

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДОСТАВКИ НАНОСОВ

А.Ю. Сидорчук

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет

fluvial05@gmail.com

Поступила в редакцию 12.03.2025

После доработки 16.04.2025

Принята к публикации 24.06.2025

Аннотация. Предложена методика расчета коэффициента доставки наносов при эрозии на малом водосборе на основе физически обоснованной модели эрозии связных почв и грунтов, транспорта и аккумуляции наносов. Учтена зависимость интенсивности эрозии от количества транспортируемых в данном месте частиц наносов. Если необходимо рассчитывать абсолютные величины эрозии и аккумуляции, то предлагаемая модель хорошо калибруется по данным измерений, что позволяет ее использовать для водосборов, для которых есть данные измерений хотя бы для одного эпизода стока. Если достаточно знать только коэффициент доставки наносов, то эта величина рассчитывается на основе относительных величин эрозии и аккумуляции и практически не зависит от абсолютной скорости эрозии. Главным фактором является неразмывающая скорость потока, значение которой достаточно определенно назначается на основе известных формул. Это позволяет рассчитывать коэффициент доставки наносов на основе сравнительно небольшого количества входных характеристик рельефа, стока воды и устойчивости почвогрунтов к размыву потоком воды. Отсутствие необходимости точной калибровки делает предлагаемую модель удобной для практического применения, а также для исследования зависимости коэффициента доставки от влияющих на него факторов.

Ключевые слова: эрозия почв; аккумуляция наносов; транспорт наносов; физически обоснованная модель

DOI: <https://doi.org/10.71367/3034-4638-2025-2-3-9-18>

ВВЕДЕНИЕ

Коэффициент доставки K_d для некоторого водосбора с площадью F рассчитывается как

$$K_d = T/E = (E - A)/E \quad (1)$$

Здесь E — поток наносов (расход) за счет эрозии, A — аккумуляция наносов на водосборе и T — расход наносов в замыкающем створе данного водосбора в среднем за период времени Δt .

Определение коэффициента доставки наносов совершенно необходимо при исследовании эрозионных процессов на некотором склоне или водосборе, так как часто при оценке степени влияния эрозионных процессов на окружающую среду и хозяйственные объекты принимается во внимание только величина собственно эрозии почв и грунтов. Во многом это связано с тем, что полевые измерения и/или расчеты дают один из компонентов уравнения (1) — поток наносов за счет эрозии E .

Публикации с полным циклом измерений с вычислением K_d на основе этих измерений редки (Ажигиров и др., 1987; Безухов и др., 2019). Чаще другие компоненты уравнения (1) приходится оценивать расчетом. Методологическая база для этого довольно узкая. Это физически обоснованные модели эрозии почв, такие как WEPP (Nearing et al., 1989), LISEM (Roo et al., 1996), GUEST (Hairsine, Rose, 1992) и т. п. Наиболее просто использовать эмпирические связи K_d с площадью водосбора F :

$$K_d = aF^{-b} \quad (2)$$

Величина показателя степени b обнаружила определенную устойчивость и равна 0.2 как для бассейнов рек Восточно-Европейской равнины (Сидорчук, 1995), так и для равнинных рек США (USDA, 1972). Причина устойчивости показателя степени b неизвестна, а значения коэффициента a разнообразны, и источники этого разнообразия исследованы не были. Попытки привлечь для анализа

на основе полевых наблюдений другие факторы, влияющие на K_d (Безухов и др., 2019), большого успеха не принесли, в основном из-за малого количества исходных данных при большом количестве факторов. М.М. Ивановым (2017) была предложена каскадная модель для вычисления K_d , некоторую популярность приобрела феноменологическая модель Борзелли с соавторами (Borselli et al., 2008; Vigiak et al., 2012). Однако физический смысл как уравнения (2), так и прочих эмпирических моделей остается слабо исследованным.

Наиболее обоснованно выглядит использование для оценки K_d для склонов и малых водосборов моделей эрозии связных почв и грунтов, содержащих процедуру расчета аккумуляции наносов или транспортирующей способности потока, таких как WEPP (Nearing et al., 1989), или LISEM (Roos et al., 1996), или модель Ю.П. Сухановского и А.Н. Пискунова (2007). Эти модели разнообразны по содержанию, базируются на разных принципах, однако при их применении возможно анализировать физические основания методов расчета. В некоторых реализуется зависимость интенсивности эрозии от количества транспортируемых в данном месте частиц наносов. Эта зависимость специально подчеркивалась П. Геосайном (Hairsine, Rose, 1992), а Г.А. Ларионов ввел в гидрофизическую модель эрозии следующий постулат: «...в точке касания влекомой частицы ложа потока отрыв новой частицы невозможен» (Ларионов, Краснов, 1992, с. 5). В предлагаемой ниже методике это положение полностью реализуется и дополняется.

Таким образом, целью статьи является создание методики расчета коэффициента доставки наносов, основанной на физически обоснованной модели эрозии связных грунтов и транспорта наносов с учетом взаимодействия этих процессов. Ставится задача использования в расчетах сравнительно небольшого количества входных характеристик рельефа, стока воды и устойчивости почвогрунтов к размыву потоком воды.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА

Рассмотрим компоненты уравнения (1). Расход (скорость отрыва) эродируемых наносов E равен:

$$E = F_E \sum_{i=1}^N (V_E)_i \quad (3)$$

Здесь V_E – скорость эрозии, N – количество элементарных площадей в области эрозии, F_E – элементарная площадь эрозии. Так как все расчеты в рамках предлагаемой методики ведутся на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) по прямоуголь-

ной сетке, элементарные площади совпадают с пикселями сетки ЦМР.

Скорость эрозии связных грунтов при линейной эрозии (т. е., в данном контексте, микроручейковой) равна (Сидорчук, 1998):

$$V_E = (1 - \alpha) k_E q S \quad (4)$$

Здесь k_E – размерный коэффициент эродируемости грунтов, q – удельный на ширину потока расход воды, S – уклон поверхности водосбора. Произведение удельного расхода на уклон потока пропорционально произведению скорости потока на донное касательное напряжение (Hairsine, Rose, 1992) или (примерно) кубу скорости потока (Ларионов, Краснов, 1992). Если скорость потока меньше срывающей скорости U_{cr2} для данного типа почвы, скорость эрозии равна нулю. Для удобства вычислений такие пиксели приобретают условный индекс Y , который следует назначить больше максимального значения результата применения инструмента ГИС «суммарный сток» (flow accumulation), который в данном контексте измеряется в количестве образующих водосбор пикселей.

Срывающая скорость примерно на 20% больше неразмываемой U_{cr1} , которая по Г.И. Шамову (1959), с учетом влияния глубины потока d , равна

$$U_{cr1} = k_{sh} D^{1/3} d^{1/6} \quad (5)$$

Здесь k_{sh} – размерный коэффициент, D – средний диаметр частиц наносов (агрегатов почвы).

В формуле (4) учитывается, что часть α элементарной площади эрозии (т. е. часть площади пикселя ЦМР) F_{Etr} занята транспортируемыми частицами наносов на площади F_{Etr} :

$$\alpha = F_{Etr}/F_E \quad (6)$$

Коэффициент α соответствует концентрации подвижных частиц наносов. На площади F_{Etr} эрозия не происходит.

Баланс влекомых наносов в i -том пикселе равен: 1) расходу наносов E_i , поступающих с поверхности данного i -того пикселя за счет эрозии; 2) притоку наносов $\sum_{k=1}^K q_{sk}$ с вышележащих K пикселей, примыкающих к i -тому пикселю из линий тока, соединяющихся в i -том пикселе; 3) выносу наносов q_{si} из i -того пикселя:

$$q_{si} = E_i + \sum_{k=1}^K q_{sk} = [(1 - \alpha) F_E k_E q S]_i + \sum_{(k=1)}^K q_{sk} \quad (7)$$

Расход влекомых наносов q_s , следуя М.А. Великанову (1958), рассчитываем для i -того пикселя как произведение концентрации частиц наносов α на скорость их перемещения U^* и площадь поперечного сечения слоя движения частиц F_{Δ} .

$$q_{si} = (\alpha F_{\Delta} U^*)_i \quad (8)$$

Так как расходы наносов, рассчитанные по формулам (7) и (8), равны, то

$$\alpha_i = \frac{(F_E k_E qS)_i + \sum_{k=1}^K q_{sk}}{(F_E k_E qS + F_{\Delta} U^*)_i} \quad (9)$$

В формуле (9) расход наносов q_{sk} в каждом из вышележащих примыкающих K пикселей считается по формуле (7). Если по расчету $\alpha_i > 1$, то $\alpha_i = 1$. Такие пиксели также приобретают условный индекс Y . Площадь поперечного сечения слоя движения частиц F_{Δ} равна произведению среднего диаметра частиц наносов D на ширину поперечного сечения, в данном случае, ширину пикселя W .

$$F_{\Delta} = DW \quad (10)$$

В модели принято, что частицы наносов перемещаются во влекомом состоянии и/или сальтацией слоем в одну частицу (агрегат почвы), что характерно для потоков малой глубины. Взмучивание частиц не предусмотрено.

Скорость перемещения частиц влекомых наносов U^* по М.А. Дементьеву (1955) в первом приближении равна разности скорости потока U и критической скорости начала движения частиц U_{cr1} :

$$U^* = U - U_{cr1} \quad (11)$$

Если скорость $U^* < 0$, то $U^* = 0$. В таких пикселях происходит полная аккумуляция наносов, поступающих с их локального водосбора, и $q_s = 0$. На таких пикселях последовательности (7) – (9) заканчиваются.

Скорость турбулентного потока запишем с помощью формулы Шези – Маннинга:

$$U = \frac{d^{2/3}}{n} \sqrt{S} \quad (12)$$

Здесь n – размерный коэффициент шероховатости. Все дополнительные эффекты, связанные с турбулентностью потока (пульсации скорости и т. п.), в явном виде не учитываются. Удельный расход воды q и глубина потока d определяются через расход воды Q по эмпирическим формулам, примеры построения которых можно найти, например, в работе (Nachtergaele et al., 2002):

$$q = a_q Q^{b_q} \quad (13)$$

$$d = a_d Q^{b_d} \quad (14)$$

Расход воды Q с локального малого водосбора для P -того пикселя рассчитывается как

$$Q = XF_E R_P \quad (15)$$

Здесь X – скорость водоподдачи (интенсивность снеготаяния минус скорость инфильтрации и испа-

рения), R_P – число пикселей в площади локального водосбора для P -того пикселя «суммарный сток» (flow accumulation).

Суммарная величина эрозии с водосбора за время ΔT рассчитывается как

$$E_T = k_E F_E \sum_{i=1}^N [(1 - \alpha)qS]_i \Delta T \quad (16)$$

Общая аккумуляция A на водосборе вычисляется в M пикселях с индексом Y как сумма разностей притока и выноса наносов по формуле (7) за время ΔT

$$A = \Delta T \sum_{m=1}^M (\sum_{k=1}^K q_{sk} - \alpha F_{\Delta} U^*) \quad (17)$$

Если разность притока и выноса наносов в пикселе отрицательна (что может быть в пикселях с $\alpha = 1$ или $U_{cr1} < U < U_{cr2}$), аккумуляция в таких пикселях равна нулю.

Шаг по времени ΔT в модели зависит от точности исходных данных и физики процесса (т. е. максимальной длины линий тока L_{max} и скоростей перемещения частиц наносов U^*). Целесообразно считать при

$$\Delta T > L_{max} / U^* \quad (18)$$

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА

Для расчета необходима цифровая модель рельефа водосбора без предварительного заполнения естественных замкнутых понижений. Разрешение цифровой модели должно учитывать устойчивые элементы эрозионного рельефа на водосборе. Используется также набор эмпирических коэффициентов и констант: $k_E, k_{sh}, n, X, a_q, b_q, a_d, b_d, F_E, D$, входящих в соответствующие формулы. Из них площадь пикселя F_E определяется разрешением ЦМР, коэффициент шероховатости Маннинга n , крупность агрегатов почвы (частиц) D и скорость водоподдачи X задаются на основании исходных данных, коэффициенты a_q, a_d и показатели степени b_q, b_d в эмпирических формулах (13) и (14) определяются по данным измерений или берутся из соответствующих публикаций (например, Nachtergaele et al., 2002), размерный коэффициент k_{sh} в формуле Шамова берется, например, из публикации (Шамова, 1959). Коэффициент эродированности грунтов k_E подбирается в процессе калибровки модели.

Последовательность расчетов следующая:

1) По цифровой модели рельефа (ЦМР) рассчитываются поле «суммарный сток» (flow accumulation), поле направлений линий тока и поле уклонов. Значения пикселей поля «суммарный сток» (flow accumulation) используются как поле индексов.

2) Рассчитывается поле скоростей перемещения частиц наносов U^* по формуле (11). вспомога-

тельными являются поле глубин потока как поле «суммарный сток» (flow accumulation), возведенное в степень b_d и умноженное на $a_d (XF_E)^{b_d}$, и поле уклонов, возведенных в степень 0.5.

3) Пиксели, в которых происходит полная аккумуляция наносов, поступающих с их локального водосбора, определяются по нулевой или отрицательной скорости перемещения частиц U^* , им присваивается индекс Y . В пикселях с индексами 0 и Y задаются значения расходов наносов $q_s = 0$.

4) Для всех пикселей с положительными значениями разности $U - U_{cr2}$ рассчитывается поле максимально возможных скоростей эрозии по формуле (4) при $\alpha = 0$. Для этого рассчитывается поле удельных расходов воды как поле «суммарный сток» (flow accumulation), возведенное в степень b_q и умноженное на $a_q (XF_E)^{b_d}$. Это поле умножается на поле уклонов. Как уже указывалось, если срывающая скорость U_{cr2} меньше скорости потока U , эрозия не происходит. Однако если $U^* > 0$, транзит наносов в таком пикселе может продолжаться, равно как может происходить аккумуляция наносов.

5) Последовательно для пикселей с индексами 1, 2 и т. д., до максимума, рассчитываются величины расхода наносов по формулам (7) – (8) и концентрации влекомых наносов α по формуле (9). Если по расчету $\alpha_i > 1$, то $\alpha_i = 1$. В таких пикселях эрозия не происходит, но могут идти транзит и аккумуляция наносов. Тогда расход наносов считается по

формуле (8) по всему поперечному сечению слоя движения частиц.

6) По формуле (16) рассчитывается суммарная величина эрозии на водосборе E_T .

7) Для замыкающих пикселей в линиях тока, что заканчиваются в пикселях с индексом Y по формуле (17), рассчитывается суммарный баланс наносов. Это аккумуляция в пикселях с индексом Y и общая аккумуляция A на водосборе.

8) По формуле (1) рассчитывается коэффициент доставки для водосбора.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

В качестве примера выбран водосбор Егорова оврага площадью около 32 га в бассейне р. Протвы (приток р. Оки). Здесь в 1982–1992 гг. были проведены работы по измерению стока воды и влекомых наносов, объемов эрозии и аккумуляции (подробное описание объекта, методики работ и предварительные результаты даны в книге (Ажигиров и др., 1987)). Так, было установлено, что в среднем вынос наносов с водосбора составил 2 т/га за период снеготаяния в 1982–1989 гг. (Бутаков и др., 1991), коэффициент доставки – 56% в 1982–1985 гг. На водосборе в 2011 г. инициативной группой была проведена съемка высот лидаром, получена цифровая модель рельефа с размером пикселя 5 x 5 м и вертикальным разрешением 0.5 м (рис. 1). Эти данные (доступны по ссылке www.fluvial-systems.net/sediment_delivery_ratio/Egorov%20gully.html) позволяют использовать водосбор Егорова оврага для калибровки представленной модели и для проведения численных экспериментов для проверки чувствительности модели к исходным данным. Единицы измерения для переменных и констант в расчетах и на рисунках употреблялись в системе СИ, если иное специально не оговорено. Так, величины эрозии/аккумуляции получаются в м³/с, но в отдельных случаях для удобства они выражались в кг/с, размерность скорости эрозии м/с, но часто выражается в т/га за некоторый период, коэффициент доставки рассчитывался в долях, а выражался в %, и т. п.

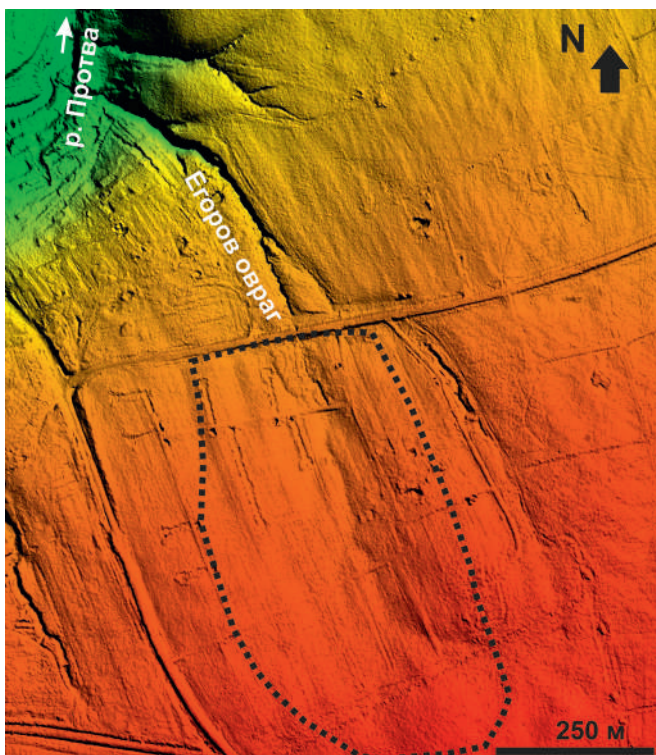


Рис. 1. Участок бассейна р. Протвы (съемка лидаром в 2011 г.) с водосбором Егорова оврага (выделен пунктиром)

Fig. 1. Section of the Protva River basin (lidar survey) with the Egorov gully catchment (highlighted by a dotted line)

Калибровка модели осуществлялась для условий измеренного стока воды и наносов во время снеготаяния 1982–1983 гг., по данным измерений (Ажигиров и др., 1987) были заданы значения расходов воды Q , коэффициентов n , a_q , b_q , a_d , b_d , диаметра почвенных агрегатов D . Варьировались и калибровались коэффициент эролируемости грунтов k_E и неразмывающая скорость потока U_{cr} . Численные эксперименты показали, что модель хорошо калибруется.

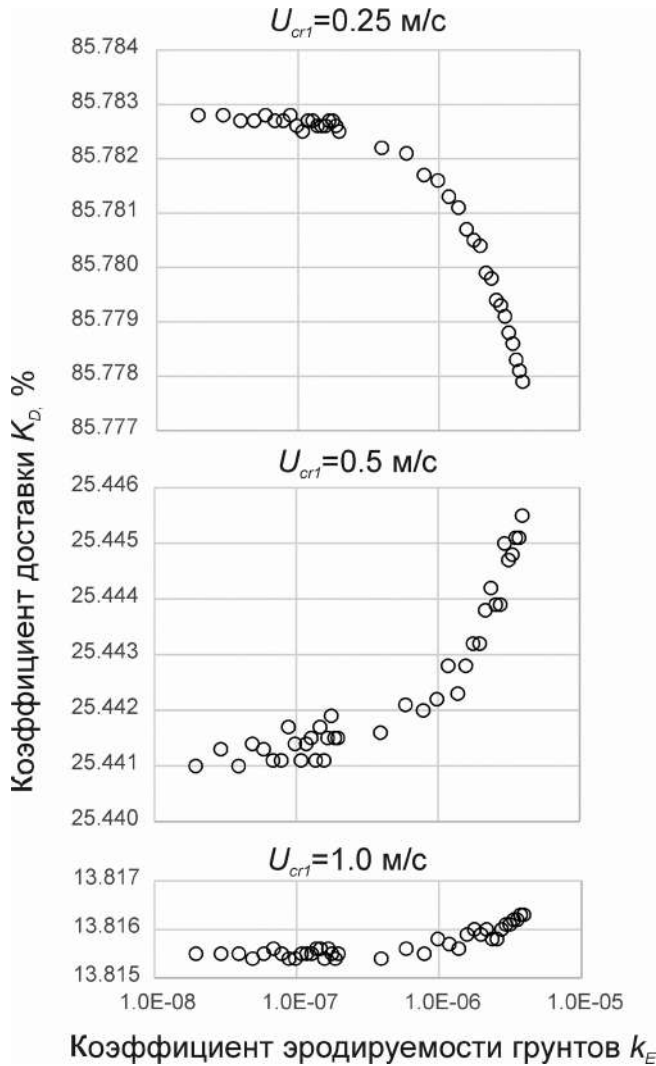


Рис. 2. Связь между заданным коэффициентом эролируемости грунтов и рассчитанным по модели коэффициентом доставки при разных значениях неразмывающей скорости потока для условий водосбора Егорова оврага

Fig. 2. The relationship between the specified erosion coefficient and calculated with the model sediment delivery ratio for different the non-eroding flow velocities for the Egorov gully catchment conditions

Величина рассчитанного по модели коэффициента доставки практически не зависит от коэффициента эролируемости грунтов k_E (рис. 2). При неизменном значении U_{cr1} и изменении k_E более чем на два порядка значение коэффициента доставки менялось не более чем на 0.006%.

Для условий водосбора Егорова оврага 1982–1983 гг. связь рассчитанного коэффициента доставки с неразмывающей скоростью U_{cr1} . (определяющей количество областей полной аккумуляции на водосборе) нелинейная, для измеренного в этот период коэффициента доставки 50% необходима неразмывающая скорость $U_{cr1} = 0.36$ м/с (рис. 3).

Контрольные расчеты проведены для периодов снеготаяния 1982–1992 гг. (с перерывами) на основе суточных измерений стока воды (всего 8 сезонов и 129 суток, данные любезно предостав-

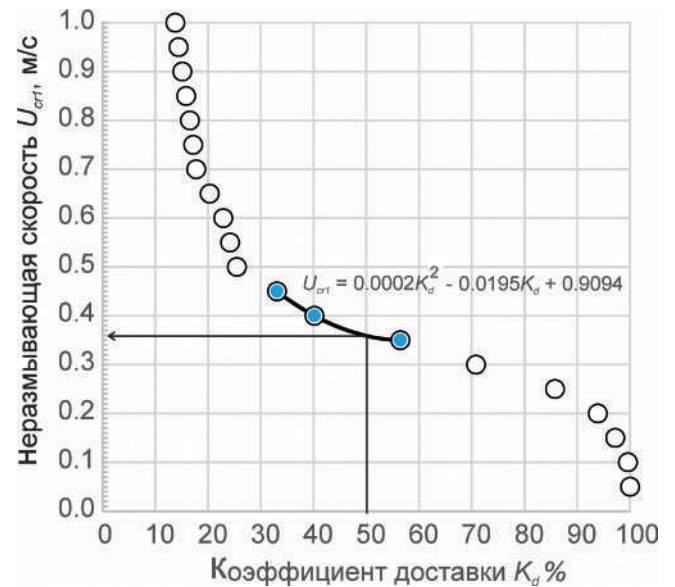


Рис. 3. Связь между рассчитанным по модели коэффициентом доставки и заданной неразмывающей скоростью потока для условий водосбора Егорова оврага. Выделен участок связи, аппроксимированный параболой и использованный для калибровки модели, т.е. определения оптимальной неразмывающей скорости потока по измеренному коэффициенту доставки

Fig. 3. The relationship between the calculated with the model sediment delivery ratio and the specified non-eroding flow velocity for the Egorov gully catchment conditions. The section of the relationship approximated by a parabola and used for model calibration is highlighted: determining the optimal non-eroding flow velocity based on the measured sediment delivery ratio

лены Л.Ф. Литвиным). Шаг расчета по времени ΔT составлял сутки, в 87% случаев $\Delta T > L_{\max} / U^*$.

Связь рассчитанной величины эрозии E ($\text{м}^3/\text{с}$) с величиной коэффициента эродируемости грунтов k_E ($1/\text{м}$) линейная (рис. 4):

$$E = ak_E, \quad (19)$$

но размерный коэффициент a ($\text{м}^2/\text{с}$) зависит от срывающей скорости U_{cr2} . Зависимость эта нелинейная, на нужном участке аппроксимируется параболой (рис. 5):

$$a = (-1449U_{cr2}^2 + 324U_{cr2} + 692) \quad (20)$$

Так как неразмывающая скорость хорошо калируется по измеренному коэффициенту доставки (см. рис. 3), а срывающая скорость U_{cr2} равна $1.2U_{cr1}$, то и коэффициент эродируемости грун-

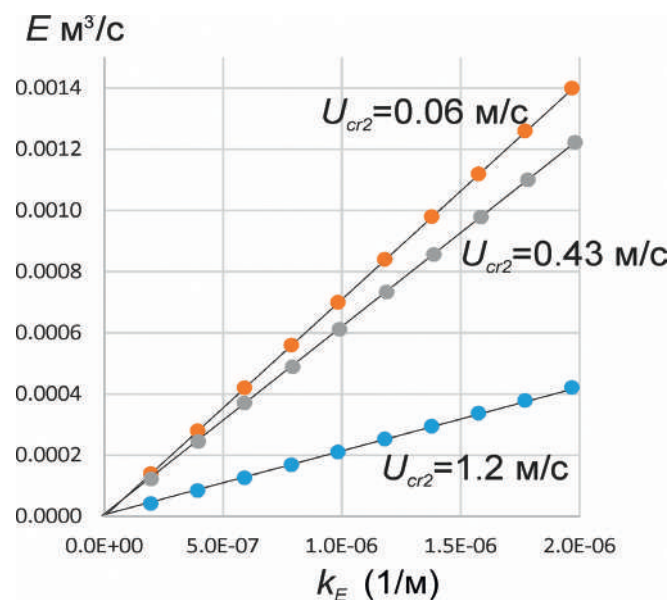


Рис. 4. Линейная связь между рассчитанной величиной эрозии по формулам (3) и (4) и заданным коэффициентом эродируемости грунтов для условий водосбора Егорова оврага при разных значениях срывающей скорости. Связь используется для калировки модели: определения оптимального коэффициента эрозии по измеренным скорости эрозии и оптимальной срывающей скорости потока

Fig. 4. Linear relationship between the calculated erosion intensity and the specified erosion coefficient for the Egorov gully catchment conditions at different shear velocity values. The relationship is used for model calibration: determining the optimal erosion coefficient based on the measured erosion rate and optimal shear flow velocity

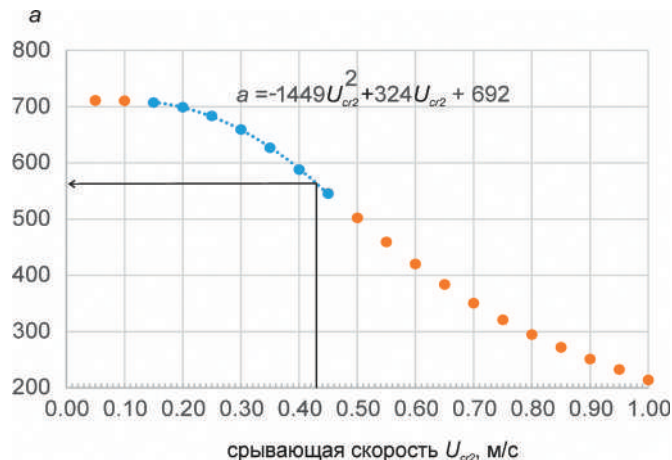


Рис. 5. Промежуточная калировочная связь между срывающей скоростью с коэффициентом в линейной связи между величиной эрозии и коэффициентом эродируемости грунтов. Пунктиром выделен участок связи, использованный для калировки модели

Fig. 5. Intermediate calibration relationship between the critical velocity and the coefficient in the linear relationship between the erosion intensity and the erosion coefficient. The dotted line highlights the section of the relationship used to calibrate the model

тов легко определяется по измеренной величине эрозии. Для рассматриваемого водосбора средняя скорость эрозии составляла в 1982–1983 гг. 5.7 т/га за период снеготаяния и оптимальное значение $k_E = 7.62 \times 10^{-6}$.

С указанными величинами проведен расчет эрозии, аккумуляции и транспорта наносов, а также коэффициентов доставки для наблюдаемых суточных величин стока воды во время снеготаяния 1982–1992 гг. Главным фактором, определяющим характеристики эрозии и аккумуляции на конкретном водосборе, в данном случае Егорова оврага, является сток воды. Со стоком воды однозначной зависимостью связана величина эрозии на водосборе (рис. 6), величины аккумуляции и транспорта наносов зависят также от величины коэффициента доставки. Со стоком воды также связаны скорость перемещения частиц наносов и доля площади водосбора, занятая аккумуляцией (рис. 7). Коэффициент доставки K_d увеличивается с увеличением стока воды, но связь ступенчатая, K_d резко увеличивается на 10–20% по достижении некоторой критической величины стока (рис. 8).

Рассчитанная величина эрозии на водосборе (средняя за 1982–1992 гг., суммарная за один период снеготаяния для каждого пикселя, для удобства пересчитанная в кг при удельном весе

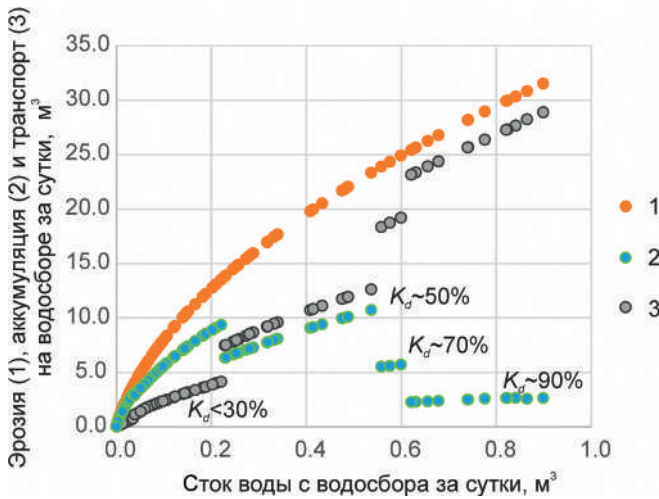


Рис. 6. Рассчитанные по калиброванной модели скорости эрозии (1), аккумуляции (2) и транспорта наносов (3) на водосборе Егорова оврага для различных условий стока воды во время снеготаяния сезонов 1982–1992 гг.

Fig. 6. The erosion (1), accumulation (2) and sediment transport (3) rates estimated using the calibrated model for the Egorov gully catchment under different water runoff conditions during the snowmelt seasons of 1982–1992

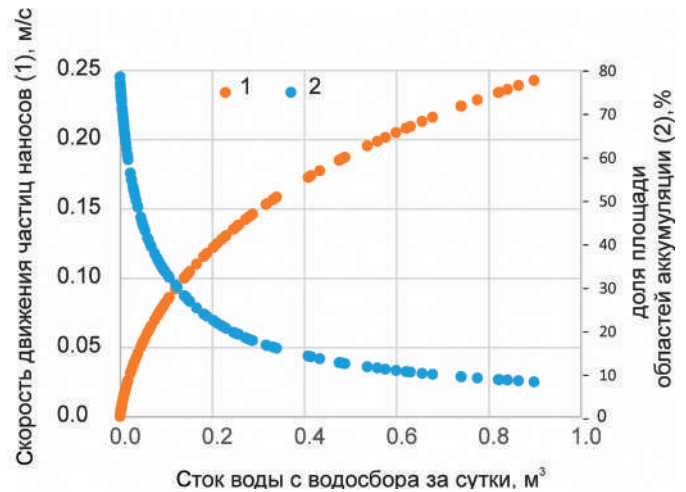


Рис. 7. Рассчитанные по калиброванной модели скорости перемещения частиц наносов U^* (1) и доли площади водосбора, на которой происходит аккумуляция (2), на водосборе Егорова оврага для различных условий стока воды во время снеготаяния сезонов 1982–1992 гг.

Fig. 7. The sediment particle movement rates U^* (1) and the proportion of the catchment area where accumulation occurs (2) in the Egorov gully catchment for different water runoff conditions during snowmelt in the 1982–1992 seasons, calculated using the calibrated model

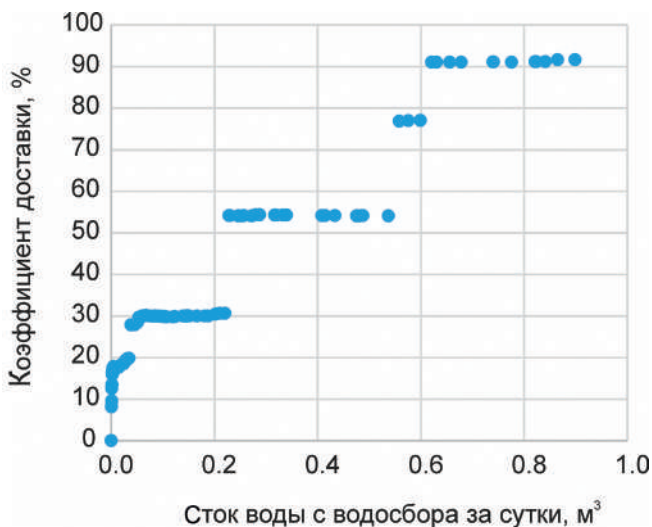


Рис. 8. Рассчитанные по калиброванной модели коэффициенты доставки наносов на водосборе Егорова оврага для различных условий стока воды во время снеготаяния сезонов 1982–1992 гг.

Fig. 8. Sediment delivery ratio in the catchment area of the Egorov gully calculated using the calibrated model for different water runoff conditions during snowmelt in the 1982–1992 seasons

почвы пахотного слоя 1000 кг/м^3 , рис. 9) показывает существенную дифференциацию этой величины по площади из-за наличия на водосборе хорошо выраженных продольных ложбин, в которых концентрируется сток и происходит наиболее активная эрозия. Напротив, области аккумуляции расположены пятнами и полосами поперек уклона местности (рис. 10).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные эксперименты показали, что предлагаемая модель, во-первых, хорошо калибруется по данным измерений. Это позволяет получать для различных входных характеристик абсолютные значения эрозии и аккумуляции для водосборов, для которых есть данные измерений E и K_d хотя бы для нескольких эпизодов стока. Калибровка позволяет сгладить влияние на результаты расчета вторичных факторов эрозии, неучтенных в модели. Во-вторых, при расчете коэффициента доставки результаты расчета по модели практически не зависят от скорости эрозии (см. рис. 2). Это означает, что можно назначать коэффициент

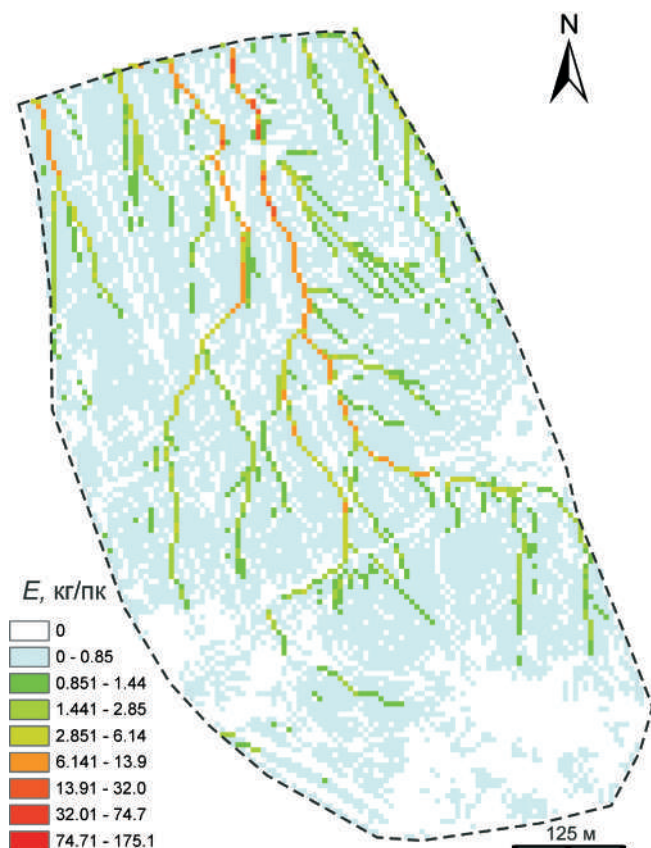


Рис. 9. Распределение рассчитанных средних величин эрозии E для периода снеготаяния (в кг с пикселя площадью 25 м^2) на водосборе Егорова оврага (границы водосбора показаны пунктиром)

Fig. 9. Distribution of the calculated average erosion rates E for the period of snowmelt (in kg from pixel with the area 25 м^2) in the catchment area of the Egorov gully (the boundaries shown by dotted line)

эродируемости грунтов k_E без точной калибровки модели. Управляющим параметром будет размывающая скорость потока, значение которой достаточно определенно назначается на основе известных формул (Шамов, 1959; Мирцхулава, 1970). Причиной такого свойства модели является структура формул (7) – (9). Так как коэффициент доставки есть отношение скоростей транспорта и эрозии, их абсолютные значения существенной роли не играют. Это обстоятельство делает предлагаемую модель удобной для практического применения, а также для исследования зависимостей коэффициента доставки от характеристик стока воды и рельефа водосбора, в том числе для

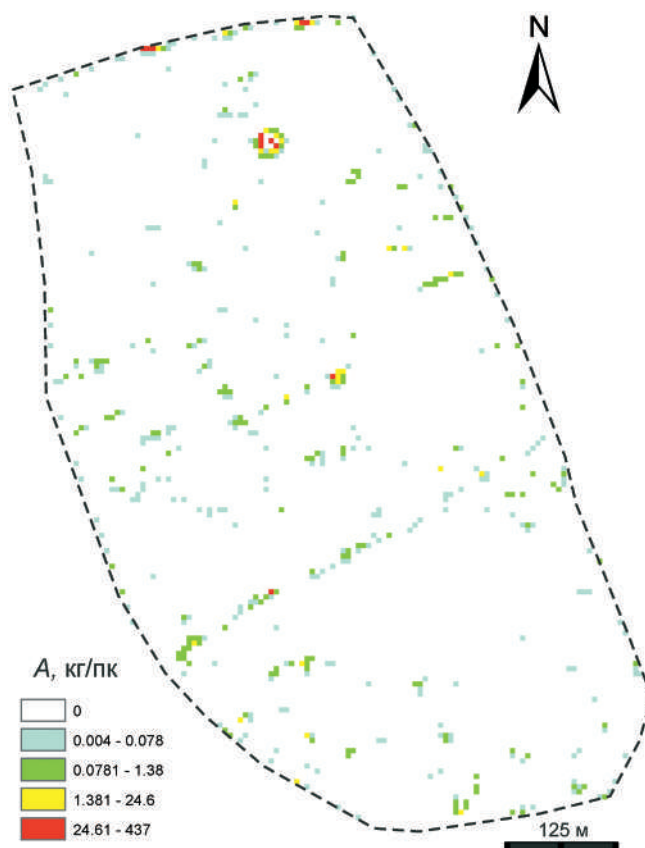


Рис. 10. Распределение рассчитанных средних величин аккумуляции наносов A для периода снеготаяния (в кг с пикселя площадью 25 м^2) на водосборе Егорова оврага (границы водосбора показаны пунктиром)

Fig. 10. Distribution of the calculated average sediment accumulation rates A for the period of snowmelt (in kg from pixel with the area 25 м^2) in the catchment area of the Egorov gully (the boundaries shown by dotted line)

установления физических основ эмпирических формул типа формулы (2).

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051200166-4). Автор глубоко признателен Л.Ф. Литвину и В.Н. Голосову за предоставленные материалы измерений на Сатинском полигоне, а также двум рецензентам, замечания которых позволили улучшить текст статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Ажигиров А.А., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Белоцерковский М.Ю., Жаркова Ю.Г., Калинина В.Р., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф., Петров В.Н., Самодурова Л.С., Веретенникова М.В., Зорина Е.Ф., Любимов Б.П., Никольская И.И. Исследование стока воды и наносов на склоновых водосборах в бассейне р. Протвы. М.: ВНИТИ. 6389-В87. 1987. 175 с.
- Безухов Д.А., Голосов В.Н., Панин А.В. Оценка коэффициента доставки наносов малых водосборов в лесостепных и степных районах Восточно-Европейской равнины // Известия РАН. Серия географическая, 2019, № 4, с. 73–84.
- Бутаков Г.П., Ермолаев О.П., Мозжерин В.И., Ковальчук И.П., Литвин Л.Ф., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. Формы проявления эрозионно-аккумулятивных процессов на малых речных водосборах // Эрозионные и русловые процессы. Луцк: 1991. С. 19–42.
- Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Физматиздат. 1958. 395 с.
- Дементьев М.А. Транспорт одиночного твердого тела неоднородным потоком жидкости. Изв. ВНИИГ, 1955, № 54, с. 3–26.
- Иванов М.М. Эрозионно-аккумулятивные процессы как фактор трансформации поля радиоактивного загрязнения бассейна р. Плавы. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2017. 24 с.
- Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Гидрофизическая модель эрозии и возможности ее реализации // Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов. М.: Изд-во МГУ. 1992. С. 5–15.
- Мирицхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноз водной эрозии. М.: Колос. 1970. 239 с.
- Сидорчук А.Ю. Эрозионно-аккумулятивные процессы на Русской равнине и проблемы заиления малых рек // Тр. Академии водохозяйственных наук. Водохозяйственные проблемы русловедения. 1995. Вып. 1. С. 74–83.
- Сидорчук А.Ю. Динамическая модель овражной эрозии // Геоморфология. 1998. № 4. С. 28–38.
- Сухановский Ю.П., Пискунов А.Н. Модель с программным обеспечением для прогнозирования дождевой эрозии почв для пахотных земель. Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2007. 20 с.
- Шамов Г.И. Речные наносы. Л.: Гидрометеиздат. 1959. 389 с.
- Borselli, L., Cassi, P., Torri, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena* 75, 2008, 268–277.
- De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritserma C.J. LISEM: A single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output // *Hydrological Processes*. 1996. Vol. 10 (8). P. 1107–1117.
- Hairsine P.B., Rose C.W. Modelling water erosion due to overland flow using physical principles 1. Sheet flow // *Water resources research*. 1992. Vol. 28 (1). P. 237–244.
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Sidorchuk, A., Torri, D. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels. *Hydrological Processes*. 2002, 16, 1935–1953.
- Nearing M.A., Foster G.R., Lane L.J., Finkner S.C. A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. Vol. 32. No. 5. pp. 1587–1593. 1989.
- USDA, 1972. Sediment sources, yields, and delivery ratios. *National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation*. 14 p.
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., Roberts, A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*. 2012. 138, 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>

ОБ АВТОРЕ

Сидорчук Алексей Юрьевич, д.г.н., в.н.с., географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, fluvial05@gmail.com

ON THE CALCULATION OF THE SEDIMENT DELIVERY RATIO

A.Yu. Sidorchuk

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
fluvial05@gmail.com*

Abstract. A method for calculating the sediment delivery ratio during erosion in a small catchment area is proposed. A physically based model of soil erosion, transport and accumulation of sediments is used. The dependence of the erosion intensity on the amount of sediment particles transported in a given place is taken into account. If it is necessary to calculate the absolute values of erosion and accumulation, then the proposed model is well calibrated using measurement data, which allows it to be used for catchments for which there are measurement data for at least one runoff episode. If it is sufficient to know only the sediment delivery ratio, then this value is calculated by the relative values of erosion and accumulation and is practically independent of the absolute erosion rate. The main factor is the non-eroding flow velocity, the value of which is quite definitely assigned by formulas and does not require calibration. This allows calculating the sediment delivery coefficient based on a relatively small number of input characteristics of the relief, water runoff and soil and vegetation cover. The absence of the need for precise calibration makes the proposed model convenient for practical application, as well as for studying the dependencies of the sediment delivery ratio on the factors influencing it.

Keywords: soil erosion; sediment accumulation; sediment transport; physically based model

ACKNOWLEDGMENTS

The study was conducted under the state assignment of the Research laboratory of soil erosion and fluvial processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (project no. 121051200166-4)

The author is deeply grateful to L.F. Litvin and V.N. Golosov for providing the measurement data at the Satinsky test site and also to two reviewers whose comments helped improve the text of the article.

REFERENCES

- Azhigirov A.A., Golosov V.N., Dobrovolskaya N.G., Belotserkovsky M.Yu., Zharkova Yu.G., Kalinina V.R., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Larionov G.A., Litvin L.F., Petrov V.N., Samodurova L.S., Veretennikova M.V., Zorina E.F., Lyubimov B.P., Nikolskaya I.I. Study of water and sediment runoff on the slopes of the catchments in the Protva River basin. Moscow: VINITI. 6389-B87. 1987. 175 p. (In Russ.)
- Bezukhov D.A., Golosov V.N., Panin A.V. Assessment of the sediment delivery ratio of small catchments in forest-steppe and steppe regions of the East European Plain. IZVESTIYA RAS. GEOGRAPHICAL SERIES, 2019, No. 4, pp. 73–84. (In Russ.)
- Borselli, L., Cassi, P., Torri, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena* 75, 2008. 268–277.
- Butakov G.P., Ermolaev O.P., Mozzherin V.I., Kovalchuk I.P., Litvin L.F., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. Forms of manifestation of erosion-accumulative processes in small river catchments // *E'rozionny'e i ruslovyye processy*. Lutsk: 1991. P. 19–42. (In Russ.)
- De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritserma C.J. LISEM: A single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output // *Hydrological Processes*. 1996. No. 10. P. 1107–1117.
- Dementyev M.A. Transport of a single solid body by a non-uniform fluid flow. *Izvestiya VNIIG*, 1955, No. 54, p. 3–26. (In Russ.)
- Hairsine P.B., Rose C.W. Modelling water erosion due to overland flow using physical principles 1. Sheet flow // *Water resources research*. 1992. Vol. 28 (1). P. 237–244.
- Ivanov M.M. Erosion-accumulative processes as a factor in the transformation of the radioactive contamination field of the Plava River basin. Abstract of Cand. Geogr. Sci. (Moscow State University, 2017). 24 p. (In Russ.)
- Larionov G.A., Krasnov S.F. Hydrophysical model of erosion and the possibilities of its implementation // *E'kologicheskie problemy erozii pochv i ruslovyykh processov*. Moscow: Moscow State University Publishing House. 1992. P. 5–15. (In Russ.)
- Mirtskhulava Ts.E. Engineering methods for calculating and forecasting water erosion. Moscow: Kolos. 1970. 239 p. (In Russ.)
- Nachtergaele, J.; Poesen, J.; Sidorchuk, A.; Torri, D. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels. *Hydrological Processes*. 2002, 16, 1935–1953.

- Nearing M.A., Foster G.R., Lane L.J., Finkner S.C. A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. Vol. 32. No. 5. P. 1587–1593. 1989.
- Shamov G.I. River sediments. L.: Gidrometeoizdat. 1959. 389 p. (In Russ.)
- Sidorchuk A.Yu. Dynamic model of gully erosion // Geomorfologiya. 1998. No. 4. P. 28–38. (In Russ.)
- Sidorchuk A.Yu. Erosion-accumulative processes on the Russian Plain and problems of siltation of small rivers // Trudy Akademii vodoxyajstvennyx nauk. Vodoxyajstvenny'e problemy ruslovedeniya. 1995. Issue 1. P. 74–83. (In Russ.)
- USDA, 1972. Sediment sources, yields, and delivery ratios. National Engineering Handbook, Section 3. Sedimentation. 14 p.
- Velikanov M.A. Channel process. Moscow: Fizmatizdat. 1958. 395 p. (In Russ.)
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., Roberts, A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. Geomorphology. 2012. 138, 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
- Sukhanovsky Yu.P., Piskunov A.N. Model with software for forecasting rain erosion of soils for arable lands. Kursk: VNIIZiZPE RAAS, 2007. 20 p. (In Russ.)

ABOUT THE AUTHOR

Sidorchuk Alexey Yuryevich, Doctor of Sciences, PhD, Principal Scientist, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, fluvial05@gmail.com