

Гидрология
Шмакова М.В.

Научная статья

УДК 551.3.053

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-108-115

МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЛОВОГО И БАСЕЙНОВОГО КОМПОНЕНТОВ ТВЁРДОГО СТОКА РЕК (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ НАРВЫ)

Марина Валентиновна Шмакова

Институт озераведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Россия

m-shmakova@yandex.ru Scopus Author ID: 15064845100, ResearcherID: J-9490-2018, РИНЦ Author ID: 66373

Аннотация. Процессы двухфазного массопереноса и переноса растворенных веществ в системе «водосбор – водный объект» определяют пространственно-временное перераспределение этих геохимических компонент на протяжении всей гидрографической сети. При этом продукты почвенной эрозии могут создавать не только угрозу заиления водного объекта, но также являются источниками загрязняющих веществ, адсорбированных на поверхности частиц почво-грунтов. В основе разработанной модели руслового и бассейнового компонентов твердого стока лежит оценка транспортирующего потенциала водотока и динамика кривых гранулометрического состава донных отложений, продуктов почвенной и русловой эрозии. Модель позволяет оценить интенсивность перераспределения речных наносов и донных отложений в речном русле. В модели рассчитываются профиль изменения отметок дна между двумя расчетными створами, распределение крупности осажденных или прошедших в движение частиц, масса частиц русловой и бассейновой составляющей стока наносов и доля вклада бассейновой компоненты. Расчеты для р. Нарвы показали, что вклад бассейновой компоненты в твердый сток этого водотока составляет около 98 %. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования почвенной эрозии на водосборе р. Нарвы и подтверждаются невыраженной динамикой русловых деформаций исследуемого участка водотока.

Ключевые слова: почвенная эрозия, математическая модель, расход наносов, водосбор, река, русло, гранулометрия

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института озераведения Российской академии наук – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» по теме FFZF-2024-0002 «Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования».

Для цитирования: Шмакова М.В. Моделирование руслового и бассейнового компонентов твёрдого стока рек (на примере реки Нарвы) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 1 (72). С. 109–115. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-108-115

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-108-115

MODELING OF THE CHANNEL AND BASIN COMPONENTS OF RIVER SOLID RUNOFF (USING THE EXAMPLE OF THE NARVA RIVER)

Marina V. Shmakova

Institute of Limnology, RAS, St. Petersburg, Russia

m-shmakova@yandex.ru Scopus Author ID: 15064845100, ResearcherID: J-9490-2018, RSCI Author ID: 66373

Abstract. The processes of two-phase mass transfer and transport of dissolved substances in the ‘catchment – water body’ system determine the spatiotemporal redistribution of these geochemical components throughout the hydrographic network. At the same time, the products of soil erosion not only can pose a threat of siltation but also are sources of pollutants adsorbed on the surface of soil-ground particles. The developed model of the channel and basin components of solid runoff is based on the assessment of the transporting potential of the watercourse and the dynamics of the curves showing the granulometric composition of bottom sediments, products of soil and channel erosion. The model makes it possible to estimate the intensity of redistribution of river and bottom sediments in the riverbed. At the same time, the



© 2025 Эта работа Шмаковой М.В. лицензирована по CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Гидрология
Шмакова М.В.

model calculates the profile of changes in the bottom marks between the two calculated channels, the size distribution of the particles deposited or set in motion, the particle mass of the channel and basin components of sediment runoff, and the contribution of the basin component. Calculations for the Narva River have shown that the contribution of the basin component to the solid flow of this watercourse is about 98 %. The results obtained are in good agreement with the results of modeling soil erosion in the Narva River catchment and are confirmed by the unexpressed dynamics of channel deformations of the studied section of the watercourse.

Keywords: soil erosion, mathematical model, sediment discharge, catchment, river, channel, granulometry

Funding. The work was carried out as part of the state assignment undertaken by the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences under topic FFZF-2024-0002 'Modern threats to water bodies and innovative methods of their conservation, restoration, and rational use'.

For citation: Shmakova, M.V. (2025). Modeling of the channel and basin components of river solid runoff (using the example of the Narva River). *Geographical Bulletin*. No. 1(72). Pp. 109–115. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-108-115

Введение

Одним из показателей интенсивности денудации водосборов, в том числе количественной оценки почвенной эрозии, является вклад бассейновой составляющей в твердый сток рек. Известно, что в водоток попадает лишь около 15 % продуктов почвенной эрозии водосборов [11], а наибольший вклад смытых почво-грунтов в сток наносов осуществляется в период активного снеготаяния и интенсивных дождей. Помимо того, что процессы почвенной эрозии негативно сказываются на плодородии земель, продукты водной эрозии почвенного покрова являются также одним из источников загрязнения водных объектов [8]. При этом, в отличие от сточных вод, технологии очистки поступающих продуктов смыва в гидрографическую сеть не существует. Все это определяет актуальность оценки двухфазного массопереноса в системе «водосбор – водный объект», которая предполагает не только анализ эрозионно-аккумулятивных процессов, но и выделение в донных отложениях и транспорте речных наносов продуктов почвенной эрозии.

Основными факторами, определяющими поступление продуктов почвенной эрозии в речную сеть, являются физико-географическая расположенность речного бассейна, типы его подстилающей поверхности, антропогенная нагрузка и пространственное расположение наиболее эрозионно активных частей водосбора, на которых формируется основная масса наносов, поступающих в русло водотока [12]. Вклад русловой и бассейновой составляющей в твердом стоке рек обусловлен прежде всего гранулометрическим составом почво-грунтов, донных отложений и транспортируемых из верхнего створа наносов. При этом в естественных условиях, как правило, вклад русловой составляющей увеличивается по длине реки [12]. Морфометрические и гидравлические характеристики водотока определяют распределение твердого вещества, находящегося в теле речного потока, в соответствии с его транспортирующим потенциалом.

Целью данной работы является создание модели руслового и бассейнового компонентов твердого стока рек, основанной на разработанных прежде алгоритмах двухфазного массопереноса.

Обзор существующих методов и моделей

Вполне очевидно, что вклад бассейновой и русловой составляющих в общий сток наносов весьма изменчив в своем внутригодовом распределении, зависит от водности года и от интенсивности, а также характера антропогенной нагрузки на водосборе и в русле реки. В зависимости от фазы водности (летняя и зимняя межень, половодье и паводки) меняется и транспортирующий потенциал речного потока, его способность переносить твердое вещество. При этом с увеличением водности в период, например, паводка возрастание транспортирующего потенциала потока сопровождается интенсивным поступлением продуктов почвенной эрозии с поверхности водосбора. Все это определяет процессы аккумулятивно-эрозионной деятельности речного потока по отношению к руслу как крайне неоднозначную.

Разделение твердого стока на русловую и бассейновую составляющую возможно сопоставлением минералогического, гранулометрического, геохимического состава почвообразующих грунтов речного бассейна и руслообразующих грунтов, а также радиоизотопным методом [2, 16], оценкой магнитных свойств минералов [13, 15, 20, 21], методами математического моделирования процессов почвенной эрозии и двухфазного массопереноса в русле. Также для решения этой задачи может быть использован гидрологический подход [1, 5–7, 9].

Выделение бассейновой доли в общем составе наносов по минералогическому и гранулометрическому составу возможно лишь при условии того, что русловые наносы по этим характеристикам принципиально отличаются от почвообразующих грунтов на водосборе. В случае относительно однородного состава руслового и бассейнового грунта для антропогенно освоенных водосборов хороший результат в оценке вклада исследуемых компонентов даст сопоставление химического состава грунта. В результате определения концентраций, адсорбированных на поверхности грунта загрязняющих веществ, можно проследить распространение транспортируемого эрозионного материала в гидрографической сети [14, 19]. Радиоизотопный метод основан на аналогичном принципе выделения бассейнового компонента по содержанию в нем радионуклидов [2, 17, 22]. Гидрологический подход выделения бассейновой составляющей в общем стоке наносов заключается в том, что меженный расход наносов, полагаясь русловой частью, отнимается от всего твердого стока [5]. Полученная разность относится к продуктам почвенной эрозии.

Гидрология
Шмакова М.В.

Модель компонентов твердого стока

В основе оценки вклада русловой и бассейновой составляющих в твердом стоке реки лежат гранулометрические кривые водосборных почво-грунтов, донных отложений и наносов, транспортируемых из верхнего створа.

Если транспортирующий потенциал речного потока, то есть масса твердого вещества, которая может быть перенесена этим потоком с заданными гидравлическими переменными состояниями потока, больше поступившей в данный расчетный створ массы твердого вещества, то имеет место размыв дна. Иначе – намыв, или отложение наносов. Изменение отметок дна происходит на площади русла реки, которой соответствует скорость осаждения транспортируемых частиц в соответствии с их крупностью.

При этом формируется продольный профиль изменения отметок дна расчетного участка русла для заданного временного масштаба, а также меняется кривая гранулометрического состава наносов и донных отложений. Для непрерывной оценки этих показателей каждый расчетный участок реки должен быть обеспечен данными о поступлении продуктов почвенной эрозии с территории его частного водосбора.

Рассмотрим изменение транспортирующего потенциала водотока между двумя расчетными створами на основе аналитической формулы общего расхода наносов [19]

$$G = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} Q \left[\frac{c}{hg} - (1-f)I\rho_w \right], \quad (1)$$

где ρ_s и ρ_w – плотности грунта и воды соответственно, кг/м³; Q – расход воды, м³/с; f – коэффициент внутреннего трения, б/р; c – параметр сцепления частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); g – ускорение свободного падения, м/с²; I – уклон дна, б/р; h – средняя глубина потока, м.

Тогда изменение транспортирующего потенциала потока, вызванное изменением морфометрических характеристик русла (глубины и уклона), рассчитывается как разность расходов наносов для двух створов

$$\Delta G = G_1 - G_2 = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} Q \left[c \frac{h_1 - h_2}{gh_1 h_2} - \rho_w (1-f)(I_1 - I_2) \right]. \quad (2)$$

Скорость осаждения движущейся частицы v_s рассчитывается как результирующая скорость

$$v_s = \sqrt{\omega^2 + v^2 + 2\omega v \sin(\alpha)}, \quad (3)$$

или для равнинных русел с малыми уклонами

$$v_s = \sqrt{\omega^2 + v^2}, \quad (4)$$

где ω – гидравлическая крупность частицы, м/с; α – угол уклона русла, град.

Нижние по течению границы зон осаждения (расчётные зоны) определяются по формуле

$$L = \frac{hv}{\omega}, \quad (5)$$

где L – расстояние от створа работ, м; h – глубина, м; v – скорость, м/с; ω – гидравлическая крупность для нижней границы фракции грунта в расчётных условиях, м/с.

Продолжительность удержания повышенных концентраций взвешенных веществ i -ой фракции потоком T_i , с рассчитывается как функция гидравлической крупности i -ой фракции ω_i , м/с, скорости течения v , м/с и средней глубины взвешивания i -ой фракции h'_i , м

$$T_i = \frac{l_i}{v_s} = \frac{l_i}{\sqrt{\omega_i^2 + v^2}}, \quad (6)$$

где l_i – путь, который проходит частица i -ой крупности, м

$$l_i = \sqrt{h_i'^2 + L^2} = \sqrt{h_i'^2 + \frac{h_i'^2 v^2}{\omega_i^2}} = h_i' \sqrt{1 + \frac{v^2}{\omega_i^2}}. \quad (7)$$

Тогда

$$T_i = \frac{h_i'}{v_s} \sqrt{1 + \frac{v^2}{\omega_i^2}}, \quad (8)$$

где h' – потолок взвешивания частицы, м.

Обозначим M общую массу осажженного или взмученного вещества за период времени T . Различие между расчетами для осаждения и взмучивания будут состоять в том, что для размыва будут использоваться кривые распределения гранулометрического состава донных отложений, а для осаждения – кривые распределения гранулометрического состава транспортируемых наносов. И ряд будет записан для процесса осаждения от крупных

Гидрология
Шмакова М.В.

к мелким фракциям, а для процессов взмучивания, наоборот, от мелких к крупным. Распишем алгоритмы оценки основных переменных состояния процессов переформирования дна для осаждающихся частиц.

Крупность наносов d , м и их масса m , кг может быть представлена соотношением

$$m = \rho_s \frac{\pi d^3}{6}. \quad (9)$$

Распишем в выражении (7) гидравлическую крупность ω , м/с и потолок взвешивания h' , м через массу. Для этого будем использовать формулы Гончарова [4] для ω и формулу ... для h' [3]

$$\omega(d) = \sqrt{2g \frac{\rho_s - \rho_w}{1.75\rho_w} d}, \quad (10)$$

$$h' = 0.25C \frac{v - v_n}{h^{0.2} \omega}, \quad (11)$$

где v_n – несдвигающая скорость потока, м/с; C – параметр, зависящий от размеров придонных вихрей, высоты выступов шероховатости и глубины потока.

Тогда масса отдельной частицы m_p , кг крупностью d_p , м с обеспеченностью p в обратной зависимости будет равна

$$d_p = \omega_p^2 \frac{1.75\rho_w}{2g(\rho_s - \rho_w)}, \quad (12)$$

$$m_p = 0.22\rho_s \rho_w^3 \frac{\pi}{g^3} \frac{\omega_p^6}{(\rho_s - \rho_w)^3}. \quad (13)$$

В соответствии с формулами (7), (10)–(13) получим выражение для оценки массы осажденной частицы $m_{p,\%}$ в расчетном створе, расположенном от исходного на расстоянии l , м

$$m_{p,\%} = 0.22\rho_s \rho_w^3 \frac{\pi}{g^3} v^6 (\rho_s - \rho_w)^{-3} \left(\frac{l^2}{h'(m_{p,\%})^2} - 1 \right)^{-3}. \quad (14)$$

Ввиду громоздкости выражения (14) для дальнейших выводов запишем его в общем виде

$$m_{p,\%} = f(l, h', p). \quad (15)$$

Масса наносов для фракций заданной крупности $m_{p,\%}$, осажденных на протяжении всего расстояния L с учетом выражений (7) и (10)–(12), будет равна

$$M' = \int_0^L \int_0^1 f(l, h', p) dp dl, \quad (16)$$

где M' – масса всех частиц, которые в соответствии со своей крупностью $m_{p,\% \min}$ могут быть осажжены в точке, расположенной на расстоянии L от верхнего створа, кг/с; L – расстояние между расчетными створами, м; p – обеспеченность крупности наносов, б/р.

Величина M' охватывает весь диапазон крупности, который задействован в процессе осаждения на протяжении всего пути следования частиц между двумя расчетными створами. Исходя из гипотезы последовательного осаждения частиц в соответствии с их крупностью, частицы с наименьшей массой, осажженные в пределах двух расчетных створов, будут лимитированы в своем количестве обеспеченностью согласно кривой распределения гранулометрической крупности. Таким образом, величина M' может быть больше, чем разность транспортирующего потенциала ΔG , поскольку для обозначенного пути осаждения в интеграле (14) используется вся масса фракций наименьшей крупности $m_{p,\% \min}$. Однако с учетом допущения о последовательном осаждении частиц по убыванию их крупности, частицы грунта с наименьшей крупностью осаждаются не в полном объеме и их часть продолжает транспортироваться потоком далее. Эта часть представляет собой разность

$$\Delta M' = M' - \Delta G. \quad (17)$$

Профиль изменения отметок дна между двумя расчетными створами формируется за счет последовательного осаждения или взмыва частиц грунта в соответствии с распределением их крупности. Принимая во внимание выражения (14), зависимость изменения отметок дна ΔH , м от расстояния от верхнего створа l , м будет иметь вид

$$\begin{cases} \Delta H(l_{p,\%}) \Big|_{l_{p,\%} < L} = \frac{\Phi}{F \rho_s} \Delta G \cdot p(m_{p,\%}), \\ \Delta H(L) = \frac{\Phi}{F \rho_s} [\Delta G \cdot p_1(m_{p,\% \min}) - \Delta M'], \end{cases} \quad (18)$$

Гидрология
Шмакова М.В.

где ρ – плотность залегания грунта на момент осаднения, не уплотненное залегание (для песка принимается равным 1,67), б/р; F – площадь осаднения, м², которая рассчитывается как произведение ширины русла B , м и расстояния, которое пройдет частица со скоростью v_s за время Δt

$$F = v_s B \Delta t. \quad (19)$$

Изменение кривой распределения крупности частиц $p_3(m)$ в очередном расчетном створе рассчитывается как средневзвешенная по массе разность или сумма кривых распределения крупности частиц верхнего створа $p_1(m)$ и распределения крупности осевших или пришедших в движение частиц $p_2(m)$ соответственно

$$p_3(m) = \frac{G_1 p_1(m) \pm \Delta G p_2(m)}{G_1 \pm \Delta G}. \quad (20)$$

При этом распределение крупности осажденных или пришедших в движение частиц определяется согласно интегралу (13)

$$\begin{cases} p_2(m) \Big|_{m_{p\%} < m_{p\% \min}} = 0, \\ p_2(m) \Big|_{m_{p\%} = m_{p\% \min}} = p_1(m_{p\% \min}) \frac{G_1}{\Delta G} \left(1 - \frac{\Delta M}{p_1(m_{p\% \min}) G_1} \right), \\ p_2(m) \Big|_{m_{p\%} > m_{p\% \min}} = p_1(m) \frac{G_1}{\Delta G}. \end{cases} \quad (21)$$

Учет доли в составе наносов частиц того или иного размера позволяет получить кривую распределения гранулометрического состава наносов, поступивших в следующий расчетный створ, и дать оценку вклада частиц конкретной крупности в формирование русла, что определяет возможность выделения вклада русловой и бассейновой составляющей в твердом стоке.

Вполне понятно, что оценить долю бассейновой составляющей в общем стоке наносов возможно лишь при принципиальном различии в гранулометрическом составе руслоформирующих и почвообразующих грунтов. При допущении о том, что почвообразующие грунты имеют меньшую крупность, обозначим максимальную массу отдельной частицы в их составе как $m_{s \max}$ и распишем кривую распределения гранулометрического состава наносов в первом расчетном створе в виде двух частей

$$p_1(m) = p_1(m) \Big|_{m \leq m_{s \max}} + p_1(m) \Big|_{m > m_{s \max}}. \quad (22)$$

Тогда массы частиц русловой M_{riv} , кг/с и бассейновой M_{bas} , кг/с частей будут равны

$$\begin{aligned} M_{riv} &= \int_{p < p_1(m_{s \min})}^1 f(l, h', p) dp, \\ M_{bas} &= \int_0^{p_1(m_{s \min})} f(l, h', p) dp, \end{aligned} \quad (23)$$

$$G_1 = M_{riv} + M_{bas}.$$

Доля вклада бассейновой компоненты $D_{M_{bas}}$, б/р рассчитывается как отношение

$$D_{M_{bas}} = \frac{\int_0^{p_1(m_{s \min})} f(l, h', p) dp}{G_1}. \quad (24)$$

Аналогичным образом строятся алгоритмы и для всех последующих створов с учетом изменившейся кривой распределения гранулометрического состава наносов.

Кривые гранулометрической крупности донных отложений и наносов могут быть с достаточной точностью аппроксимированы степенными, логарифмическими функциями и функциями другого вида.

Гидрология
Шмакова М.В.

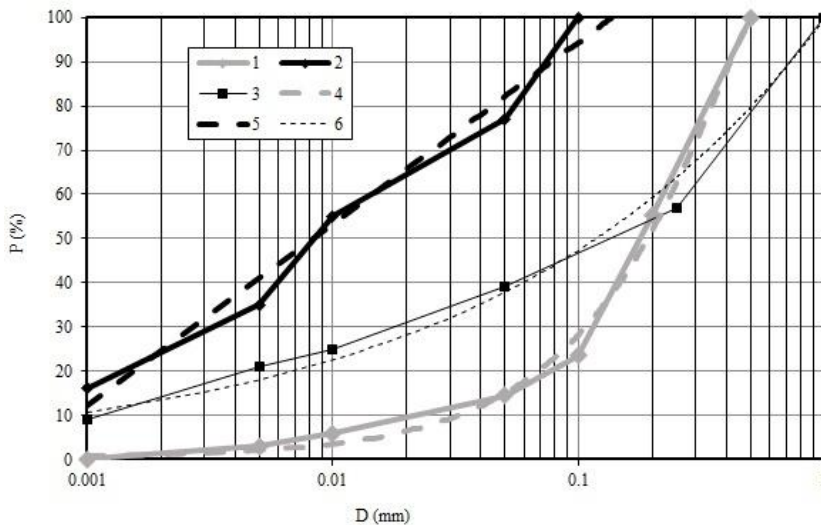


Рис. 1. Кривые гранулометрического состава донных отложений, взвешенных наносов и почвообразующих грунтов на р. Нарвы и ее водосборе (1, 2, 3 соответственно) и аппроксимирующие их полиномиальная, логарифмическая и степенная функции (4, 5 и 6 соответственно)

Fig. 1. The curves of the granulometric composition of bottom sediments, suspended sediments, and soil-forming grounds on the Narva River and its catchment (1, 2, 3 respectively) and their approximating polynomial, logarithmic, and power functions (4, 5, 6 respectively)

В таблице приведены функции, аппроксимирующие кривые гранулометрического состава и точность этой аппроксимации.

Таблица

Функции, аппроксимирующие кривые гранулометрического состава
Functions approximating the curves of granulometric composition

Кривые гранулометрического состава	Уравнение	Точность аппроксимации
донные отложения	$P = -194,67d^2 + 296,42d + 0,5663$	$R^2 = 0,995$
взвешенные наносы	$P = 17,861\ln(d) + 135,57$	$R^2 = 0,975$
почвообразующие грунты	$P = 99,679d^{0,3227}$	$R^2 = 0,978$

В соответствии с приведенными выше кривыми гранулометрического состава можно сделать вывод, что частицы взвешенных наносов крупностью до 0,01 мм поступили преимущественно с территории водосбора. Незначительный вклад частиц донных отложений менее 0,01 мм составляет около 5 % и близок к погрешности определения гранулометрического состава (3 %).

Исходя из расхода наносов ($G=4,3$ кг/с) на дату отбора пробы взвешенных наносов и вида аппроксимирующей функции для взвешенных наносов, вычислим массу $M_{part\ 1\ bas}$, кг наносов размером до 0,01 мм включительно (выражения (9) и (23)). Эта масса составляет 0,17 кг. Примем допущение, что распределение гранулометрического состава частиц, поступивших с территории водосбора в диапазоне крупности 0–0,1 мм, соответствует распределению крупности почвенных частиц. Тогда оставшая масса твердого вещества, поступившего с территории водосбора, может быть вычислена для диапазона частиц от 0,01 до 0,1 мм, используя полученную массу $M_{part\ 1\ bas}$ и кривую гранулометрического состава почвообразующих грунтов (выражения (9) и (23)). Этот расчет предполагает, что в результате дождя с водосбора в русло реки поступили частицы размером до 0,1 мм включительно. В результате масса наносов, поступивших с территории водосбора в пробе взвешенных наносов, составляет $M_{bas}=4,23$ кг.

Таким образом, вклад бассейновой компоненты $D_{M_{bas}}$ в общий расход наносов G равен отношению M_{bas} и G и составляет 98 %. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования, приведенными выше (93 %).

Выводы

В основе модели компонентов твердого стока водотоков лежат оценка транспортирующего потенциала водотока и динамика кривых гранулометрического состава донных отложений, продуктов почвенной и русловой эрозии. В зависимости от гидравлических условий на всем протяжении водотока меняется и его транспортирующий потенциал. Последнее приводит к инициации эрозионно-аккумулятивных процессов, или, другими словами, перераспределению твердого вещества в речном русле. Поступающие на всем протяжении русла продукты почвенного смыва с водосборной территории оказывают непосредственное влияние на динамику перераспределения твердого стока и донных отложений. Модель позволяет оценить:

Гидрология
Шмакова М.В.

- профиль изменения отметок дна между двумя расчетными створами (формируется за счет последовательного осаждения или взмыва частиц грунта в соответствии с распределением их крупности);
- распределение крупности осажденных или пришедших в движение частиц;
- массу частиц русловой и бассейновой составляющей стока наносов;
- долю вклада бассейновой компоненты.

При этом расчет динамики кривых распределения гранулометрического состава строится на принципиальном различии в гранулометрическом составе руслоформирующих и почвообразующих грунтов. При схожей крупности последних возможна лишь оценка профиля изменения отметок дна и изменения состава общей гранулометрической кривой транспортируемых речных наносов. Также следует отметить, что в представленном методе не учитываются горизонтальные деформации русла, при которых происходит боковая эрозия пойм и речных террас. Также в методе не учитывается твердый сток, поступающий с боковыми притоками водотока.

Важно заметить, что модель русловой и бассейновой компонентов твердого стока рек построена на общих алгоритмах двухфазного массопереноса в речном русле. Это позволяет полагать модель универсальной и использовать для водотоков, расположенных в разных почвенно-климатических и геолого-геоморфологических условиях.

Заключение

Речные водосборы совместно с гидрографической сетью на них представляют собой единую ландшафтно-геохимическую систему, определяющую двухфазный массоперенос и перенос растворенных веществ. При этом нижние звенья речной сети и водоемы-приемники как конечный элемент этой системы являются результирующей аккумуляционной емкостью продуктов бассейновой и русловой эрозии совместно с адсорбируемыми ими загрязняющими веществами. Однако на протяжении всей гидрографической сети происходящие в ней эрозионно-аккумулятивные процессы также предполагают перераспределение транспортируемого твердого стока в соответствии с транспортирующим потенциалом водотока. Накопленные в водных объектах адсорбированные на частицах почво-грунтов загрязняющие вещества значительно ухудшают их санитарно-эпидемиологическое состояние. Разделение твердого стока в водотоке на бассейновую и русловую компоненты дает возможность оценить интенсивность почвенной эрозии на водосборе, а также сопутствующие этому поступление и последующее перераспределение в речной сети загрязняющих веществ, адсорбированных на твердых продуктах смыва. Все это предоставляет определенные ориентиры в текущей и прогнозной оценке экологического состояния водных объекта в части процессов их заиления и загрязнения.

Библиографический список

1. Бобровицкая Н.Н. Зависимость среднего многолетнего стока взвешенных наносов рек ЕТС от физико-географических факторов // Тр. ГГИ. Вып. 191. 1974. С. 68–84.
2. Голосов В.Н. Использование радиоизотопов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // Геоморфология. 2000. № 2. С. 26–33.
3. Гончаров В.Н. Движение наносов в равномерном потоке. М.-Л.: НКТП СССР ОНТИ, 1938. 312 с.
4. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеониздат, 1962. 374 с.
5. Гусаров А.В. Оценка русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах // Геоморфология. 2013. № 2. С. 23–38.
6. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Общая оценка интенсивности эрозии по стоку взвешенных наносов // Климатическая геоморфология денудационных равнин. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1977. 224 с.
7. Лопатин Г.В. Наносы рек СССР. М.: Географгиз, 1952. 166 с.
8. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна. М.: Наука, 2006. 224 с.
9. Поляков В.Б. Гидрологический анализ и расчеты. Л.: Гидрометеониздат, 1946. 480 с.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Прибалтийский район. Эстония. Л.: Гидрометеониздат. 1972. Т. 4, Вып. 1. 554 с.
11. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
12. Эрозионно-русловые системы: монография / под науч. ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М.: ИНФРА-М, 2017. 697 с.
13. Foster I.D.L., Grew R., Dearing J.A. Magnitude and frequency of sediment transport in agricultural catchments: a paired lake-catchment study in Midland England // Soil Erosion on Agricultural Lands. Chichester: Wiley, 1990. P. 153–171.
14. Juracek K.E. and Ziegler A.C. Estimation of sediment sources using selected chemical tracers in the Perry Lake basin, Kansas, USA // International Journal of Sediment Research. 2009. Vol. 24, Iss. 1. P. 108–125.
15. Oldfield F., Rummery T.A., Thompson R., Walling D.E. Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: some preliminary results // Water resources research. 1979. No. 15. P. 211–218.
16. Peart M.R. Using sediment properties as natural tracers for sediment source: two case studies from Hong Kong // Tracers in Hydrology / Proc. of the Yokohama Int. Symp. (July, 1993). Wallingford (UK): IAHS Press. IAHS Publ. 215, 1993. P. 313–318.
17. Ritchie J.C., Nearing M.A., and Rhoton F.E. Sediment budget and sources determinations using fallout Cesium-137 in a semiarid rangeland watershed, Arizona, USA // Journal of Environmental Radioactivity. 2009. Vol. 100, Iss. 8. P. 637–643. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.05.008
18. Simon A. and Darby S.E. Disturbance, channel evolution and erosion rates: Hotophia Creek, Mississippi // Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision. The Centre for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. 1997. P. 476–481.
19. Shmakova, M. V. (2022). Sediment transport in river flows: New approaches and formulas. In: D. Pasquali (Ed.). Modeling of sediment transport. DOI: 10.5772/intechopen.103942
20. Slattery M.C., Burt T.P., Walden J. The application of mineral magnetic measurements to quantify within-storm variations in suspended sediment sources // Tracers Technologies for Hydrological Systems / Proc. of Boulder Int. Symp. (July, 1995). Wallingford (UK): IAHS Press. IAHS Publ. 229, 1995. P. 143–151.

Гидрология
Шмакова М.В.

21. Stott A.P. Sediment tracing in a reservoir catchment system using a magnetic mixing model // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1986. No. 42. P. 105–112.
22. Zhang X., Wen Z., Feng M. et al. Application of ¹³⁷Cs fingerprinting technique to interpreting sediment production records from reservoir deposits in a small catchment of Hilly Loess Plateau, China // *Science in China. Series D: Earth Sciences*. 2007. Vol. 50, No. 2. P. 254–260.

References

1. Bobrovickaya, N.N. Dependence of the average long-term runoff of suspended sediments of ETC rivers on physical and geographical factors (1974), *Tr. GGI*, 191, p. 68–84.
2. Golosov, V.N. (2000), The use of radioisotopes in the study of erosion-accumulative processes, *Geomorfologiya*, no 2, p. 26–33.
3. Goncharov, V.N. (1938), Sediment movement in a uniform flow. Moscow—Leningrad, *NKTP SSSR ONTI Publ.*, 312 p.
4. Goncharov, V.N. (1962), Dynamics of riverbed flows. L.: *Gidrometeoizdat*, 374 p.
5. Gusarov, A.V. (2013), Assessment of riverbed and basin components of erosion and suspended sediment runoff in river basins, *Geomorfologiya*, no 2, p. 23–38.
6. Dedkov, A.P., Mozzherin, V.I. (1977), General assessment of erosion intensity by suspended sediment runoff, in: *Klimaticheskaya geomorfologiya denudacionnyh ravnin*. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 224 p.
7. Lopatin, G.V. (1952), Sediment transport of the USSR rivers. M.: *Geografiz*, 166 p.
8. Modeling of erosion processes in the territory of a small catchment basin (2006). M.: *Nauka*, 224 p.
9. Polyakov, V.B. (1946), Hydrological analysis and calculations. L.: *Gidrometeoizdat*, 480 p.
10. Surface water resources of the USSR. The Baltic region. Estonia (1972), vol 4 (1). Leningrad: *Gidrometeoizdat*, 554 p.
11. Chalov, R.S. (1979), Geographical studies of riverbed processes. M.: *Izd-vo MGU*, 232 p.
12. Erosion-channel systems (2017). By edit.: R.S. Chalova, A.YU. Sidorchuka, V.N. Golosova. M.: *INFRA-M*, 697 p.
13. Foster, I.D.L., Grew, R., Dearing, J.A. Magnitude and frequency of sediment transport in agricultural catchments: a paired lake-catchment study in Midland England. *Soil Erosion on Agricultural Lands*. Chichester: Wiley, 1990. P. 153–171.
14. Juracek, K.E. and Ziegler, A.C. Estimation of sediment sources using selected chemical tracers in the Perry Lake basin, Kansas, USA. *International Journal of Sediment Research*. 2009. Vol. 24. Iss. 1. March 2009. P. 108–125.
15. Ritchie, J.C., Nearing, M.A., and Rhoton, F.E. Sediment budget and sources determinations using fallout Cesium-137 in a semiarid rangeland watershed, Arizona, USA. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. Vol. 100. Iss. 8. August 2009. P. 637–643.
16. Simon, A. and Darby, S.E. Disturbance, channel evolution and erosion rates: Hotophia Creek, Mississippi. *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*. The Centre for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. 1997. P. 476–481.
17. Oldfield, F., Rummery, T.A., Thompson R., Walling D.E. Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: some preliminary results. *Water resources research*. 1979. № 15. P. 211–218.
18. Peart, M.R. Using sediment properties as natural tracers for sediment source: two case studies from Hong Kong. *Tracers in Hydrology / Proc. of the Yokohama Int. Symp.* (July, 1993). Wallingford (UK): IAHS Press. IAHS Publ. 215, 1993. P. 313–318.
19. Shmakova, M. V. (2022). Sediment transport in river flows: New approaches and formulas. In: D. Pasquali (Ed.). *Modeling of sediment transport*. doi: 10.5772/intechopen.103942
20. Slattey, M.C., Burt, T.P., Walden, J. The application of mineral magnetic measurements to quantify within-storm variations in suspended sediment sources. *Tracers Technologies for Hydrological Systems. Proc. of Boulder Int. Symp.* (July, 1995). Wallingford (UK): IAHS Press. IAHS Publ. 229, 1995. P. 143–151.
21. Stott, A.P. Sediment tracing in a reservoir catchment system using a magnetic mixing model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1986. № 42. P. 105–112.
22. Zhang, X., Wen, Z., Feng, M. et al. Application of ¹³⁷Cs fingerprinting technique to interpreting sediment production records from reservoir deposits in a small catchment of Hilly Loess Plateau, China. *Science in China. Series D: Earth Sciences*. 2007. V. 50. № 2. P. 254–260.

Статья поступила в редакцию: 28.11.23, одобрена после рецензирования: 08.08.24, принята к опубликованию: 12.03.25.

The article was submitted: 28 November 2023; approved after review: 8 August 2024; accepted for publication: 12 March 2025.

Информация об авторе

Марина Валентиновна Шмакова

доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математических методов моделирования Институт озерадения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»; 196105, г. Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9

e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Information about the author

Marina V. Shmakova

Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Mathematical Modeling Methods, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences;

9, Sevastyanova st., St. Petersburg, 196105, Russia