УДК 504.453 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-98-112*

Оригинальная статья/Original paper

Оценка вклада различных сил в начало движения донного грунта в речном потоке

М. В. Шмакова

m-shmakova@yandex.ru

Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Критическая скорость сдвига, характеризующая начало движения отдельных частиц донного грунта, является важным показателем устойчивости речного русла. Определенное соотношение гидравлических переменных состояния потока обусловливает начало качественного перехода из однофазного потока в двухфазный. **Методы.** По данным наблюдений на тридцати створах североамериканских рек для начальных условий движения донных наносов были рассчитаны критические скорости сдвига и дана оценка вклада подъемной силы потока в общий баланс сил, приводящих частицу донного грунта в движение. **Результаты.** Анализ вклада различных сил в инициацию движения отдельных частиц донного грунта на основании данных наблюдений на исследуемых створах показал, что с увеличением крупности донных частиц увеличивается вклад подъемной силы потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидравлика, речной поток, двухфазный массоперенос, критическая скорость сдвига, донный грунт, подъемная сила, наносы, сопротивление дна, североамериканские реки

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме FFZF-2024-0002 «Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шмакова М. В. Оценка вклада различных сил в начало движения донного грунта в речном потоке // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 4. С. 98–112. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-4-98-112; EDN: UAYZRC

© Шмакова М. В., 2026

Assessment of the various forces contribution to commencing of bottom soil movement in river flow

Marina V. Shmakova

m-shmakova@yandex.ru

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The shift critical speed is a significant indicator of a riverbed, as it characterizes commencing of movement of separate bottom soils particles. Certain relation of the flow state hydraulic variables causes beginning of the qualitative transfer from a single-phase flow to a two-phase flow. **Methods.** According to results of observations at thirty ranges of North American rivers, we have calculated critical shift speeds for initial conditions for the bottom sediments movement and have assessed the flow carrying capacity contribution to the general balance of forces that initiate movement of a bottom soil particle. **Results.** Analysis of the separate forces contribution to initiation of the bottom soil separate particles movement based on observation results from the ranges under study has demonstrated that the contribution of the flow carrying capacity is growing with increasing of bottom sediments particle dimensions.

KEYWORDS: hydraulics, river flow, two-phase mass transfer, shift critical speed, bottom soil, carrying capacity, sediments, bottom resistance, North American rivers

FINANCING: The work has been done within the framework of State Assignment of Institute of Limnology RAS – SPB FRC RAS according FFZF-2024-0002 “Contemporary hazards to water objects and innovative methods of the water objects’ preservation, restoration and rational use” theme.

FOR CITATION: Shmakova M. V. Assessment of the various forces contribution to commencing of bottom soil movement in river flow. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 4. P. 98–112. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-4-98-112; EDN: UAYZRC

ВВЕДЕНИЕ

Двухфазный массоперенос в речном потоке за счет неравномерности русла и нестационарности притока характеризуется пространственно-временной динамикой гидравлических переменных состояния. При этом пограничные состояния двухфазной системы можно определить такими качественными признаками, как начало осаждения транспортируемых наносов и начало транспорта донного грунта, а также начало сдвига отдельных частиц грунта на дне. Каждое из этих пограничных состояний инициировано определенной скоростью потока, называемой критической скоростью. Критические скоро-

сти обусловливают динамику качественного перехода двухфазного потока в поток, свободный от наносов, и наоборот. Помимо этого, критические скорости косвенно характеризуют степень устойчивости русла, деформируемого в результате размыва дна или осаждения наносов. Последнее определило актуальность изучения критических скоростей потока в таких вопросах инженерного использования рек и каналов, как заиление русла и размыв дна, зарастание малых каналов оросительных систем [1] и т. д. Эти величины являются количественными ориентирами для расчетов пропускной способности канала, его морфометрических характеристик (уклона дна, формы и размера поперечного сечения), укреплений откосов канала и его дна, а также регулирования расхода воды, поступающей в русло канала.

Расчетам критических скоростей потока посвящено большое количество исследований. При этом выделяют методы расчета отдельно для связанных и несвязанных грунтов, что объясняется различным характером сцепления частиц. В середине XVIII в. Брамс предложил следующее выражение для расчета критической скорости срыва для несвязанных грунтов [2]:

$$v_{\text{shear}} = k m'^{\frac{1}{6}}_{\text{part}}, \tag{1}$$

где k – коэффициент пропорциональности;

m'_{part} – вес частицы в воде, кг.

В конце XIX в. в исследованиях Л. Дю Буа и У. Эри показано, что критическая скорость сдвига пропорциональна корню квадратному из диаметра частицы или корню шестой степени из веса частицы [3, 4]. В начале XX в. А. Шильдс [5] выразил зависимость критической скорости сдвига от соотношения безразмерного напряжения сдвига θ (также называемого параметром Шильдса) и отношением между инерционными и вязкими силами окружающей среды, действующими на одну частицу (grain Reynolds number R’):

$$\theta = \frac{\tau}{gd\left(\rho_{\text{part}} - \rho_{\text{w}}\right)},$$

$$R' = d\frac{U'}{\nu},$$

$$U' = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_{\text{w}}}}, \tag{2}$$

где τ – напряжение сдвига, кг·м²/с²;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

d – диаметр частиц, м;

ρ_{part} и ρ_w – плотность грунта и воды соответственно, кг/м³;
ν – кинематическая вязкость воды, м²/с.

Позднее В. Н. Гончаровым было показано, что в расчетах критической скорости сдвига придонная скорость может быть заменена средней скоростью потока [6]. В целом, как и многие формулы речной гидравлики, формулы критических скоростей потока разделяются на эмпирические и теоретические. Эмпирические формулы, полученные на основании результатов экспериментов на гидравлических лотках, не являются универсальными и часто для реальных водотоков показывают недостаточно хороший результат, тогда как физически обоснованные теоретические формулы хорошо описывают физику процесса и работают для различных гидравлических условий [7, 8].

Подъемная сила, возникающая из-за разницы давления на верхней и нижней поверхностях частицы, является одним из основных факторов, определяющих начало движения частиц донного грунта и их последующего перемещения в речном потоке. Значение подъемной силы определяется гидравлическими условиями потока, крупностью и формой частиц [9]. Первые исследования по изучению подъемной силы, действующей на донный грунт для потока, проведены Х. А. Эйнштейном и Э. А. Эль-Самни в 1949 г. [10], в результате чего было установлено, что для крупных элементов шероховатости подъемная сила является одним из основных факторов, определяющих устойчивость частицы. Так, при упрощенных расчетах без учета подъемной силы значения критической скорости сдвига занижаются. Несколько позже, в 1958 г., В. С. Чепилом [11] был оценен вклад подъемной силы в аэродинамической трубе. Эксперименты показали, что вклад подъемной силы составил около 80 % от силы лобового сопротивления, что подтвердило тот факт, что для крупных частиц подъемная сила сопоставима по величине с силой лобового сопротивления и является определяющей при расчете начала движения. В более позднем исследовании, на основании безразмерной критической формулы сдвига и данных экспериментов на лотках для разнородных фракций, в работе [12] было установлено существование минимума критической скорости потока в функции радиуса частиц модельной почвы, выраженного в нелинейной одномодальной зависимости указанных переменных состояния. При этом для детального анализа процессов сдвига и вывода формулы критической скорости сдвига в условиях реального речного потока также важно дать количественную оценку вклада отдельных сил, инициирующих начало движения частиц донного грунта, а также оценить зависимость подъемной силы от крупности сдвигаемых частиц.

Целью проведенного исследования является оценка вклада сил, действующих со стороны потока, в начало движения донного грунта в речном потоке на основании данных наблюдений за гидравлическими переменными состояния тридцати североамериканских водотоков.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многие исследователи ставят критическую скорость сдвига v_{shear}, м/с, в зависимость от глубины потока h, м, крупности донных отложений d, м, гидравлической крупности (скорости осаждения частиц) ω, м/с, коэффициента кинематической вязкости воды v, м^2/с, и параметров трения на границе потока воды и донного грунта (например, коэффициент внутреннего трения f, б/р, сцепление частиц грунта при сдвиге c, кг/(м·с^2), и так далее). Так, в последних исследованиях с использованием современных приборов было показано, что пороговая скорость сдвига донных частиц прямо пропорциональна размеру частиц наносов и глубине воды [13]. Также в исследовании [14] экспериментально установлено, что нестационарность и неравномерность потока влияют на начало сдвига частиц донного грунта, что подтверждает теоретические выкладки И. Ф. Карасева [15]. Исследование влияния однородности крупности частиц донных отложений на порог их трогания показало, что с увеличением однородности устойчивость частиц увеличивается [16].

Рассмотрим несколько формул для расчета начальной скорости сдвига донных частиц. В основном эти формулы построены на условии устойчивости частиц на дне и дополнены уточняющими эмпирическими коэффициентами:

– формула Шамова [17]:

$$v_{shear} = 4{,}4 d^{1/3} h^{1/6}; \quad (3)$$

– формула Богарди [18]:

$$v_{shear} = 22{,}9 d^{4/9} \sqrt{(\gamma_{part} - \gamma_w)}; \quad (4)$$

– формула Мависа [19]:

$$v_{shear} = 0{,}5 d^{4/3} \sqrt{(\gamma_{part} - \gamma_w)}; \quad (5)$$

– формула Ша Юй-Цин [18]:

$$v_{shear} = 24{,}8 \frac{d^{5/8} h^{1/5}}{\omega^{1/4}}; \quad (6)$$

– формула Великанова [20]:

$$v_{shear} = \sqrt{g(15d + 0{,}006)}; \quad (7)$$

– формула Кнороза [21]:

$$v_{shear} = 1{,}3 \lg\left(\frac{14{,}7h}{d^{0{,}75}}\right)\sqrt{gd}; \quad (8)$$

– формула Гончарова [6]:

$$v_{shear} = \sqrt{\frac{2}{3{,}5}\left(\frac{\rho_{part}}{\rho_w} - 1\right) g d_{50}} \left(\lg 8{,}8 \frac{h}{d_{50}}\right), \quad (9)$$

где γ_{part} и γ_w – относительная плотность частицы и воды соответственно, б/р.

Рассмотрим баланс сил, действующих на покоящуюся на дне потока частицу, сдвигающую проекцию силы тяжести потока F_{flow}, подъемную силу потока F_{lift} и удерживающую проекцию силы тяжести, действующую на частицу F_{part}. При этом силу, действующую со стороны потока F_{flow}, будем рассматривать как силу отдельной струи потока с геометрическими масштабами, соответствующими размеру частицы за вычетом сопротивления грунта сдвигу:

$$\begin{aligned} &F_{flow} + F_{lift} = F_{part}, \\ &F_{flow} = F_{grav} - F_{resist}, \\ &F_{resist} = F_{grav} \cdot f + c \cdot S, \end{aligned} \tag{10}$$

где f – коэффициент внутреннего трения, б/р;

c – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с^2) (для несвязного грунта $c = 0$);

S – площадь приложения силы, м^2.

При равенстве сил в верхнем выражении системы (10) или при значении силы в правой части, превышающем сумму сил в левой части, частица будет неподвижна. Если баланс сил в системе (10) представить в виде отношения, условием неподвижности частицы будет непревышение этого отношения единицы:

$$\frac{F_{flow} + F_{lift}}{F_{part}} = 1. \tag{11}$$

В случае, если отношение (11) превышает единицу, т. е. сила, действующая на частицу со стороны потока, превышает силу, действующую со стороны частиц, имеет место сдвиг. Соответственно, если отношение (11) менее единицы, то частицы неподвижны.

Распишем силу F_{flow}, действующую со стороны потока, с учетом сопротивления донного грунта:

$$F_{flow} = m \cdot g \cdot I \cdot (1 - f) - c \cdot S = \rho_w \cdot v_{shear} \cdot b_{el} \cdot h_{el} \cdot g \cdot I \cdot \Delta t \cdot (1 - f) - c \cdot v_{shear} \cdot b_{el} \cdot \Delta t, \tag{12}$$

где b_{el} и h_{el} – ширина и высота элементарной струи, м;

m – масса элементарного объема воды, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

I – уклон дна, б/р;

$v_{shear} \cdot \Delta t$ – расстояние, которое проходит струя за время Δt (Δt = 1 с).

Тогда выражение (12), записанное для частицы размера d, примет вид:

$$F_{flow} = \rho_w \cdot v_{shear} \cdot d^2 \cdot g \cdot I \cdot \Delta t \cdot (1 - f) - c \cdot v_{shear} \cdot d \cdot \Delta t, \tag{13}$$

где v_{shear} – критическая скорость сдвига, м/с;

d – диаметр частицы, м.

Удерживающая проекция силы тяжести частицы с учетом ее веса в воде записывается как:

$$F_{part} = \frac{\rho_{part} - \rho_w}{\rho_{part}} m_{part} \cdot g = \frac{1}{6} \cdot \frac{\rho_{part} - \rho_w}{\rho_{part}} \cdot \rho_{part} \cdot g \cdot \pi \cdot d^3 = \frac{1}{6} \cdot \left(\rho_{part} - \rho_w\right) \cdot g \cdot \pi \cdot d^3, \quad (14)$$

где m_{part} – масса частицы, кг;

ρ_{part} и ρ_w – плотности грунта и воды соответственно, кг/м^3.

Подъемная сила записывается как [20, 21]:

$$F_{lift} = k_{lift} \cdot \frac{\rho_w \cdot v_{shear}^2}{2} \frac{\pi d^2}{4}, \quad (15)$$

где k_{lift} – коэффициент подъемного усилия, б/р.

Тогда отношение (11) с учетом выражений (13) – (15), полагая $\Delta t = 1$ с, примет вид:

$$\frac{F_{flow} + F_{lift}}{F_{part}} = 6 \cdot \frac{\rho_w \cdot v_{shear} \cdot d^2 \cdot g \cdot I \cdot \left(1 - f\right) - c \cdot v_{shear} \cdot d + \frac{1}{8} k_{lift} \cdot \pi d^2 \cdot \rho_w \cdot v_{shear}^2}{\left(\rho_{part} - \rho_w\right) \cdot g \cdot \pi \cdot d^3}. \quad (16)$$

Или, после некоторых сокращений, критерий сдвига донного грунта крупностью d для условий несвязного грунта ($c = 0$) примет вид:

$$\frac{6 \cdot \rho_w \cdot v_{shear} \cdot g \cdot I \cdot \left(1 - f\right) + \frac{3}{4} k_{lift} \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot v_{shear}^2}{\left(\rho_{part} - \rho_w\right) \cdot g \cdot \pi \cdot d} \geq 1. \quad (17)$$

Объекты моделирования

В качестве объектов моделирования определены тридцать североамериканских рек, данные наблюдений о которых опубликованы в отчете [24]. Реки расположены в различных физико-географических зонах и имеют широкий диапазон уклонов, площадей водосбора и, соответственно, водности. Также исследуемые реки характеризуются неоднородным гранулометрическим составом донных отложений и наносов.

В оценке вклада отдельных сил, действующих на неподвижную частицу донного грунта, использовались данные более семисот наблюдений за гидравлическими переменными состояния на этих водотоках. В табл. 1 приведен список расчетных створов и средние значения гидравлических переменных состояния потока для периода с минимальным расходом влекомых наносов $G_{bedload}$, кг/с.

Таблица 1. Средние значения гидравлических переменных состояния потока исследуемых створов

Table 1. The average values of the studied sites flow state hydraulic variables

	River sites	*I*, б/р	*d*, м	*Q*, м³/с	*v*, м/с	$G_{bedload}$, кг/с
1	Susitna River near Talkeetna, Alaska	0.0013	0.0005	282	1.4	0.37
2	Talkeetna River near Talkeetna, Alaska	0.00049	0.0005	90.1	1.0	1.34
3	Chulitua River below Canyon near Talkeetna, Alaska	0.00044	0.0005	253	1.4	37.1
4	Tanana River at Fairbanks, Alaska	0.00044	0.00012	402	1.3	4.18
5	Snake River near Anatone, Wash,	0.00059	0.00025	1117	1.8	0.79
6	Toutle River at Tower Road near Silver Lake, Wash.	0.0013	0.00025	15.42	1.0	2.65
7	Clearwater River at Spalding, Idaho	9.8E-05	0.00025	419	0.9	0.38
8	North Fork of Lick Creek near Yellow Pine, Idaho	0.00571	0.00002	0.235	0.2	5.9E-05
9	Muddy Creek near Pinedale, Wyo.	0.00731	0.00006	0.267	0.3	0.00765
10	East Fork River near Pinedale, Wyo.	0.0007	0.00025	3.64	0.6	0.578
11	Yampa River at Deerlodge Park, Colo.	0.00087	0.00025	37.875	0.6	4.31
12	South Fork of South Platte River above Verniillion Creek, Colo.	0.0004	0.00025	8.32	0.6	0.18063
13	Middle Fork of Boulder Creek at Nederland, Colo.	0.0163	0.0005	3.34	0.8	0.01498
14	Jefferson Creek near Jefferson, Colo.	0.016	0.0005	0.358	0.5	0.00331
15	Craig Creek near Bailey, Colo.	0.025	0.00025	0.273	0.2	0.00354
16	Geneva Creek near Grant, Colo.	0.01	0.00025	0.93	0.6	0.00631
17	Pony Creek near Antero Reservoir, Colo.	0.005	0.00012	0.0258	0.3	0.00053
18	North Fork of South Platte River at Shawnee, Colo.	0.0068	0.0005	3.87	0.8	0.0899
19	North Fork of South Platte River at Crossons, Colo.	0.0047	0.0005	6.3	0.7	0.0574
20	North Fork of South Platte River at Buffalo, Colo.	0.0107	0.0005	6.11	0.8	0.03595
21	Fourmile Creek near Fairplay, Colo.	0.016	0.00025	0.765	0.8	0.00459
22	South Fork of South Platte River at Trumbull, Colo.	0.0035	0.0005	14.65	0.9	0.0378
23	Buffalo Creek at Buffalo, Colo.	0.0009	0.00025	0.62	0.5	0.05792
24	Horse Creek near Westcreek, Colo.	0.0039	0.0005	1.24	0.6	0.01905
25	Blue River below Green Mountan Reservoir, Colo.	0.0026	0.00025	21.5	0.9	0.0291
26	Wisconsin River at Muscoda, Wis.	0.00028	0.00025	116	0.5	3.39
27	Black River near Galesville, Wis.	0.00017	0.00025	28.5	0.5	0.971
28	Chippewa River near Caryville, Wis.	0.00025	0.00025	278	0.7	1.29
29	Chippewa River at Durand, Wis.	0.00029	0.00025	119	0.6	5.50
30	Chippewa River near Pepin, Wis.	0.00029	0.00025	72.3	0.5	4.03

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка вклада отдельных сил, действующих на покоящуюся на дне частицу в речном потоке, проводилась по формулам (13) и (15). Для расчетов одного из аргументов в этих формулах – критической скорости сдвига – были проанализированы несколько формул скорости начала движения (3) – (9). Результаты расчетов по этим формулам сопоставлены с наблюденными скоростями потока, которым соответствует минимальный среди наблюденных расход влекомых наносов. Удовлетворительным полагался результат, при котором рассчитанная скорость сдвига не превышала наблюденную скорость потока. В среднем по всем расчетным створам лучший результат показали формулы Богарди (4) и Ша Юй-Цина (6).

Полученные по формуле Богарди (4) значения критической скорости сдвига легли в основу расчетов по соотношению (15) для калибровки коэффициента подъемного усилия отдельно для каждого створа. Результаты калибровки коэффициента K_{lift} представлены на рис. 1. Как следует из рис. 1, коэффициент K_{lift}, осредненный для створов с одинаковой крупностью донных отложений, прямо пропорционален крупности влекомых наносов обеспеченностью 95 % d_{min}, мм.

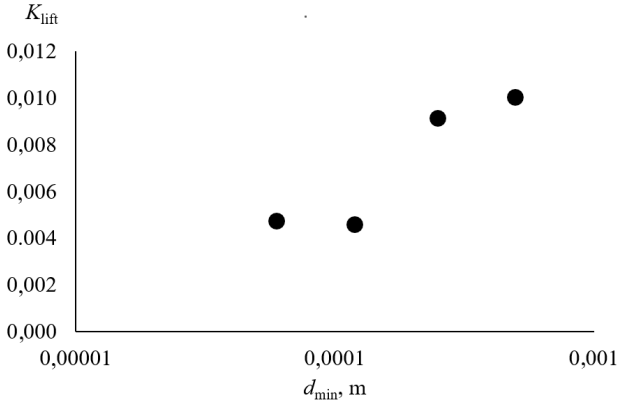


Рис. 1. Зависимость коэффициента K_{lift} от крупности влекомых наносов d_{min}
Fig. 1. Dependence of the K_{lift} coefficient on the minimum size of the bedload sediments d_{min}

Для расчета давления потока на покоящуюся частицу в формуле (13) для каждого водотока был откалиброван коэффициент внутреннего трения f для меженного периода, характеризующегося началом движения донного грунта. Для калибровки коэффициента внутреннего трения f использована формула общего расхода наносов G_{tot} [25]:

$$G_{\text{tot}} = \frac{\rho_{\text{part}}}{\left(\rho_{\text{part}} - \rho_{\text{w}}\right)} \cdot Q\left(\frac{c}{gh} - \rho_{\text{w}} \cdot I \cdot \left(1 - f\right)\right). \qquad (18)$$

Для исследуемых водотоков с общим расходом наносов в диапазоне от $35 \cdot 10^{-5}$ до 232 кг/с среднее относительное отклонение между рассчитанными $G_{\text{tot calc}}$ и наблюденными $G_{\text{tot obs}}$ расходами наносов составило 82 % (рис. 2).

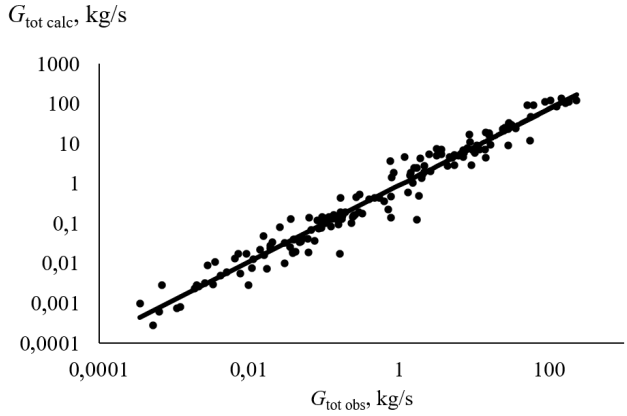


Рис. 2. Зависимость наблюденных $G_{\text{tot obs}}$ и рассчитанных $G_{\text{tot calc}}$ расходов наносов, кг/с
Fig. 2. Dependence of observed $G_{\text{tot obs}}$ and calculated $G_{\text{tot calc}}$ sediment discharges, kg/s

Вклад сдвигающей проекции силы тяжести σ, % в сумму сил, приводящих частицу донного грунта в движение, рассчитывается как отношение:

$$\sigma = 100\% \frac{F_{\text{flow}}}{F_{\text{flow}} + F_{\text{lift}}}. \quad (19)$$

На рис. 3 показана полученная обратная зависимость вклада сдвигающей проекции силы тяжести от крупности частиц донного грунта исследуемых водотоков. Значение σ было осреднено для частиц одной крупности.

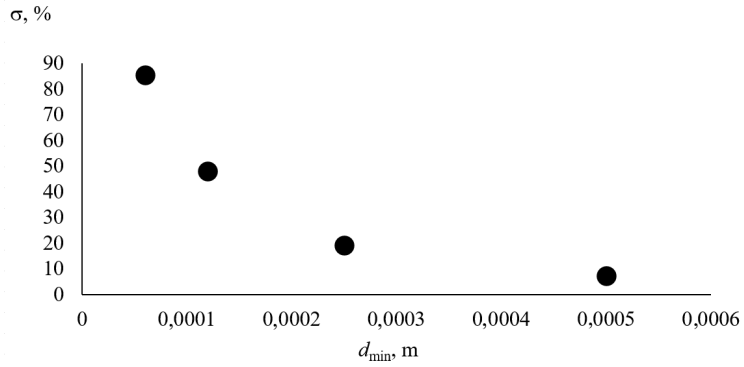


Рис. 3. Зависимость вклада сдвигающей проекции силы тяжести от крупности частиц донного грунта исследуемых водотоков
Fig. 3. Dependence of the contribution of the gravity shifting projection on the size of the studied watercourses bottom soil particles

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что вклад подъемной силы в общей сумме сил, действующих на частицу донного грунта, увеличивается с увеличением ее крупности. Увеличение вклада подъемной силы с ростом крупности частиц является прямым следствием перехода от вязкостного механизма взаимодействия потока с дном к инерционному и турбулентному обтеканию крупных шероховатостей. Полученные результаты хорошо согласуются с лабораторными экспериментами (например, работы Эйнштейна, Эль-Самни, Чепила [10, 11]), которые показали, что для крупного гравия и валунов критическая скорость сдвига, рассчитанная только по силе лобового сопротивления, систематически занижается. Также полученные зависимости коэффициента K_{lift} от крупности влекомых наносов и зависимость вклада сдвигающей проекции силы тяжести от крупности частиц донного грунта исследуемых водотоков подтверждаются и другими исследователями, например [9, 12, 26, 27].

ВЫВОДЫ

Российские реки отличаются исключительным гидравлическим разнообразием – от крупных равнинных водотоков (Волга, Обь, Лена) с песчаным руслом до горных рек Кавказа, Алтая, Камчатки, Байкальского региона с валунно-галечным аллювием. При этом натурные и лабораторные исследования последних десятилетий [28–31] показали, что в условиях крупнозернистого русла и высоких относительных шероховатостей подъемная сила, вызванная градиентом скоростей и эффектом Бернулли, может не только достигать величины силы тяжести, но и превышать ее при отрыве частицы. Так, анализ механизма взаимодействия речного потока с частицами донного грунта различной крупности позволяет заключить, что гидродинамическая подъемная сила, обусловленная перепадом давления при обтекании частицы, играет определяющую роль в инициации движения частиц донного грунта.

Выявленная в настоящей работе тенденция к увеличению относительного вклада подъемной силы с ростом крупности частиц объясняется переходом от вязкостного режима взаимодействия к инерционному и турбулентному обтеканию выступающих элементов дна. Полученные количественные зависимости коэффициента подъемной силы и сдвигающей проекции силы тяжести от диаметра частиц хорошо согласуются как с классическими лабораторными данными, так и с современными представлениями о нелинейном характере критических напряжений. Это подтверждает обоснованность полученных результатов и указывает на необходимость учета подъемной силы при гидравлических расчетах устойчивости русел, сложенных неоднородным крупнозернистым материалом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караушев А. В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 272 с.
2. Lane E. W. Progress report on studies of the design of the stable channels by the Bureau of reclamation // Proc. ASCE. 1953. Vol. 79 (280). 72 p.
3. Du Buat L. G. Principles d'hydraulique. Paris, 1816. 443 p.
4. Exner F. Zur Theorie der Flussmaander // Sitzungsber. Acad. Wissenschaften. Wien. Math. 1919. Vol. 31. P. 128–155.
5. Shields A. Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bedload Movement. Berlin: Wasserbau Schiffbau, 1936. 47 p.
6. Гончаров В. Н. Основы динамики русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1954. 452 с.
7. Simões Francisco J. M. Shear velocity criterion for incipient motion of sediment // Water Science and Engineering. 2014. Vol. 7 (2). P. 183–193. https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.006
8. Kulkarni D. R. and Bhalerao A. The experimental analysis of incipient motion condition of nonuniform sediment. In: P. V. Timbadiya et al. (eds.) Fluid Mechanics and Hydraulics. Part of the book series: Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 314. P. 49–62. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9151-6_5
9. National Engineering Handbook Sedimentation. Chapter 4. Transmission of Sediment by Water. United States Department of Agriculture Soil Conservation Service. 43 p.
10. Einstein H. A., El-Samni E. A. Hydrodynamic forces on a rough wall // Reviews of Modern Physics. 1949. No. 21 (3). P. 520–524.
11. Chepil W. S. The use of evenly spaced hemispheres to evaluate aerodynamic forces on a soil surface // Eos, Transactions American Geophysical Union. 1958. No. 39 (3). 397–404.
12. Гендугов В. М., Глазунов Г. П. Подъемная сила в водном потоке, размывающем почву // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 2. С. 32–36.
13. Shahmohammadi R., Afzalimehr H., Sui J. Assessment of Critical Shear Stress and Threshold Velocity in Shallow Flow with Sand Particles // Water. 2021. Vol. 13. 994 p. https://doi.org/10.3390/w13070994
14. Dodangeh E., Afzalimehr H. Incipient motion of sediment particles in the presence of bed forms under decelerating and accelerating flows // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2022. Vol. 70. Iss. 1. P. 89–102. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0002
15. Карасев И. Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 288 с.
16. Hossein N. M., Hossein K., and Rasoul M. Laboratory analysis of incipient motion velocity for non-uniform non-cohesive sediments movement in rectangular flumes // Arabian Journal of Geosciences. 2016. Vol. 9. Art. 25. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2120-0
17. Шамов Г. И. Речные наносы. Л.: Гидрометеоиздат, 1954. 346 с.
18. Bogardi I. Sediment transport in alluvial stream. Budapest, Askad. KISDO. 1970. 826 p.
19. Mavis F. F., Liu T., Soucek E. The transportation of detritus by flowing water. Univ. Iowa: Stand. Eng. Bull. 1937. 23 p.
20. Великанов М. А. Динамика русловых потоков. М.: Гостехиздат, 1954, т. 1, 322 с.; 1955, т. 2, 323 с.
21. Кнороз В. С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1958. Т. 59. С. 62–81.
22. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат. 1962. 225 с.

23. Мирцхулава Ц. Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 303 с.
24. Measured total sediment loads (suspended loads and bedloads) for 93 United States streams. Denver, Colorado: Geological Survey. 1989. 128 p.
25. Shmakova M. V. Sediment transport in river flows: New approaches and formulas. In: D. Pasquali (ed.). Modeling of sediment transport. 2022. https://doi.org/10.5772/intechopen.103942
26. Barati R., Neyshabouri S. A. A. S., Ahmadi G. On the threshold of motion of sediment grains: Hydrodynamic forces effects. Conference: The 6th Jordanian International Civil Engineering Conference. Jordan, 2015.
27. Patel B. S., Patel P. L., Porey P. D. Threshold for initiation of motion of unimodal and bimodal sediments // International Journal of Sediment Research. 2013. No. 28. P. 24–33. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(13)60015-3
28. Wiberg P. L., Smith J. D. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments // Water Resources Research. 1987. Vol. 23. No. 8. P. 1471–1480.
29. Schmeeckle M. W., Nelson J. M., Shreve R. L. Forces on stationary particles in near-bed turbulent flows // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2007. Vol. 112. Iss. F2. Art. F02003. https://doi.org/10.1029/2006JF000536
30. Dietrich W. E. Settling velocity of natural particles // Water Resources Research. 1982. Vol. 18. No. 6. P. 1615–1626.
31. Dietrich W. E., Whiting P. J. Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel // River Meandering (Ikeda S., Parker G., eds.). Washington, DC: AGU, 1989. P. 1–50.

REFERENCES

1. Karaushev A. V. Theory and methods of calculating river sediments. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 272 p. (In Russ.).
2. Lane E. W. Progress report on studies of the design of the stable channels by the Bureau of reclamation. *Proc. ASCE*. 1953. Vol. 79 (280). 72 p.
3. Du Buat L. G. Principles d'hydraulique. Paris, 1816. 443 p.
4. Exner F. Zur Theorie der Flussmaander. *Sitzungsber. Acad. Wissenschaften. Wien. Math.* 1919. Vol. 31. P. 128–155.
5. Shields A. Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bedload Movement. Berlin: Wasserbau Schiffbau, 1936. 47 p.
6. Goncharov V. N. Fundamentals of the dynamics of riverbed flows. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1954. 452 p. (In Russ.).
7. Simões Francisco J. M. Shear velocity criterion for incipient motion of sediment. *Water Science and Engineering*. 2014. Vol. 7 (2). P. 183–193. https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.006
8. Kulkarni D. R., and Bhalerao A. The experimental analysis of incipient motion condition of nonuniform sediment. In: P. V. Timbadiya et al. (eds.) Fluid Mechanics and Hydraulics. Part of the book series: Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 314. P. 49–62. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9151-6_5
9. National Engineering Handbook Sedimentation. Chapter 4. Transmission of Sediment by Water. United States Department of Agriculture Soil Conservation Service. 43 p.
10. Einstein H. A., and El-Samni E. A. Hydrodynamic forces on a rough wall. *Reviews of Modern Physics*. 1949. No. 21 (3), P. 520–524.
11. Chepil W. S. The use of evenly spaced hemispheres to evaluate aerodynamic forces on a soil surface. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 1958. No. 39 (3). 397–404.
12. Gendugov V. M., Glazunov G. P. Carrying capacity in the soil eroding water flow. *Newsletters of Moscow University. Series 17. Soil science.* 2009. No. 2. P. 32–36.

13. Shahmohammadi R., Afzalimehr H., Sui J. Assessment of Critical Shear Stress and Threshold Velocity in Shallow Flow with Sand Particles. *Water*. 2021. Vol. 13. 994 p. https://doi.org/10.3390/w13070994
14. Dodangeh E., Afzalimehr H. Incipient motion of sediment particles in the presence of bed forms under decelerating and accelerating flows. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2022. Vol. 70. Iss. 1. P. 89–102. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0002
15. Karasev I. F. Channel processes during the transfer of runoff. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975. 288 p. (In Russ.).
16. Hossein N. M., Hossein K., and Rasoul M. Laboratory analysis of incipient motion velocity for non-uniform non-cohesive sediments movement in rectangular flumes. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016. Vol. 9. Art. 25. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2120-0
17. Shamov G. I. River sediments. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1954. 346 p. (In Russ.).
18. Bogardi I. Sediment transport in alluvial stream. Budapest, Askad. KISDO. 1970. 826 p.
19. Mavis F. F., Liu T., Soucek E. The transportation of detritus by flowing water. Univ. Iowa: Stand. Eng. Bull. 1937. 23 p.
20. Velikanov M. A. Dynamics of riverbed flows. Moscow: Gostekhizdat, 1954, vol. 1, 322 p.; 1955, vol. 2, 323 p. (In Russ.).
21. Knoroz V. S. Non-eroding velocity for non-cohesive soils and its determining factors. *Newsletters RSRIH by B. E. Vedeneev*. 1958. Vol. 59. P. 62–81. (In Russ.).
22. Goncharov V. N. Dynamics of riverbed flows. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1962. 225 p. (In Russ.).
23. Mirtskhulava Ts. E. Fundamentals of physics and mechanics of riverbed erosion. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 303 p. (In Russ.).
24. Measured total sediment loads (suspended loads and bedloads) for 93 United States streams. Denver, Colorado: Geological Survey. 1989. 128 p.
25. Shmakova M. V. Sediment transport in river flows: New approaches and formulas. In: D. Pasquali (ed.). Modeling of sediment transport. 2022. https://doi.org/10.5772/intechopen.103942
26. Barati R., Neyshabouri S. A. A. S., Ahmadi G. On the threshold of motion of sediment grains: Hydrodynamic forces effects. Conference: The 6th Jordanian International Civil Engineering Conference. Jordan, 2015.
27. Patel B. S., Patel P. L., Porey P. D. Threshold for initiation of motion of unimodal and bimodal sediments. *International Journal of Sediment Research*. 2013. No. 28. P. 24–33. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(13)60015-3
28. Wiberg P. L., Smith J. D. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*. 1987. Vol. 23. No. 8. P. 1471–1480.
29. Schmeeckle M. W., Nelson J. M., Shreve R. L. Forces on stationary particles in near-bed turbulent flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2007. Vol. 112. Iss. F2. Art. F02003. https://doi.org/10.1029/2006JF000536
30. Dietrich W. E. Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research*. 1982. Vol. 18. No. 6. P. 1615–1626.
31. Dietrich W. E., Whiting P. J. Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel. *River Meandering* (Ikeda S., Parker G., eds.). Washington, DC: AGU, 1989. P. 1–50.

Сведения об авторе:

Шмакова Марина Валентиновна, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории математических методов моделирования, Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9; https://orcid.org/0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

About the author:

Marina V. Shmakova, Doctor of Sciences in Geography, Leading Researcher, Head, Laboratory of Mathematical Methods of Modelling, Institute of Limnology RAS of Russia, 9, Sevastyanova str., St. Petersburg, 196105, Russia; https://orcid.org/0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 22.10.2025
Поступила после рецензирования / Revised 25.05.2026.
Принята к публикации / Accepted 03.07.2026.