех групп почв по трем типам ручьев при различных (с шагом 10 мм) значениях слоя стока за половеде. Выполненные затем по зависимости (5) расчеты показали, что показатель степени при длине склона – величина переменная и изменяется с длиной склона, а также зависит от величины смыва и смываемости почвы (табл. 2). Примечательно, что показатель степени при длине склона на расстоянии от 50 до 200 м в несколько раз больше единицы, в то время как для ливневой эрозии на склонах такой же длины показатель степени существенно меньше единицы, несмотря на то, что в обоих случаях нарастание удельных расходов воды в склоновых потоках, осуществляющих отрыв частиц почвы и их транспорт, происходит пропорционально расстоянию от водораздела. При дальнейшем увеличении длины склона показатель степени принимает значения (0,2–0,5), типичные для ливневого смыва [2, 15]. Эти различия, очевидно, обусловлены тем, что при снеготаянии отрыв и транспорт почвенных частиц, составляющие суть процесса эрозии, осуществляются исключительно за счет энергии потока, когда его скорость достигает порогового значения или превышает его, что может иметь место лишь на значительном удалении от водораздела или верхней границы поля, а при ливневом смыве, благодаря эродирующей способности дождевых капель, поток насыщается наносами у самых истоков задолго до достижения им размывающей скорости. Следовательно, степень насыщенности потоков наносами во многом определяет его эродирующую способность и соответственно влияние длины склона на смыв почвы. В свете этого положения становится ясным и механизм влияния общей величины смыва за снеготаяние и эродируемости почвы на показатель степени при уклоне. При большом смыве за снеготаяние концентрация наносов, как правило выше, чем при малом, и, следовательно, показатель степени при длине в первом случае меньше, чем во втором. Для менее эродируемых почв, какими являются черноземы по сравнению с каштановыми и дерново-подзолистыми, показатель степени при длине на склонах большой протяженности меньше, чем на легко эродируемых почвах (табл. 2). Это объясняется тем, что сорванные и транспортируемые потоком агрегаты легко эродируемых почв быстрее истираются до элементарных минеральных частиц и переходят во взвешенное состояние, и поэтому, при прочих равных условиях, поток будет менее нагружен донными наносами, которые снижают темпы отрыва новых агрегатов. Таким образом, влияние длины склона на смыв определяется не только удельным (на единицу ширины склона) расходом воды склоновых потоков, который может быть принят в первом приближении пропорциональным длине склона, но и содержанием наносов, и особенно их влекомой составляющей, которая в свою очередь зависит от истираемости агрегатов. Последняя, вероятно, является функцией тех же почвенных параметров, от которых зависит эродируемость почвы. Поэтому в первом приближении показатель степени при длине склона должен учитывать и эродируемость почвы.

В связи с вышеизложенным, показатель степени при длине склона не может быть постоянной величиной и должен рассчитываться отдельно для каждого значения смыва за сезон по трем группам почв с учетом влияния длины склона, и поэтому фактор длины склона не может быть сведен к простой зависимости типа (1), обычно используемой в эмпирических моделях эрозии. В то же время для отрезков склона 0–100, 100–200 и 200–1100 м в первом приближении можно принять показатель степени за постоянную величину при прочих равных условиях (смыв за сезон, эродируемость почвы, уклон). В этом случае распределение смыва в упомянутых выше пределах по равновеликим отрезкам склона может быть рассчитано по зависимости:

$$W_k = 10^{-4} (W_t L_t - W_{t+1} L_{t+1}) [k^{1+p} - (k-1)^{1+p}] / N \Sigma [k^{1+p} - (k-1)^{1+p}], \quad (6)$$

Зависимость показателя степени при длине склона (p) от средней величины смыва, эродируемости почвы и расстояния от начала склона

Эродируемость почвы	Смыв, т/га	Значения p на отрезках склона	
		50–200 м	200–1100 м
Низкая (черноземы типичные и обыкновенные)	5,5	3,50	0,15
	4,4	3,39	0,21
	3,3	3,26	0,29
	2,3	3,10	0,38
	1,3	2,87	0,51
Средняя (темно-серые лесные)	12,5	3,93	0,29
	10,5	3,86	0,34
	7,7	3,76	0,39
	5,4	3,63	0,47
	4,4	3,56	0,51
	3,4	3,46	0,57
	2,4	3,33	0,64
	1,4	3,15	0,74
	23,2	4,26	0,40
Высокая (светло-каштановые, дерново-подзолистые)	19,0	4,24	0,41
	14,9	4,20	0,42
	10,8	4,16	0,44
	8,9	4,13	0,45
	6,9	4,11	0,46
	3,2	4,00	0,51
	1,5	3,91	0,55

где W_k – средний смыв на k -м отрезке склона, считая сверху; W_i – средний смыв на склоне с ручьями i -го порядка; L_i – длина склона с ручьями i -го порядка, м; l – длина равновеликих отрезков, м; N – число равновеликих отрезков, укладываемых на расстоянии $L_{i+1} - L_i$. По этой зависимости было вычислено распределение смыва по отрезкам длиной 50 м в интервале длин склона от 100 до 200 м и 100 м в интервале от 200 до 1100 м при различных значениях слоя стока за половодье для почв всех трех групп, а именно для почв с высокой, средней и слабой противоэрозионной устойчивостью, и построены соответствующие графики в логарифмических координатах. Начала и концы графиков для отрезков склонов 100–200 и 200–1100 м не совпадали, так как показатель степени при длине p скачкообразно менялся при переходе от ручьев первого типа к ручьям второго типа и от ручьев второго типа к ручьям третьего типа. В действительности, смыв по длине склона при постоянстве уклона и прочих факторов изменяется достаточно плавно, и соответственно график зависимости смыва от длины склона не должен иметь разрывов, поэтому было проведено графическое сопряжение концов отдельных частей графика таким образом, чтобы средний смыв на отрезках 100–200 и 200–1100 м, вычисленный как среднее из смыва на равновесных отрезках, был соответственно равен $10^{-2} (W_2 L_2 - W_1 L_1)/2$ и $10^{-2} (W_3 L_3 - W_2 L_2)/9$, где W_1 , W_2 и W_3 – соответственно средний смыв на склонах с ручьями первого, второго и третьего типов, т/га; L_1 , L_2 и L_3 – длина склонов для ручьев первого, второго и третьего типов соответственно. Таким образом, в модель смыва была введена функция длины склона в графической форме. Причем эта функция зависит от противоэрозионной устойчивости почвы и величины смыва за снеготаяние.

Следующим важным моментом является замена слоя речного стока за половодье на слой склонового стока. Для этой цели были использована одна из ранних работ Н.Н. Бобровицкой [14], в которой в табличной форме приводится зависимость между смывом и слоем склонового стока для ручья второго порядка, что соответствует длине склона в 200 м. Путем решения уравнения (1) относительно h были вычислены величины слоя речного

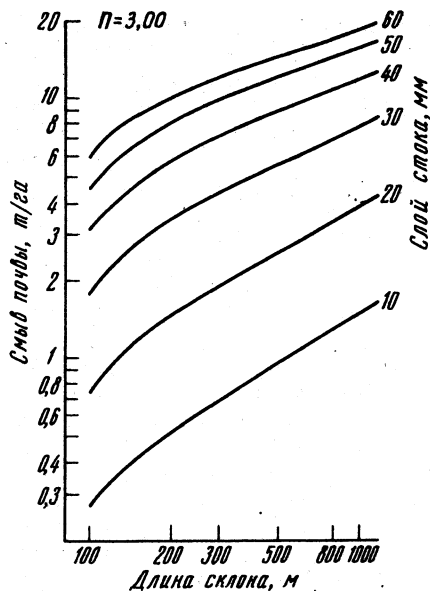
стока за половодье, которым соответствуют значения смыва для почв различной противозрозионной устойчивости, приведенные в вышеупомянутой работе Н.Н. Бобровицкой. Таким образом, были получены значения склонового стока и соответствующие им значения слоя стока за половодье. Затем были вычислены значения смыва ручьев первого и третьего порядков для слоев стока за половодье, которым соответствуют следующие значения склонового стока за половодье: 10, 20, 30, 40, 50 и 60 мм, и по описанной выше методике построены графики зависимости смыва от длины склона для почв с высокой, средней и слабой противозрозионной устойчивостью при названных выше слоях стока.

Слой склонового стока может быть определен по сумме запаса воды в снеге к началу снеготаяния и слою осадков за период с декады, следующей за декадой с максимальным запасом воды в снеге, до средней даты схода снежного покрова. Сведения о запасах воды в снеге и количестве осадков за период снеготаяния имеются в справочниках "Климат СССР. Снежный покров" и "Климат СССР. Осадки". Коэффициенты стока за период снеготаяния могут быть позаимствованы из работы В.Е. Водогрещкого [13], в которой обобщены многолетние наблюдения на стоковых станциях Гидрометеослужбы и представлены значения коэффициентов стока с зяби в зональном аспекте в зависимости от гранулометрического состава почвы и уклона поверхности. Зональные различия не очень велики, но, тем не менее, автор счел необходимым выделить лесную, лесостепную и степную зоны, причем в степной зоне Западной Сибири коэффициенты стока несколько выше, чем в Европейской части России. Значительно сильнее на коэффициент стока сказывается влияние гранулометрического состава. Поэтому признаку почвы разделены на две группы. К первой отнесены супесчаные почвы, ко второй — суглинистые и глинистые. Сопоставление коэффициентов стока, приведенных в работе В.Е. Водогрещкого [13], с независимыми данными показало, что между ними имеются значительные расхождения [16]. Причем в лесной и лесостепной зонах они имеют различные знаки, а в степной зоне коэффициенты стока значительно ниже, чем приведенные В.Е. Водогрещким. В связи с этим, если имеются местные данные, то лучше пользоваться ими.

Определение слоя склонового стока по запасам воды в снеге и коэффициенту стока позволяет учитывать перераспределение снега по склонам разных экспозиций в результате метелевого переноса. Таким образом, предлагаемые изменения позволяют более полно учитывать местные условия стокообразования.

Наконец, с целью более полного учета влияния противозрозионной устойчивости почв было проведено следующее дополнение модели ГТИ. Различные способы оценки противозрозионной устойчивости почв в целом дают близкие относительные значения [12]. Поэтому основным критерием при выборе метода оценки противозрозионной устойчивости была доступность необходимых для расчета сведений. Этим требованиям наиболее полно отвечает метод, предложенный У.Х. Уишмейером, К.Б. Джонсоном и Б.В. Кроссом [17] и адаптированный применительно к гранулометрической классификации, используемой в России, а также некоторым другим параметрам [18]. По этой методике определяется эродруемость, или смываемость почвы, т.е. величина, обратная противозрозионной устойчивости, но это в нашем случае не имеет значения. Почвы с противозрозионной устойчивостью имеют низкую эродруемость и наоборот. Для всех почв, перечисленных в "Инструкции..." [3], было проведено по несколько десятков определений смываемости с учетом данных о гранулометрическом составе и содержании гумуса, собранных в районах распространения соответствующих почв. Среднее из определений по этим группам почв дало среднее значение смываемости для почв с высокой, средней и низкой противозрозионной устойчивостью. Таким образом, величина смыва при различных слоях стока была привязана к определенным значениям смываемости. Определение смыва для промежуточных значений смываемости с шагом 0,25 т/га было проведено методом интерполяции. Для крайних значений смываемости (выше среднего значения для группы светло-каштановых и дерново-подзолистых почв и ниже средней величины смываемости для черноземов) величина смыва была получена методом экстраполяции. По этим данным были построены графики распределения смыва по длине склона для слоев стока в 10–60 мм (рисунок). Пользуясь этими графиками можно определить средний смыв почвы на стометровых отрезках со стандартным уклоном (4,5%).

При прочих равных условиях величина смыва зависит от поперечного профиля склона, что нашло отражение в терминах — "собирающие" и "рассеивающие" склоны [9] и в эмпирических коэффициентах, предложенных для учета влияния этих факторов [19]. Г.И. Швец [2] предложил оценивать влияние формы водосбора по соотношению удельных расходов в некотором створе реального и равновеликого водосбора прямоугольной формы, которое



Зависимость смыва от длины склона (по 100-метровым отрезкам) для различных слоев стока при эродированности почвы 3,0 т/га

кривизны легко определяется при помощи специальной палетки с серией дуг с различными радиусами, длина которых задается в масштабе карты, используемой для определения радиуса кривизны. Физическая суть этого коэффициента применительно к склоновому стоку заключается в том, что он является мерой увеличения или уменьшения удельного (на единицу ширины склона) расхода стока. Так как при прочих равных условиях интенсивность стока является функцией запаса воды в снеге, и именно это заложено в модель ГГИ, то, очевидно, коэффициент K должен быть включен в модель с теми же показателями степени, что и запас воды в снеге (n).

В модели ГГИ фактор уклона предлагается учитывать лишь при уклонах более 10%, что объясняется, вероятно, недостатком данных, но это совершенно неприемлемо для модели, предназначенной для проектирования почвозащитных мер. Использовать для оценки фактора уклона зависимости, применяемые для этой цели в моделях эрозии, вызываемой ливневым стоком, представляется неверным по следующим соображениям. Эрозия при ливнях осуществляется за счет энергии потока и ударов дождевых капель, которые производят отрыв почвенных частиц и, кроме того, повышают транспортирующую способность склоновых мелководных потоков, поэтому смыв почвы при выпадении дождей начинается практически от вершины склона или верхней границы поля. При стоке талых вод отрыв частиц почвы и их последующий транспорт осуществляется только за счет энергии потока. Отрыв частицы почвы в потоке происходит только в том случае, если его скорость достигает критической величины, которая зависит от свойств почвы и ее состояния в период снеготаяния, или превышает ее. Скорость потока есть функция не только уклона, но и длины склона, которая, при прочих равных условиях, определяет удельный (на единицу ширины склона) расход воды в склоновых потоках. Из уравнения неразрывности в записи для мелководного потока и уравнения Шези следует, что средняя скорость мелководного потока (u) может быть представлена как

$$u = C^{2/3} \cdot q^{2/3} \cdot I^{2/3} = C^{2/3} \cdot L^{1/3} \cdot i_{\text{ст}}^{1/3} \cdot I^{1/3}, \quad (8)$$

где C – коэффициент Шези, q – удельный (на единицу ширины склона) расход воды; $i_{\text{ст}}$ – интенсивность стока; I – синус угла наклона; L – длина склона. Из зависимости (8) следует, что критическая, при прочих равных условиях, скорость достигается при определенном, критическом сочетании длины и крутизны склона. Поскольку скорость потока в любой его точке изменяется (пульсирует) в достаточно широких пределах, подчиняясь закону нор-

может быть выражено в виде отношения длин реальных и прямоугольных водосборов. Такое решение может быть реализовано лишь на собирающих склонах с выраженными водосборами. Между тем, по данным В.П. Лидова [10], рассеивающие склоны составляют 55% площади пашни в бассейне р. Вазузы. На подавляющей части пахотных земель Среднерусской равнины, Волго-Донского междуречья и Северного Кавказа вообще невозможно обособить склоновые водосборы. Общее решение вопроса о влиянии на удельные расходы стока и, следовательно, на смыв конвергентности и дивергентности склона было предложено Г.А. Ларионовым [16]. Численная оценка конвергентности и дивергентности (K) может быть представлена в виде

$$K = (R_1 + R_2/2R_2), \quad (7)$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны горизонталей соответственно на верхнем и нижнем концах отрезка склона, для которого определяется искомым показатель, м. У расходящихся (дивергентных) склонов коэффициент K меньше единицы, у сходящихся (конвергентных) склонов – больше единицы, а на прямых склонах (изображаемых прямыми горизонталями) – равен единице. Радиус

мального распределения, то очевидно, что отдельные пульсационные значения скорости будут равны или выше критической величины при средней скорости, существенно меньшей (на 40%) критической величины. Соответственно все значения пульсационных скоростей будут превышать критическую величину лишь в том случае, если средняя скорость будет значительно превышать критическую величину. Доля пульсационных значений скорости, превышающих критическую величину, может быть записана в виде логистического уравнения (10) с аргументом, представляющим собой отношение средней скорости потока к критической величине. Для интересующего нас случая уравнение может быть записано в виде:

$$y = 1 / \{1 + 10^{[a - b(L / L_0 I_0) \dots 0,333]}\}, \quad (9)$$

где a и b – параметры, L и L_0 – соответственно длина склона и его критическое значение; I и I_0 – соответственно уклон и его критическое значение. Если средняя скорость потока существенно (в 1,6 раза) превышает критическую величину, то интенсивность отрыва частиц почвы становится пропорциональной кубу скорости потока [20] и соответственно пропорциональной уклону в первой степени. Это подтверждается результатами данных стоковых площадок, заложенных на крутых склонах [21] и натурных замеров смыва на крутых склонах [16]. По таким же выводам пришли авторы переработанного универсального уравнения [6].

В эмпирических уравнениях эрозии величина многих факторов принимается равной единице для некоторых принятых стандартных условий. Так, в универсальном уравнении эрозии [15, 22] фактор уклона и длины склона равен единице при уклоне 9% и длине 22,1 м. В нашем случае за стандартные значения уклона и длины склона можно принять 4,5% и 100 м соответственно, так как именно на площадках с такими параметрами были получены основные результаты, использованные для разработки модели (1).

С учетом вышеприведенных положений уравнение фактора уклона $[I]$ может быть представлено в следующем виде:

$$[I] = 27,67 \sin(\arctg 0,01\alpha) / \{1 + 10^{[5,15 - 5,76(0,01L^\alpha / 4,5) \dots 0,333]}\}, \quad (10)$$

где L – длина склона от водораздела или верхней границы поля, м; α – уклон на отрезке склона для которого определяется смыв, %. Обычно уравнения фактора уклона в эмпирических моделях дождевой эрозии имеют свободный член. При малых уклонах, когда значение синуса угла наклона мало отличается от нуля, на коротких площадках смыв все же имеет место, так как в этом случае отрыв частиц и их транспорт, несмотря на малую скорость стекания воды, осуществляется за счет кинетической энергии дождя в результате разбрызгивания почвы и взмучивания стока дождевыми каплями. Для учета смыва при малых уклонах и вводится свободный член в уравнения фактора уклона для ливневой эрозии. Как отмечалось выше, при стоке талых вод отрыв и транспорт сорванных частиц почвы осуществляется исключительно за счет энергии потока и поэтому в зависимость для вычисления фактора рельефа в этом случае не требуется введение свободного члена. Кроме того, выражение в фигурных скобках при малых уклонах принимает большие значения, а фактор уклона $[I]$ – малые. То же происходит при коротких склонах. Следовательно, автоматически выявляется пояс отсутствия или очень слабой эрозии.

Для определения смыва на отрезке склона с уклоном, отличным от стандартного (4,5%), смыв, определенный по графикам зависимости смыва от эродированности почвы, слоя стока и длины склона, умножается на фактор уклона, вычисляемый по зависимости (10).

Для того, чтобы модель можно было использовать при машинных расчетах, все графические зависимости, а также информация, заданная в табличной форме, были аппроксимированы рядом уравнений, предназначенных для расчета среднего смыва (W_L) со склона длиной L , распаханного под зябь:

$$W_L = 100L^{-1} B(0,1L)^{[A - C \exp(-0,1L)]}, \quad (11)$$

где $B = \rho h^N$; $A = S(h + T)^Z$; $C = Fh(R - M \exp(-h))$; h – слой склонового стока, мм. В свою очередь параметры, входящие в вышеупомянутые зависимости, определяются по формулам:

$$P = \exp(2,6409 P - 17,2866),$$

$$N = 3,1966 - 0,5201 P,$$

$$S = 4,935 - 1,106 P^{0,831},$$

Значения параметров D и E в формуле 11

Зона	Мехсостав	Параметры	
		D	E
Лесная	С, ТС, Г	2,6953	0,89836
	СП	2,1118	0,63475
Лесостепная	С, ТС, Г	3,1219	0,96103
	СП	2,4472	0,73120
Степная (Европейская территория России)	С, ТС, Г	3,0235	0,99758
	СП	1,37	0,60474
Степная (Сибирь)	С, ТС, Г	1,5432	0,68291
	СП	2,0680	0,71138

Примечание: С – суглинок, ТС – тяжелый суглинок, Г – глина, СП – супесь.

$$T = 7,837 - 0,3824 \Pi^{2,276},$$

$$Z = 0,07846 \Pi^{0,976} - 0,3055,$$

$$F = 56,08 \Pi^{1,454},$$

$$R = 6,18 \Pi^{-0,046} - 5,774,$$

$$M = 2477,728 (\Pi - 0,456)^{-1,122},$$

где Π – эродируемость почвы, определяемая по гранулометрическому составу почвы и содержанию гумуса, т/га/год. Зависимость между слоем стока, уклоном, запасом воды в снеге и коэффициентом стока имеет вид:

$$h = HDI^E, \quad (12)$$

где H – запас воды в снеге, мм; I – уклон (tg); D и E – параметры, приведенные в табл. 3.

При машинных расчетах смыл на k -м отрезке (W_k) длиной l рассчитывается по зависимости:

$$W_k = [I_k][W_{kl}l - W_{(k-1)l}(k-1)l]/l, \quad (13)$$

где W_k – средний смыл на склоне длиной kl и соответственно для стандартной крутизны (4,5%), т/га; $[I_k]$ – фактор уклона на k -м отрезке склона, вычисляемый по зависимости (10).

Таким образом, модифицированная модель ГТИ более полно отражает условия развития эрозии на склоновых землях в период снеготаяния. Это относится к формированию стока воды, влиянию свойств почвы на смыл и эродируемости почвы на распределение смыва по длине склона. Предложена новая, физически более обоснованная зависимость для вычисления влияния фактора уклона на смыл. В адаптированной модели предусмотрен учет влияния конвергентности и дивергентности склона на смыл почвы. Все это позволило повысить точность модели. Расхождение между расчетными и фактическими значениями смыва по сравнению с другими моделями снизились, среднее отклонение 41,5% (табл. 1).

Вместе с тем, адаптированная модель отвечает требованиям, предъявляемым к расчетным зависимостям для проектирования противоэрозионных мер, и поэтому может быть использована при внутрихозяйственном землеустройстве с комплексом почвозащитных и водоохраных мер.

Однако следует иметь в виду, что эмпирическая модель не может в принципе отражать всего многообразия факторов эрозии, тем более в их взаимовлиянии. Несомненно, при накоплении новых данных предложенное уравнение может быть дополнено или переработано, но, в конечном итоге, только физическая модель, рассматривающая все компоненты процесса, будет вполне адекватно отражать это сложное явление.

1. Литвин Л.Ф. Современная эрозия почв на сельскохозяйственных землях России // Почвоведение. 1997. № 5. С. 592–599.
2. Швец Г.И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка (на примере Украины и Молдавии). Л.: Гидрометеиздат, 1974. 183 с.
3. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противоэрозионных мероприятий на Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 49 с.
4. Сурмач Г.П. Опыт расчета смыва почв для построения комплекса противоэрозионных мероприятий // Почвоведение. 1979. № 4. С. 92–104.
5. Иванов В.Д., Лопырев М.И. Об установлении категорий эрозионно опасных земель по интенсивности смыва почв талыми водами // Почвоведение. 1979. № 4. С. 85–89.
6. Mc Cool D.K., Brown L.C., Foster C.R., Mutchler C.K., Meyer L.D. Revised slope steepness factor for the universal soil loss Equation // Trans. Amer. Soc. of Agric. Engineers. 1987. V. 30(5). P. 1387–1396.
7. Гавриленко Л.Н., Гусаров В.Г. Дифференцированное применение противоэрозионных приемов // Водная эрозия почв и борьба с ней. М.: Колос, 1977. С. 102–115.
8. Швец Г.И. Теоретические основы эрозиоведения. Киев – Одесса: Вища школа, 1981. 224 с.
9. Соболев С.С. Развитие эрозионных процессов на территории Европейской части СССР и борьба с ними. М.: Изд-во АН СССР, 1948. Т. 1. 307 с.
10. Лидов В.П. Процессы водной эрозии в зоне дерново-подзолистых почв. М.: Изд-во МГУ, 1981. 167 с.
11. Чернышев Е.П. Тенденция изменения эрозии на территории южной части Русской равнины // Вопросы антропогенных изменений водных ресурсов. М.: Наука, 1976. С. 47–63.
12. Кирихина З.П., Пацукевич З.В. Эродруемость почв Европейской части Советского Союза // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17, Почвоведение. 1989. № 1. С. 50–57.
13. Водогрецкий В.Е. Влияние агролесомелиораций на годовой сток. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 184 с.
14. Бобровицкая Н.Н. Эмпирический метод расчета смыва со склонов // Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 202–211.
15. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of Rocky Mountain // Agric. Handbook # 282. Washington, 1965. 48 p.
16. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
17. Wischmeier W.H., Jonson C.B., Cross B.A. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites // J. Soil and Water Conservation. 1971. V. 26. P. 131–137.
18. Ларионов Г.А. Методика средне- и мелкомасштабного картографирования эрозионно опасных земель // Актуальные вопросы эрозиоведения. М.: Колос, 1984. С. 41–65.
19. Сластухин В.В. Вопросы мелиорации склонов Молдавии. Кишинев: Картя Молдовеняска, 1964. 212 с.
20. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Гидрофизическая концепция эрозии почв // Почвоведение. 1997. № 5. С. 541–548.
21. Liu B.Y., Nearing M.A., Rissie L.M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes // Trans. ASAE. 1994. № 36. P. 1835–1840.
22. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agric. Handbook # 537. Washington, 1978. 65 p.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
13.01.98

**ADJUSTMENT OF MELT WATER EROSION MODEL OF THE STATE
HYDROLOGICAL INSTITUTE FOR EROSION CONTROL PROJECTING
G.A. LARIONOV, N.G. DOBROVOL'SKAYA, S.F. KRASNOV**

S u m m a r y

Verification of Russian erosion models, using for evaluation of landloss by melt water runoff, showed that the best results may be obtained by the equation of SHI, though it can't be used for soil protection projecting. We have improved this equation to exclude this defect. For this purpose the function of the slope length was given as an explicit one, the new slope gradient factor was included, the slope runoff was used instead of river's one, the soil erodibility was evaluated more accurately, the impact of slope gradient and granulometric composition of soil on the runoff coefficient was taken into account.