

УТОЧНЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО СМЫВА ПОЧВ ОТ ТАЛЫХ ВОД ДЛЯ СЕВЕРНОЙ ЛЕСОСТЕПИ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

© 2023 г. И. А. Голубев^{a, b, *}

^aФилиал ПАО «Россети Сибирь» – «Красноярскэнерго», Красноярск, Россия

^bКрасноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

*E-mail: igorgol1984@bk.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023 г.

После доработки 16.11.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Необходимость проверки, модернизации и уточнения существующих моделей расчета потенциального смыва почв от воздействия талых вод обуславливается малым количеством исследований данного вида эрозии в лесостепной зоне Средней Сибири и, как следствие, невозможностью достоверно определить, насколько точны расчетные методики в существующем виде в данных условиях. Для сельскохозяйственной зоны Красноярского края разработана Региональная модель расчета потенциального смыва почв на основе Универсального уравнения и формулы Указаний. В данной работе представлены результаты ее проверки, выполненной с использованием результатов авторских полевых измерений смыва почв от талых вод методом обмера конусов выноса на сельскохозяйственных землях северной лесостепи Средней Сибири (Красноярская лесостепь). Предложен уточненный вариант Региональной методики, адаптированный к местным гидрометеорологическим условиям и представляющий собой формулу данной модели с добавленным корректирующим коэффициентом K , суммарно учитывающим влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и интенсивности поступления воды на поверхность почвы в период снеготаяния. Уточнение и адаптация методики позволили в среднем в три раза увеличить точность результатов ее применения по сравнению с исходным видом модели, средняя ошибка уменьшилась с 0.3 до 0.11. Уточненный вариант Региональной методики апробирован в процессе авторских исследований снеготалой эрозии почв в Красноярской лесостепи.

Ключевые слова: смыв, аккумуляция, склоны, талые воды, поверхностный сток, снегонакопление, интенсивность снеготаяния, осеннее увлажнение почв

DOI: 10.31857/S0869607123030060, EDN: HPLJEL

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время детально описана география распространения водной эрозии почв и ее закономерности, разработаны методики борьбы со смывом на пахотных угодьях, в том числе и в Сибири [4, 12, 13, 15]. Широко известны расчетные модели талого смыва, такие как методика Государственного гидрологического института, методика, предложенная в методических указаниях по проектированию противоэрозионной организации территории и др. [1, 10, 12, 14, 22].

Однако на территории северной лесостепи Средней Сибири (Красноярская лесостепь) экспериментальных данных о плоскостной эрозии почв очень мало, исследова-

ния производились в основном по овражной эрозии [11, 21]. Расчетные методики применяются редко, систематическое их использование на постоянной основе отсутствует, что не дает возможность сделать однозначный вывод о том, насколько они адаптированы к местным природно-климатическим условиям и точны в определении как среднесуточных значений потенциального смыва, так и величин эрозии на обрабатываемых землях за конкретные годы.

Интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов определяется как особенностями подстилающей поверхности (рельеф, растительность, и почвенный покров, а также хозяйственное использование земель), так и совокупностью воздействия гидрометеорологических факторов. В суровых условиях Приенисейской Сибири важную роль играют группы метеорологических факторов, прямо или опосредованно влияющих на распределение величин смыва и аккумуляции почв на исследуемой территории, а также на варьирование величин снеготалой эрозии по годам. К ним относятся величина и неравномерность распределения снега, глубина промерзания, величина предшествующего увлажнения почв, дружность снеготаяния и местная циркуляция ветра. Учет данных гидрометеорологических факторов в расчетных моделях имеет большое значение для точного определения величин потенциального смыва.

Для обрабатываемых земель Средней Сибири (земледельческая зона Красноярского края) Д.А. Бураковым на основе Универсального уравнения и формулы Указаний была предложена Региональная методика расчета потенциального смыва [3]. Она разрабатывалась с использованием отечественных нормативов, региональных особенностей и рекомендаций определения смываемости почв, эрозионного потенциала талых вод, параметров рельефа (эрозионный потенциал и форма склона). Однако, как и в случае с другими расчетными методиками, регулярного систематического использования предложенной Региональной модели на практике не производилось. В связи с этим, возникает необходимость ее проверки и уточнения.

Целью настоящей работы является уточнение Региональной методики Д.А. Буракова для природно-климатических условий Средней Сибири. Задачами работы являются: анализ эмпирических данных по смыву в районе исследований; расчет величин потенциального смыва почв с помощью Региональной модели Д.А. Буракова; анализ факторов, влияющих на интенсивность снеготалой эрозии; определение величин поправочного коэффициента в формулу Региональной методики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2009–2017 гг. проведены полевые исследования величин плоскостного смыва и аккумуляции почв от талых вод на пашне северной лесостепной зоны Средней Сибири (Красноярская лесостепь). Натурные наблюдения выполнялись в северной и центральной части Красноярской лесостепи [5, 7, 8].

Одновременно с этим, выполнен расчет величин потенциального смыва для опытных участков центральной части, на которых выполнялись полевые измерения смыва и аккумуляции почв. Для выполнения вычислений, по крупномасштабным топографическим планам на склонах опытных участков-микроводосборов были выделены 2–3 линии тока талых вод от водораздела до низины склонов (зона аккумуляции наносов). Далее рассчитаны их длина, крутизна, определены форма и экспозиция исследуемых склонов микроводосборов. По данным ближайшей метеорологической станции Сухобузимское, расположенной примерно в 20 км от опытных участков, и на основании авторских снегомерных съемок, были определены величины максимальных снегозапасов и выпавших осадков перед снеготаянием ($S + X$).

Приведем более подробное описание Региональной методики Д.А. Буракова [3]. Отметим, что данная модель была предложена до выполнения авторских полевых измерений эрозии почв. Уравнение методики имеет следующий вид:

Таблица 1. Рекомендации по определению величин смываемости почвы (П) [14]
Table 1. Recommendations for determining the values of soil washability (П) [14]

Эрозионный потенциал талых вод K_m	Смываемость почвы (П)
5	0.02
10	0.04
15	0.06
20	0.09
25	0.10
30	0.11
40	0.12
50	0.125
60	0.13
70	0.135
80	0.14
90	0.145
100	0.15
110	0.15
120	0.15

$$\mathcal{E}_m = 4K_m\Pi\Pi_0PF, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_m – потенциальный смыв от талых вод, т/га в год; K_m – эрозионный потенциал (индекс) талых вод; Π – величина смываемости для стандартной почвы (чернозем выщелоченный, развитый на лессовидных суглинках и лессах, сильно эродированный), Π_0 – коэффициент относительной смываемости почв, P – эрозионный потенциал рельефа; F – коэффициент формы склона.

Эрозионный индекс K_m определяется следующим образом:

$$K_m = Sa, \quad (2)$$

где S – максимальный запас воды в снеге, мм; a – интенсивность снеготаяния в часы пик. Данная величина приблизительно оценивается в диапазоне 0.20–0.30 мм/мин. В лесных районах, центральной и северной лесостепи величина a принимается равной 0.20 мм/мин, в южных лесостепных районах – 0.25 мм/мин [3]. Величины снегозапаса различной вероятности превышения (обеспеченность 1, 25, 50%) можно определять по данным ближайших гидрометеорологических станций. В процессе исследований в Красноярской лесостепи использовались данные ближайшей метеостанции Сухобузимское и авторских снегомерных съемок [8].

Величина Π определяется согласно Методическим указаниям [14]. Она представляет собой отношение среднего многолетнего смыва в условиях чистого пара к эрозионному индексу талых вод и определяется для условий стандартной почвы – чернозема выщелоченного на лессах и лессовидных суглинках. Определение величины Π производится зависимости от интенсивности снеготаяния (табл. 1).

Кроме того, для определения величины Π может быть использована формула, выведенная Д.А. Бураковым [3] на основе табл. 1:

$$\Pi = 0.043 \ln(K_m) - 0.0472. \quad (3)$$

Коэффициент относительной смываемости почв Π_0 зависит от типа и подтипа почв, механического состава, содержания гумуса и степени смытости. Информацию,

необходимую для определения P_0 , можно найти в почвенных очерках; кроме того, в Методических указаниях приведена таблица для определения данного показателя [14]. Для почвы-эталона, за который принимается сильно эродированный выщелоченный чернозем на лессах и лессовидных суглинках, занятый чистым паром, P_0 принимается равным 1.0 [3, 14].

Расчет эрозионного потенциала рельефа P производится в соответствии с Методическими указаниями, формула имеет следующий вид:

$$P = \left(\frac{L}{25}\right)^m \left[n^{1+m} - (n-1)^{1+m}\right] \left(\frac{i_n}{10}\right)^{1.45}, \quad (4)$$

где P – эрозионный потенциал рельефа, L – длина отрезка на линии, принимаемый 100 м; n – количество отрезков; i_n – уклон последнего отрезка, %, m – параметр. Для стандартной площадки шириной 25 м и длиной 100 м приведенная формула дает величину $P = 1.0$.

Для данной формулы принимаются значения параметра m , предложенные американскими исследователями Уишмайером и Смитом [3, 12, 22]:

- $m = 0.5$ при крутизне склона $\geq 5\%$;
- $m = 0.4$ при крутизне склона < 5 и $\geq 3.5\%$;
- $m = 0.3$ при крутизне склона < 3.5 и $\geq 1\%$;
- $m = 0.2$ при крутизне склона $< 1\%$.

Коэффициент F , учитывающий форму склона, определяется по следующей формуле:

$$F = 1.0 + 0.3 \ln \left(\frac{i_j}{i_{j-1}}\right), \quad (5)$$

где i_j и i_{j-1} означают уклоны j -го и $(j-1)$ -го участков данного склона, %.

В уравнении Региональной модели также присутствует коэффициент соответствия, равный 4. Он учитывает различные соотношения между параметрами в формулах Указаний и Универсальном уравнении, на которых, как было указано выше, основана Региональная методика.

Для определения величин отклонения расчетных величин смыва от измеренных, которые принимаем за истинные значения, были рассчитаны значения средних ошибок (ME) по формуле:

$$ME = \frac{\sum_{i=0}^n (\Theta_{\text{факт.}i} - \Theta_{\text{расч.}i})}{n}, \quad (6)$$

где $\Theta_{\text{факт.}i}$ – фактические величины смыва, за которые приняты данные, полученные в результате полевых наблюдений; $\Theta_{\text{расч.}i}$ – величины потенциального смыва, полученные с помощью расчетных методик; n – количество вычисленных значений.

После выполненных измерений и расчетов, произведено сопоставление полученных величин потенциального смыва почв с использованием Региональной модели Д.А. Буракова с результатами непосредственных полевых измерений смыва от воздействия талых вод, полученных методом обмера конусов выноса [5, 8] (табл. 2).

По данным табл. 2 видно, что величины потенциального смыва, полученные с помощью Региональной модели, существенно ниже измеренных величин, которые принимаем за истинные значения. Закономерно, что наибольшая разница зафиксирована на тех участках пашни, где обработка выполнялась вдоль склона. Это происходит вследствие резкого увеличения реальных значений эрозии в данных условиях.

Таблица 2. Потенциальный и измеренный смыв на опытных микроводосборах пашни центральной части Красноярской лесостепи, 2009–2011 г.

Table 2. Potential and measured flushing on experimental micro-catchments of arable land in the central part of the Krasnoyarsk forest-steppe, 2009–2011

№ участков	№ линий тока	2009 г.			2010 г.			2011 г.		
		Потенциальный смыв Эр, мм	Величина смыва по конусам выноса, мм	Направление обработки почв	Потенциальный смыв Эр, мм	Величина смыва по конусам выноса, мм	Направление обработки почв	Потенциальный смыв Эр, мм	Величина смыва по конусам выноса, мм	Направление обработки почв
1	1	0.1	2.5	Вдоль склона	0.13	0.1	Поперек склона	0.09	0.7	Поперек склона
	2	0.03			0.04			0.03		
2	1	0.2	0.5	Поперек склона	0.25	–	–	0.17	5.5	Вдоль склона
	2	0.12			0.15			0.1		
3	1	0.31	6.1	Вдоль склона	0.39	3.2	Вдоль склона	0.26	4.2	Вдоль склона
	2	0.29			0.36			0.25		
	3	0.08			0.1			0.07		
4	1	0.18	3.2	Вдоль склона	0.22	3.0	Вдоль склона	0.15	2.9	Вдоль склона
	2	0.39			0.48			0.33		
5	1	0.07	0.3	Поперек склона	0.08	–	–	0.06	–	–
	2	0.13			0.16			0.11		
6	1	0.11	0.4	Поперек склона	0.13	–	–	0.09	1.2	Поперек склона
	2	0.14			0.17			0.12		
	3	0.14			0.17			0.11		

Был произведен анализ полученных величин смыва в результате применения Региональной расчетной методики. Как было указано выше, данная модель учитывает следующие параметры:

- параметры, характеризующие рельеф и состояние подстилающей поверхности: тип, механический состав почв и степень их смытости, а также форма, длина и крутизна склонов;
- параметры, характеризующие влияние гидрометеорологических факторов: запас воды в снеге и максимальную интенсивность снеготаяния в часы пик.

Авторскими исследованиями установлено, что помимо вышеуказанных факторов, на интенсивность эрозии от талых вод в районе исследований заметное влияние оказывает величина предшествующего осеннего увлажнения почв (рис. 1), определяющая степень закупорки почвенных пор частицами льда (льдищность) и, соответственно, водопроницаемость грунтов и потерь талого стока на впитывание; а также количество поступающей воды на поверхность почвы при снеготаянии [6, 9, 18]. Значение коэффициента корреляции r величин среднего смыва и осеннего увлажнения (для центральной и северной части Красноярской лесостепи) составляет 0.58.

Из вышеприведенных данных и структуры расчетной формулы Региональной методики видно, что данная модель не учитывает влияние величин осеннего увлажнения и поступления воды на поверхность почвы. Это подтверждается сравнением динамики

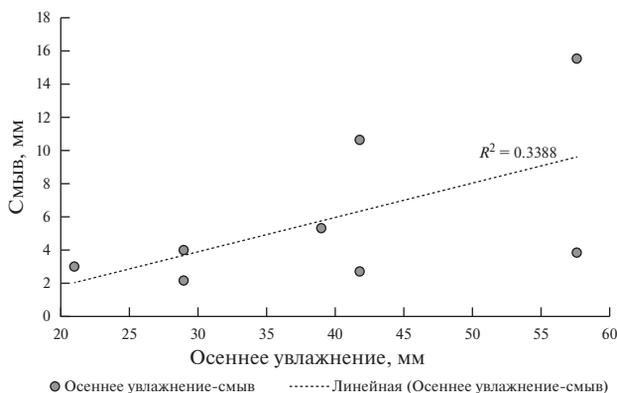


Рис. 1. График связи показателя осеннего увлажнения и смыва почв (Красноярская лесостепь, 2009–2011, 2013, 2017 гг.).

Fig. 1. Graph of the relationship between the indicator of autumn moisture and soil flushing (Krasnoyarsk forest-steppe, 2009–2011, 2013, 2017).

количественных характеристик гидрометеорологических факторов с расчетными величинами смыва по годам (табл. 3).

По данным табл. 3 заметно, что вычисленные значения потенциального смыва коррелируют с учетными параметрами (снегозапас и осадки), но с осенним увлажнением и интенсивностью поступления воды корреляция отсутствует. Расчет потенциаль-

Таблица 3. Потенциальный смыв почв и гидрометеорологические данные, центральная часть Красноярской лесостепи

Table 3. Potential soil washout and hydrometeorological data, central part of the Krasnoyarsk forest-steppe

№ учас-тков 2009 год	Средний потенциальный смыв Эр, мм*	Среднее суточное поступление воды на поверхность почвы, мм	Средний запас воды в снеге и осадки ($S + X$), мм (ст. Сухобузимское)	Слой поверхностного стока весеннего половодья (Y) р. Бузим–с. Маглиновка, мм	Расчетный показатель предшествующего осеннего увлажнения, мм
2009 год					
1	0.07	12.3	123.40	37.50	57.60
3	0.23				
4	0.29				
2010 год					
1	0.09	4.6	154.90	64.10	28.90
3	0.28				
4	0.35				
2011 год					
1	0.06	7.6	105.30	32.10	41.80
3	0.19				
4	0.24				

* Приведены средние величины для каждого участка

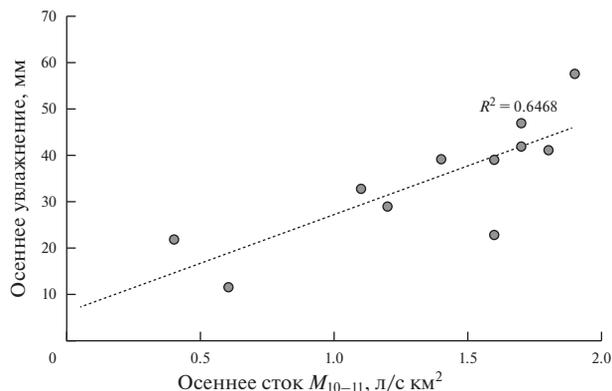


Рис. 2. График связи осеннего стока р. Бузим и расчетного показателя осеннего увлажнения почв (Красноярская лесостепь, 1999–2018 гг.).

Fig. 2. Graph of the relationship between the autumn runoff of the Buzim River and the calculated indicator of autumn soil moisture (Krasnoyarsk forest-steppe, 1999–2018).

ного смыва по Региональной методике для Красноярской лесостепи дает результаты, наиболее близкие к измеренным величинам в годы с низким предшествующим осенним увлажнением почв (2010 г.), что также подтверждает значение данного показателя и необходимость его учета в рассматриваемой модели.

В процессе исследований определены величины модуля осеннего стока суммарно за октябрь–ноябрь (M_{10+11}) ближайшей к опытным участкам реки Бузим (гидрологический пост в с. Малиновка). Для этих целей использованы данные по среднемесячным расходам воды за период 1999–2018 гг. Выполнен анализ и сопоставление полученных величин M_{10+11} с расчетным показателем осеннего увлажнения почв за период 1999–2018 гг. В результате выявлена прямая линейная зависимость между данными характеристиками: с возрастанием осеннего стока увеличивается показатель осеннего увлажнения (рис. 2). Установлена высокая степень корреляции между ними, $r = 0.87$. Следует отметить, что опытные участки в центральной части Красноярской лесостепи полностью располагаются в пределах водосбора р. Бузим, что также объясняет столь тесную корреляцию.

Следует отметить, что для корректной оценки влияния гидрометеорологических характеристик на величины смыва, анализ данных производился только для пахотных участков без нарушений условий агротехники (обработка поперек склона). Кроме того, для этих целей выбраны годы наблюдений с минимальными и максимальными значениями предшествующего осеннего увлажнения, наиболее близкими условиями снегонакопления (2009 и 2010 гг.). С помощью коэффициентов агрофона для микроводосборов пашни, занятых стерней и озимыми, измеренные значения смыва были приведены к величинам смыва в условиях чистого пара. Данные действия связаны с необходимостью минимизировать влияние сторонних факторов [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ УТОЧНЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Для получения близких к измеренным расчетных величин смыва при использовании Региональной методики, предлагается произвести ее уточнение путем добавления корректирующего коэффициента (сомножителя K), который суммарно учитывает влияние интенсивности поступления воды и предшествующего осеннего увлажнения

Таблица 4. Определение приблизительных значений сомножителя K
Table 4. Determination of approximate values of the K factor

№ учас-тков	№ линии стока	Эр		Средний потенциальный смыв (ΔP_{cp}), мм		Измеренный смысв учетом агрофона ($\Delta_{изм}$), мм		$\Delta \Delta = \Delta_{изм} / \Delta P_{cp}$		Корректирующий сомножитель K ($\Delta \Delta_{средн}$)	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
1	1	–	0.13	–	0.09	–	0.2	–	2.4	3.1	2.4
	2	–	0.04								
2	1	0.20	–	0.16	–	0.5	–	3.1	–		
	2	0.12	–								
5	1	0.07	–	0.1	–	0.3	–	3.0	–		
	2	0.13	–								
6	1	0.11	–	0.13	–	0.4	–	3.1	–		
	2	0.14	–								
	3	0.14	–								

почв. С помощью вышеперечисленных мероприятий по отбору и коррекции данных, направленных на минимизацию влияния сторонних факторов, расчет коэффициента выполнен для максимально близких гидрометеорологических условий ($S + X$) и одинакового состояния подстилающей поверхности (табл. 4). Основным влияющим фактором остается осеннее увлажнение почв.

Из табл. 4 видно, что приблизительные (первоначальные) значения K составляют в годы с высоким осенним увлажнением 3.1, низким – 2.4. Соответственно, в годы со средними значениями данного фактора $K = 2.8$. Таким образом, с учетом предлагаемого коэффициента Региональная модель Д.А. Буракова приобретает следующий вид:

$$\Delta_m = 4K_m \text{ПП}_0 \text{PFK}, \quad (7)$$

где K – коэффициент, суммарно учитывающий влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и величину поступления воды из снежного покрова в период снеготаяния, остальные значения прежние, в соответствии с формулой (1). Значения коэффициента K предлагается определять исходя из следующих диапазонов величин осеннего увлажнения почв: $K = 2.4$ при величине увлажнения до 30 мм; $K = 2.8$ при осеннем увлажнении от 30 до 45 мм; $K = 3.1$ при величине осеннего увлажнения свыше 45 мм [8].

Предложенное уточнение данной модели, основанное на результатах непосредственных натурных наблюдений за эрозионно-аккумулятивными процессами, анализе влияния факторов подстилающей поверхности и гидрометеорологических характеристик позволяет получить расчетные величины смыва почв от талых вод, близкие к измеренным (табл. 5).

Расчет величин предшествующего осеннего увлажнения почв [2, 16, 17], определяющих значения K в Региональной методике, сопряжен с некоторыми трудностями, связанными со значительными временными и трудовыми затратами. С целью оптимизации и упрощения процесса определения значений K , предлагается внести изменения в алгоритм его определения. Они заключаются в следующем.

Выявленная высокая степень корреляции осеннего стока и расчетного показателя осеннего увлажнения дает возможность определять значения коэффициента K , заменив для этого показатель осеннего увлажнения на величину модуля осеннего стока ближайших рек. Таким образом, с учетом данных изменений, для района авторских исследований K представляется возможным определять исходя из следующих градаций осеннего стока M_{10+11} :

Таблица 5. Сравнение результатов применения Региональной методики (до и после уточнения). Центральная часть Красноярской лесостепи, 2009–2011 гг.**Table 5.** Comparison of the results of the Regional Methodology application (before and after clarification). The central part of the Krasnoyarsk forest-steppe, 2009–2011

Год	S , мм	X , мм	K_m	Π	Π_0	m	P	\mathcal{E}_p (без учета K), мм	K	\mathcal{E}_p (с учетом K), мм	Измеренный смыв $\mathcal{E}_{изм}$, мм	ME (без учета K)	ME (с учетом K)
Участок 6, линия 1													
2009	91	7.3	22.8	0.087	0.8	0.3	0.211	0.13	3.1	0.42	0.4	0.3	0.11
Участок 1, линия 2													
2010	100.8	17.9	25.2	0.092	0.8	0.3	0.061	0.05	2.4	0.11	0.1	0.3	0.11
Участок 1, линия 1													
2011	81.6	17.2	20.4	0.082	0.8	0.3	0.202	0.11	3.1	0.34	0.7	0.3	0.11

- $K = 2.4$ при M_{10+11} до 1.2 л/с км²;
- $K = 2.8$ при M_{10+11} от 1.2 до 1.7 л/с км²;
- $K = 3.1$ при M_{10+11} свыше 1.7 л/с км².

ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная Д.А. Бураковым Региональная методика расчета потенциального смыва имеет важное практическое значение для определения расчетных значений эрозии от воздействия талых вод на обрабатываемых землях Средней Сибири. Следует отметить, что полученные опытным путем величины смыва почв на пашне центральной части Красноярской лесостепи находятся в широком диапазоне значений (0.1–6.1 мм слоя почвы), что является следствием комплексного воздействия различных факторов – как гидрометеорологических, так и условий подстилающей поверхности [8].

В первоначальном варианте представленной Региональной модели условия подстилающей поверхности в значительной мере учтены, в то время как влияние гидрометеорологических факторов требовалось уточнить и дополнить – результаты ее применения показывали существенное расхождение с измеренными величинами.

В дальнейшем на основе уточненных расчетных величин будет возможно качественное улучшение противоэрозионных мероприятий на пашне лесостепи Средней Сибири, что позволит увеличить урожайность сельскохозяйственных культур и снизить потери почвенного плодородия. Кроме того, непосредственные полевые исследования интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов совместно с получением уточненных расчетных величин смыва на обрабатываемых склонах водосборов поможет качественно и количественно оценить общие объемы смываемых почвенных частиц, процент доставки в эрозионно-руслую сеть и их долю в общем объеме экспорта наносов крупных рек [19, 20].

Уточненная формула Региональной модели была апробирована в процессе исследований смыва почв на пашне центральной части Красноярской лесостепи [8]. Данная модель может быть применима не только в районе авторских исследований, но и на других территориях со схожими природно-климатическими условиями. Для корректного применения модели и получения максимально точных результатов, следует произвести ее верификацию на основе полевых измерений в этих районах и при необходимости внести изменения в значения K , а также уточнить диапазоны значений показателя предшествующего осеннего увлажнения почв и модуля осеннего стока ближайших рек для определения величин предложенного коэффициента.

Следует отметить, что небольшая длина ряда наблюдений по годам, наличие участков с продольной обработкой почв, значительная разница в величинах снегонакопления в годы исследований не позволяют определить значения K с высокой точностью. По этой причине, в дальнейшем необходим более длинный ряд наблюдений за смывом и аккумуляцией на участках чистого пара без нарушений условий агротехники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований и анализа полученных данных, можно сделать следующие выводы:

- На пахотных микроводосборах центральной части Красноярской лесостепи диапазон значений потенциального смыва, полученных с помощью Региональной модели до ее уточнения, составляет от 0.03 до 0.48 мм. Измеренные величины смыва, полученные методом конусов выноса, составили от 0.1 до 6.1 мм.

- Предшествующее осеннее увлажнение почв и интенсивность поступления воды на поверхность почвы при снеготаянии оказывают заметное влияние на интенсивность эрозии от талых вод, прослеживается тесная корреляция между ними.

- Предложен вариант уточнения Региональной модели с помощью внедрения поправочного коэффициента K , суммарно учитывающего влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и интенсивности поступления талой воды на поверхность почвы при снеготаянии. Дополнительно предложен альтернативный вариант определения значений K в зависимости от модуля осеннего стока ближайших рек за октябрь–ноябрь. Установленные значения предложенного коэффициента в зависимости от величин осеннего увлажнения и модуля осеннего стока составляют от 2.4 до 3.1.

- Применение адаптированной формулы Региональной методики показывает результаты, приближенные к измеренным величинам. Точность определения расчетных величин смыва по сравнению с Региональной формулой в ее исходном варианте в среднем увеличивается в три раза, значения средней ошибки (ME) уменьшились с 0.3 до 0.11 (табл. 5). Диапазон значений потенциального смыва, рассчитанного с помощью уточненной Региональной модели, составляет от 0.09 до 1.15 мм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает огромную благодарность и признательность д-ру геогр. наук, профессору кафедры Природообустройства Красноярского ГАУ Д.А. Буракову; заведующему НИЛ Эрозии почв и русловых процессов Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д-ру геогр. наук С.Р. Чалову за обсуждение и советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобровицкая Н.Н. Эмпирический метод расчета смыва почвы со склонов // Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л., 1977. С. 202–211.
2. Бураков Д.А., Иванова О.И. Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири. М.: Метеорология и гидрология, 2010. № 6. С. 87–100.
3. Бураков Д.А. Эрозия почв: учеб. Пособие / Д.А. Бураков, Е.Э. Маркова; Краснояр. Гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2009. 160 с.
4. Вольнов В.В., Бойко А.В., Чичкарев А.С. Опыт использования противоэрозионных гидротехнических сооружений в борьбе со стоком талых вод и смывом пахотных почв на склоновых землях Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 6 (152). С. 42–48.
5. Голубев И.А. Влияние талых вод на эрозионно-аккумулятивные процессы на пашне в центральной лесостепной зоне Красноярского края // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2021. № 1 (165). С. 24–29.

6. Голубев И.А., Кожуховский А.В., Иванова О.И. Влияние осеннего увлажнения почв на эрозионно-аккумулятивные процессы в Красноярской лесостепи // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 1 (379). С. 130–142. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-130-142>
7. Голубев И.А. Смыв почв тальми водами на пашне северной части Красноярской лесостепи // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 360. С. 172–175.
8. Голубев И.А. Эрозия почв от талых вод на сельскохозяйственных землях Красноярской лесостепи: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27 / Голубев Игорь Александрович. Красноярск, 2022.
9. Иванова О.И. Гидрологический анализ и прогноз весеннего половодья лесных и лесостепных рек Средней Сибири: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27 / Иванова Ольга Игоревна. Красноярск, 2011.
10. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противозерозионных мероприятий на европейской территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 62 с.
11. Краснощеков Ю.Н. Процессы водной эрозии почв на сплошных вырубках в горных лесах бассейна оз. Байкал // Экологическое влияние леса на среду. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева АН СССР, 1977.
12. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
13. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002.
14. Методические указания по проектированию противозерозионной организации территории при внутрихозяйственном землеустройстве в зонах проявления водной эрозии. М.: ГосНИИ земельных ресурсов, 1989. 80 с.
15. Научные стационары: реалии, научная проблематика и инновации // Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию Нарымского стационара по изучению систем применения удобрений на дерново-подзолистой почве / Федеральное агентство научных организаций Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий (СибНИИСХиТ – филиал СФНЦА РАН). Томск : Графика, 2017. 263 с.
16. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Л., Гидрометеоиздат, 1979. 256 с.
17. Руководство по гидрологическим прогнозам. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. Вып. 1. 358 с.
18. Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. 176 с.: ил.
19. Чалов С.Р. Речные наносы в эрозионно-руслowych системах: автореф. дис. ... д-ра. геогр. наук: 25.00.27 / Чалов Сергей Романович. М. 2021.
20. Chalov S., Ivanov V. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget // Catena. 2023. V. 230. № 107212.
21. Kozhuhovsky A., Yamskikh G., Komatsu G. The evolution of gullies in steppe and forest-steppe landscapes of the Minusinskaya intermountain depression, Siberia: a case study in the central part of the Krasnoyarsk water reservoir // Phys. Geogr. 2015. V. 36. № 4. P. 305–321.
22. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agric. handbook № 537. Washington, 1978. 65 p.

Clarification of the Regional Methodology for Calculating Potential Soil Flushing from Meltwater for the Northern Forest-Steppe of Central Siberia

I. A. Golubev^{1, 2, *}

¹Branch of PJSC “Rosseti Sibir”- “Krasnoyarskenergo”, Krasnoyarsk, Russia

²Krasnoyarsk state agrarian university, Krasnoyarsk, Russia

*E-mail: igorgol1984@bk.ru

Abstract—The need to verify, modernize and refine existing models for calculating potential soil flushing from the effects of meltwater is due to the small number of studies of this type of erosion in the forest-steppe zone of Central Siberia and, as a consequence, the inability to

reliably determine how accurate the calculation methods are in their current form under these conditions. For the agricultural zone of the Krasnoyarsk Territory, a regional model has been developed for calculating potential soil flushing based on a Universal equation and the Instructions' formula. This paper presents the results of its verification, performed using the results of the author's field measurements of soil flushing from meltwater by measuring removal cones on agricultural lands of the northern forest-steppe of Central Siberia (Krasnoyarsk forest-steppe). A refined version of the Regional Methodology is proposed, adapted to local hydrometeorological conditions and representing the formula of this model with an added correction factor K , taking into account the influence of the previous autumn moistening of soils and the intensity of water flow to the soil surface during snowmelt. Refinement and adaptation of the methodology allowed to increase the accuracy of the results of its application by an average of three times compared to the original type of the model, the average error decreased from 0.3 to 0.11. The refined version of the Regional methodology was tested in the course of the author's research of snow-fall soil erosion in the Krasnoyarsk forest-steppe.

Keywords: flushing, accumulation, slopes, meltwater, surface runoff, snow accumulation, snowmelt intensity, autumn soil moisture

REFERENCES

1. Bobrovickaya N.N. Empiricheskij metod rascheta smyva pochvy so sklonov // Stok nanosov, ego izuzhenie i geograficheskoe raspredelenie. L., 1977. S. 202–211.
2. Burakov D.A., Ivanova O.I. Analiz formirovaniya i prognoz stoka vesennego polovod'ya v lesnyh i lesostepnyh bassejnah rek Sibiri. M., Meteorologiya i gidrologiya, 2010. № 6. S. 87–100.
3. Burakov D.A. Eroziya pochv: ucheb. Posobie / D.A. Burakov, E.E. Markova; Krasnoyarsk. Gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2009. 160 s.
4. Vol'nov V.V., Bojko A.V., Chichkarev A.S. Opyt ispol'zovaniya protiverozionnyh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij v bor'be so stokom talyh vod i smyvom pahotnyh pochv na sklonovyh zemlyah Altajskogo kraja // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. № 6 (152). S. 42–48.
5. Golubev I.A. Vliyanie talyh vod na erozionno-akkumulyativnye processy na pashne v central'noj lesostepnoj zone Krasnoyarskogo kraja // Ispol'zovanie i ohrana prirodnyh resursov v Rossii. 2021. № 1 (165). S. 24–29.
6. Golubev I.A., Kozhuhovskij A.V., Ivanova O.I. Vliyanie osennego uvlazhneniya pochv na erozionno-akkumulyativnye processy v Krasnoyarskoj lesostepi // Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy. 2021. № 1 (379). S. 130–142.
<https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-130-142>
7. Golubev I.A. Smyv pochv talymi vodami na pashne severnoj chasti Krasnoyarskoj lesostepi // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. № 360. S. 172–175.
8. Golubev I.A. Eroziya pochv ot talyh vod na sel'skohozyajstvennyh zemlyah Krasnoyarskoj lesostepi: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.27 / Golubev Igor' Aleksandrovich. Krasnoyarsk, 2022.
9. Ivanova O.I. Gidrologicheskij analiz i prognoz vesennego polovod'ya lesnyh i lesostepnyh rek Srednej Sibiri: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.27 / Ivanova Olga Igorevna. Krasnoyarsk, 2011.
10. Instrukciya po opredeleniyu raschetnyh gidrologicheskikh karakteristik pri proektirovanii protiverozionnyh meropriyatij na evropejskoj territorii SSSR. L.: Gidrometeoizdat, 1979. 62 s.
11. Krasnoshchekov Yu.N. Processy vodnoj erozii pochv na sploshnyh vyrubkah v gornyh lesah bassejna oz. Bajkal // Ekologicheskoe vliyanie lesa na sredu. Krasnoyarsk: Institut lesa i drevesyiny im. V.N. Sukacheva AN SSSR, 1977.
12. Larionov G.A. Eroziya i deflyaciya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye ocenki. M.: Izd-vo MGU, 1993. 200 s.
13. Litvin L.F. Geografiya erozii pochv sel'skohozyajstvennyh zemel' Rossii. M.: IKC "Akademkniga", 2002.
14. Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu protiverozionnoj organizacii territorii pri vnutrihozyajstvennom zemleustrojstve v zonah proyavleniya vodnoj erozii. M.: GosNII zemel'nyh resursov, 1989. 80 s.
15. Nauchnye stationary: realii, nauchnaya problematika i innovacii // Materialy nauchno-prakticheskoi konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchyonnoj 70-letiyu Narymskogo stacionara po izucheniyu sistem primeneniya udobrenij na dernovo-podzolistoj pochve / Federal'noe agentstvo nauchnyh organizacij Sibirskij nauchno-issledovatel'skij institut sel'skogo hozyajstva i torfa – filial FG-

-
- BUN Sibirskogo federal'nogo nauchnogo centra agrobiotekhnologij (SibNIISKHiT – filial SFNCA RAN). Tomsk: Grafika, 2017. 263 s.
16. Popov E.G. *Gidrologicheskie prognozy*. L., Gidrometeoizdat, 1979. 256 s.
 17. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. Vyp. 1. 358 s.
 18. Tanasienko A.A. *Specifika erozii pochv v Sibiri*. – Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2003. 176 s.: il.
 19. Chalov S.R. *Rechnye nanosy v erozionno-ruslovyh sistemah: avtoref. dis. ... d-ra. geogr. nauk: 25.00.27 / Chalov Sergej Romanovich*. Moskva, 2021.
 20. Chalov S., Ivanov V. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget // *Catena*. 2023. V. 230. № 107212.
 21. Kozhuhovsky A., Yamskikh G., Komatsu G. The evolution of gullies in steppe and forest-steppe landscapes of the Minusinskaya intermountain depression, Siberia: a case study in the central part of the Krasnoyarsk water reservoir // *Phys. Geogr.* 2015. V. 36. № 4. P. 305–321.
 22. Wischmeier W.H., Smith D.D. *Predicting rainfall erosion losses // Agric. handbook № 537*. Washington, 1978. 65 p.