

Гидрология

Лепихин А.П., Возняк А.А.

Александр Сергеевич Завадский

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: az200611@rambler.ru

Aleksandr S. Zavadskiy

Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Павел Петрович Головлёв

младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: pavel_golovlev@list.ru

Pavel P. Golovlev

Junior Researcher, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Георгий Борисович Голубцов

младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

Georgiy B. Golubcov

Postgraduate Student, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Г.Б. Формирование, эволюция и временная трансформация параллельно-рукавных разветвлений речных русел // Географический вестник = Geographical bulletin. 2020. №4(55). С. 110–125. doi 10.17072/2079-7877-2020-4-110-125.

Please cite this article in English as:

Chalov, R.S., Berkovitch, K.M., Ruleva, S.N., Zavadskiy, A.S., Golovlev, P.P., Golubcov, G.B. (2020). Formation and evolution of parallel-braided channel reaches. *Geographical bulletin*. No 4(55). P. 110–125. doi 10.17072/2079-7877-2020-4-110-125.

УДК 532.543.5

DOI: 10.17072/2079-7877-2020-4-125-136

К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ**Анатолий Павлович Лепихин**ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2770-6890>, Author ID: 147950, Scopus ID: 6603322084,

SPIN-код: 761-8001.

e-mail: lepihin49@mail.ru

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь**Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Пермь**Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь***Анна Анатольевна Возняк**

Author ID: 289675, Scopus ID: 57211202546, SPIN-код: 2436-8281.

e-mail: aavoznyak@gmail.com

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь**Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Пермь**Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь*

Гидрология
Лепихин А.П., Возняк А.А.

Обсуждается проблема высокой погрешности расчетных соотношений, предлагаемых для оценки транспорта наносов в естественных водотоках. Многочисленные эмпирические расчетные соотношения, полученные и успешно используемые на одних водотоках, могут давать погрешность в 1000% при их использовании на других реках. Расчетные формулы, отработанные на гидравлических лотках, каналах, оказываются не приемлемыми для конкретных рек, естественных русел. Проблема возникла вследствие сложности геометрии естественных водотоков и неоднородности состава донных отложений. Рассматриваются два подхода, применяемые в настоящее время в оценке транспортирующей способности русловых потоков. Они отражены в речной гидравлике еще во второй половине XVIII в. работами А. Шези и П. Дюбуа. Определены и теоретически доказаны условия и возможности применения того или иного метода. Направление П. Дюбуа отличают детальное изучение влияния отдельных факторов на основе многочисленных экспериментальных моделей, построение на этой основе достаточно строгих физических моделей, усложнение расчетных соотношений, включение в них новых дополнительных параметров. С методом А. Шези связано построение исходной максимально упрощенной физической модели, а калибровочные параметры для конкретных условий устанавливаются на основе натурных наблюдений или качественных оценок, поэтому такие параметры менее точны, но более устойчивы. Показано, что, несмотря на научную привлекательность подхода с построением и использованием более сложных моделей, содержащих новые дополнительные параметры, включение в расчетные модели дополнительных параметров обуславливает включение и дополнительных погрешностей, связанных с оценкой этих параметров. Доказана эффективность обоих подходов, а применение того или иного подхода определяется условиями и характером решаемых задач, объемом и точностью задания исходных данных.

Ключевые слова: транспортирующая способность потока, гидравлические характеристики потока, расход наносов, гидравлический режим.

ON THE PROBLEM OF SEDIMENT TRANSPORT ASSESSMENT

Anatoly P. Lepikhin

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2770-6890>, Author ID: 147950, Scopus ID: 6603322084,

SPIN-код: 7621-8001.

e-mail: lepin49@mail.ru

Perm State University, Perm

Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources (Kama Branch), Perm

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm

Anna A. Wozniak

Author ID: 289675, Scopus ID: 57211202546, SPIN-код: 2436-8281.

e-mail: aavoznyak@gmail.com

Perm State University, Perm

Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources (Kama Branch), Perm

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm

The paper discusses the problem of high errors in the design ratios proposed for assessing sediment transport in natural watercourses. The question is why numerous empirical design ratios obtained and successfully used for some watercourses can give an error of 1000% when applied to other rivers. Calculation formulas worked out on hydraulic trays and channels are found to be inappropriate for specific rivers and natural channels. The problem is caused by the complexity of the natural watercourses geometry and the heterogeneity of the bottom sediment composition. Two approaches that are currently used in assessing the transporting capacity of river flows are studied in the paper. They were laid down in river hydraulics as early as the second half of the 18th century in the works by A. Chesi and P. Dubois. The conditions and possibilities of using both methods are considered and theoretically proven in the paper. The approach developed by P. Dubois is distinguished by a detailed study of the influence of individual factors based on numerous experimental models, the construction of fairly rigorous physical models on this basis, the complication of design ratios, the inclusion of new additional parameters. A. Chesi offered the construction of a maximally simplified initial physical model, with the calibration parameters established for specific conditions on the basis of field observations or qualitative estimates, and therefore being less accurate but more stable. It is shown that despite the scientific attractiveness of the approach to constructing and using more complex calculation models containing new additional parameters, the inclusion of additional

parameters entails the inclusion of additional errors associated with the estimation of these parameters. The effectiveness of both approaches is proved; the application of one or the other approach is determined by the conditions and nature of the tasks to be solved, as well as the volume and accuracy of the initial data.

Key words: transport capacity of river flow, hydraulic flow characteristics, sediment flow rate, hydraulic mode.

Введение

Для решения очень широкого круга вопросов, рассматриваемых в прикладной гидрологии, требуются оценка, анализ транспорта наносов, непосредственно связанный с динамикой русел. В настоящее время для решения этих задач используются современные вычислительные модели русловых процессов в 1D, 2D и даже в 3D постановке, позволяющие при детальном задании морфометрии рассматриваемого водного объекта учитывать не только структуру турбулентности потока, но и влияние изменения морфометрии русла на гидродинамику водотока. Некоторый их обзор дается в работах [1; 12; 18; 20; 25] и др. Однако их реализация требует не только наличия соответствующих вычислительных средств и программных продуктов, но и детального задания исходной гидрометрической информации. В то же время для выполнения различных балансовых оценок остается весьма актуальна интегральная оценка транспортирующей способности водотока при минимальном объеме исходных данных. При этом практикуется отмечать, указывать на низкую согласуемость, оправдываемость различных расчетных соотношений по оценке транспортирующей способности русловых потоков [6; 13; 17]. Однако при этом, к сожалению, не ставится вопрос: «С чем связано такое несоответствие расчетных и наблюдаемых значений, если все они построены на основе эмпирических данных? Где гарантия, что расчетные соотношения, показывающие высокую оправдываемость для одних водотоков, для одних массивов исходных данных, будут эффективно работать и на других водотоках при других гидравлических режимах?»

Как правило, при решении прикладных задач выделяют влекомые наносы, распространяемые в придонном слое, и взвешенные наносы, переносимые во всей толще потока. Совершенно очевидно, что в качестве определяемых параметров для оценки потока влекомых наносов, вероятно, должны учитываться размеры наносов и скорость потока. При оценке взвешенных наносов необходимо в качестве дополнительного параметра учитывать еще глубину водотока. Большинство расчетных соотношений построено по данной схеме.

Тогда в чем причина таких значительных отклонений расчетных зависимостей от наблюдаемых? И чем обусловлены жесткие дискуссии по самой методологии построения данных расчетных зависимостей, развернувшиеся на страницах научных журналов [5; 17]. На наш взгляд, данные дискуссии являются, в определенной мере, отражением двух различных направлений развития динамики русловых потоков, сформировавшихся еще в последней четверти XVIII в. в работах А. Шези и П.-Л. Дюбуа.

Характерная особенность задач инженерной гидрологии, гидравлики связана с тем, что расчетные параметры определяются очень большим количеством параметров, которые сами характеризуются очень значительной пространственной и временной изменчивостью.

Первое направление, предложенное А. Шези: построение исходной максимально упрощенной физической модели, а калибровочный параметр для конкретных условий устанавливается на основе натуральных наблюдений или качественных оценок. Наглядным примером действенности такого подхода являются многочисленные таблицы по оценке коэффициента гидравлической шероховатости n , где конкретная числовая оценка данного параметра дается на основе качественного описания водного объекта. При этом практически никого не смущает абсурдность размерности рассматриваемого параметра $n = [с/м^{1/3}]$.

Однако такой подход, в значительной мере, вынужденная мера. С одной стороны, существует острая потребность решения конкретных практических задач, а с другой – очень слабая изученность рассматриваемых природных процессов, существенная изменчивость определяющих их факторов.

Другой подход, используемый П.-Л. Дюбуа [21]: детальное изучение влияния отдельных факторов на основе многочисленных экспериментальных моделей, построение на этой основе достаточно строгих физических моделей.

При этом сама постановка вопроса о том, какой подход более эффективный, не корректна. Все зависит как от условий, так и от характера решаемых задач. Учитывая наличие жестких требований

Гидрология
Лепихин А.П., Возняк А.А.

решения практической задачи при минимальных ресурсах и в минимальные сроки, то, безусловно, подход Шези более эффективен. В то же время, если решать более широкие задачи исследования самого механизма явления, то, безусловно, необходим подход П.-Л. Дюбуа.

Центральной проблемой построения моделей в гидрологии является их многофакторность, при этом определяющие параметры характеризуются значительной пространственной и временной изменчивостью.

В то же время использование технологии «черного ящика», когда ставится задача прогнозирования сигнала на выходе, исходя из характеристик сигналов на входе, при отсутствии информации о его внутреннем устройстве, также не является достаточно приемлемой, так как она требует наличия очень длительных рядов наблюдений и принятия, как правило, гипотезы стационарности. При этом не используется информация о достаточно надежно установленных физических, гидродинамических процессах, наблюдаемых в гидрологических системах.

В любом случае эффективность подхода определяется не только адекватностью моделей рассматриваемым гидрологическим процессам, но и, в первую очередь, их параметризацией. А. Брамс в 1757 г., опираясь на теорию И. Ньютона, показал, что скорость течения в реке должна определяться исходя из соотношения сил тяжести и гидравлического сопротивления [15]. Казалось бы, все просто, ясно, но уже в середине прошлого века насчитывалось свыше 300 различных эмпирических соотношений для оценки коэффициента Шези C , определяющего гидравлическое сопротивление потока [3]. Согласно наиболее популярной для оценки C схеме Р.Маннинга [3; 4; 15; 16], таким калибруемым параметром является коэффициент n – коэффициент гидравлической шероховатости. В условиях значительной изменчивости русловых морфометрических характеристик такая схема весьма эффективна и получила широкое распространение. Однако она корректна в случае, если гидравлическое сопротивление формируется за счет зернистой шероховатости. При доминировании грядовой шероховатости нет оснований для переноса значений показателя « n », полученных при одних расходах, на тот же самый водоток, но при другом расходе. В то же время без учета грядового сопротивления невозможно объяснить такое интересное явление, как «канал в режиме».

Естественно, чем сложнее рассматриваемый процесс, тем большим количеством факторов он определяется, тем сложнее калибровка его модели.

Поэтому в построении моделей в гидрологии очень перспективны в настоящее время комбинированные схемы, включающие достаточно отработанные физические, математические модели, а проблема многофакторности их изменчивости решается путем калибровки моделей.

Существенная пространственно-временная неоднородность распределения определяющих параметров принципиально усложняет расчеты гидродинамики русловых потоков, в том числе и потоков наносов.

В то же время для решения практических задач эти соотношения часто весьма не эффективны, поэтому предпочитается оценка коэффициента гидравлической шероховатости « n » на основе качественных оценок в виде соответствующих многочисленных таблиц [16].

Геометрия любого естественного водного объекта характеризуется значительной неоднородностью, а построение ее любой численной модели может быть выполнено с определенным пространственным осреднением. При этом возникает задача оценки критичности отклонения физической морфометрии от задаваемой в численных моделях. Донные, влекомые, взвешенные наносы имеют весьма широкий спектр размеров. При этом их распределение характеризуется значительной асимметричностью, и, соответственно, использовать для их свертки среднеарифметические значения некорректно.

Кроме широкого диапазона размеров частиц донных отложений, они, как правило, содержат значительное количество глинистых включений, которые принципиально отличаются устойчивостью к размыву.

В русловых потоках следует выделять характерные размеры донных отложений, формирующих зернистую шероховатость – Δ , влекомых наносов – $d_{вл}$, взвешенных наносов – $d_{вз}$. Совершенно естественно, что $\Delta \gg d_{вл} \gg d_{вз}$. При этом, если характерные размеры Δ определяются особенностями геологического, морфологического строения речной долины, то актуальные размеры $d_{вл}$ и $d_{вз}$ должны определяться гидродинамическим характером потока.

Гидрология
Лепихин А.П., Возняк А.А.

Подвижность частиц и, соответственно, $max d_{вл}$ (максимальный размер влекомых наносов) определяется коэффициентом устойчивости частиц $\psi \sim \frac{d}{h \cdot i} > \psi_{кр}(Re_*)$ [4]. Здесь d – характерные размеры донных отложений, h, i – характерные значения глубины и гидравлического уклона. При $\psi \gg \psi_{кр}$ будут доминировать процессы заиления, а при $\psi \ll \psi_{кр}$ – размыва, где Re_* – локальное число Рейнольдса – $Re_* = (V \cdot d) / \nu$, V – скорость потока, ν – коэффициент вязкости. При $Re_* \geq 10$, согласно многочисленным экспериментальным оценкам, функция $\psi_{кр}(Re_*)$ становится практически полностью автомодельной относительно Re_* , соответственно, для стабильного русла имеем

$$i \sim d / h. \tag{1}$$

Соотношение режимов «эрозии», «заиления» и «транзита наносов» в русловых потоках представлено на рис.1.

В связи с этим наибольший интерес вызывают такие потоки наносов, которые обеспечивают устойчивость русла, т.е. при соблюдении условий $\psi \sim \psi_{кр}(Re_*)$.

Наносы в русловых потоках характеризуются очень широким диапазоном возможных размеров частиц донных отложений, при этом принимается, что функция их распределения является гладкой функцией. Согласно классической работе А.Н. Колмогорова [7], если материал наносов однороден, то при постоянной скорости их дробления (уменьшения размеров частиц) размеры частиц должны описываться Лог-нормальным распределением. Определенное развитие данного подхода показано в работе [9], где получены функции распределения размеров частиц без использования гипотезы постоянства скорости дробления.

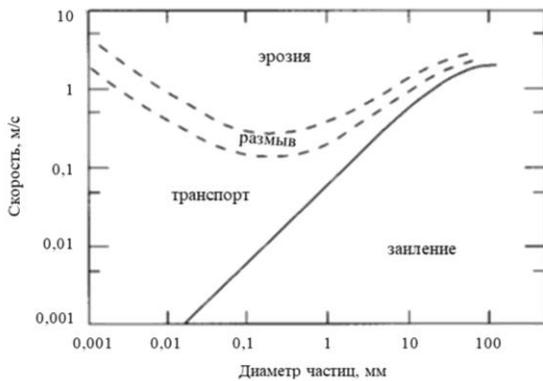


Рис. 1. Диаграмма соотношений режимов эрозии, заиления и транзита наносов в русловых потоках по [23]
Fig. 1. The ratio of erosion, siltation and sediment transit in channel flows according to [23]

Принципиальное отличие реальных, естественных водотоков от экспериментальных лотков и каналов состоит в их значительной как пространственной, так и временной изменчивости.

При этом данные неоднородности могут носить как регулярный характер и описываться соответствующими характерными масштабами

$$\left(\frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial l} \right)^{-1} \sim L_h,$$

$$\left(\frac{1}{B} \frac{\partial B}{\partial l} \right)^{-1} \sim L_B,$$

где H – глубина потока;
 B – ширина потока;
 l – координата по длине потока;
 L_h, L_B – масштабы по изменению глубины и ширины потока,

так и статистический характер с масштабами:

$$\int_0^{\infty} R_{zz}(l) dl \sim L_{cmh},$$

где $R_{zz}(l)$ – характерная автокорреляционная функция отметок дна с дисперсией D_{zz} .

При этом расчеты транспортирующей способности в верифицируемых моделях в корректной постановке возможны только для однородных участков водотоков протяжённостью $L_R < L_h \sim L_B$ (здесь R – гидравлический радиус) и стабильном расходе воды Q по времени t

$$\left(\frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial l} \right)^{-1} \sim L_h,$$

$$\left(\frac{1}{B} \frac{\partial B}{\partial l} \right)^{-1} \sim L_B,$$

Гидрология
Лепихин А.П., Возняк А.А.

Если с условием стационарности, однородности расхода воды явно или косвенно согласуется большинство исследований, то с требованием стабильности руслового процесса:

$$\left(\frac{1}{F/Q} \frac{\partial F/Q}{\partial t} \right)^{-1} \gg T_R$$

и, соответственно, потоков наносов:

$$\frac{1}{T_R} \frac{1}{q_s} \frac{\partial q_s}{\partial t} \sim \frac{1}{T_h} \frac{1}{q_s} \frac{\partial q_s}{\partial t} \sim 0 \quad (2)$$

вопрос до настоящего времени остается открытым.

В последних трех формулах F – площадь живого сечения потока; T_R , T_Q , T_h – характерное время изменения, соответственно, гидравлического радиуса русла, расхода воды и глубины потока; $T_{кр}$ – некоторый критический временной масштаб, при котором русловой процесс перестает быть стабильным; q_s – расход наносов.

Для естественного водотока характерна значительная морфометрическая неоднородность, т.е. взвешенные и влекомые наносы, фиксируемые в определенном створе, в силу инерционности гидродинамических характеристик потока, принципиально не могут соответствовать наблюдаемым в этом створе гидравлическим параметрам потока, а определяются параметрами, сформированными на предыдущем участке протяженностью

$$L \sim \max(H/\lambda, H \cdot V/\omega) \quad (3)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

ω – гидравлическая крупность наносов.

Очень существенный вклад в низкую оправдываемость расчетных соотношений для оценки транспортирующей способности водотоков вносит и неоднородность размеров влекомых и взвешенных наносов. При этом необходимо учитывать не только размеры частиц донных отложений, но и их глинистость, так как наличие глинистых включений принципиально изменяет устойчивость донных отложений к размыву.

Если принять, что поток наносов определяется N статистически независимыми параметрами a_i , то дисперсия его оценки должна в первом приближении составлять [10]

$$\sigma_{q_s}^2 = \sum_i^N \sigma_i^2 \cdot \left(\frac{\partial q_s(a_1 \dots a_N)}{\partial a_i} \right)_0^2 \quad (4)$$

Учитывая, что все гидрологические, морфометрические параметры водотоков задаются с определенной погрешностью, поэтому, исходя из своей структуры, при прочих равных условиях, наименьшей погрешностью должны характеризоваться расчетные зависимости, включающие в себя наименьшее количество параметров, использующие степенные аппроксимации наименьших степеней.

На данных принципах наиболее известны модели транспорта наносов, построенные до компьютерной эпохи [3; 4; 14–16; 19; 23; 24] и др.

Рассмотрим некоторые физические аспекты расчета потока наносов в водотоках.

Эффективность расчетных соотношений, в первую очередь, определяется адекватностью используемого расчетного соотношения доминирующему механизму переноса наносов в рассматриваемом водотоке. Как правило, рассматриваются следующие три взаимосвязанные схемы переноса наносов в реках (рис. 2): перенос во взвешенном состоянии, в режиме сальтации, а так же волочения и качения. Последнее перемещение происходит без отрыва частиц от дна.

Соотношение интенсивности этих механизмов при прочих равных условиях определяется, в первую очередь, соотношением (h/d_l) , где h – глубина водотока; d_l – характерный размер переносимого материала. При $(h/d_l) \rightarrow \infty$ доминирующей формой переноса является взвешенное состояние, в то же время при $h/d_l \sim 1$ – волочение. Третья форма переноса может быть существенной только в горных водотоках во время прохождения на них высоких паводков.

Влекомые наносы. Согласно многочисленным натурным и лабораторным наблюдениям транспорт влекомых наносов в значительной мере происходит в виде каскада «микрорыжков», когда отдельные частицы под воздействием турбулентных пульсаций «взмывают» на определенную величину от дна, а затем, по мере ослабления вихря, опускаются на дно. Далее под воздействием следующего вихря процесс

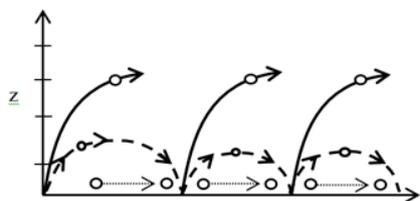


Рис. 2. Характерные механизмы переноса частиц в потоке:

- перенос во взвешенном состоянии;
 -- в режиме сальтации;
 волочение, качение.

Fig. 2. Typical mechanisms of particle transfer in a stream:

- transport in suspension;
 -- in saltation mode;
 drawing, rolling.

повторяется. При этом требуемая мощность M для поддержания частиц во взвешенном состоянии составляет

$$M = S_{вл} \cdot \omega(d) \cdot g, \quad (5)$$

где концентрация влекаемых наносов

$$S_{вл} \sim N \cdot d_{вл}^3 \cdot \rho_s k_1 / \Delta h \text{ [г/м}^3\text{]};$$

N – общее количество частиц, находящихся во взвешенном состоянии над единичной поверхностью дна высотой Δh [1/м³];

Δh – характерная толщина слоя потока, где распространяются влекаемые наносы;

$d_{вл}$ – характерный диаметр влекаемых наносов [м];

ρ_s – плотность материала влекаемых наносов [кг/м³];

k_1 – эмпирический коэффициент;

ω – гидравлическая крупность влекаемых наносов.

Согласно классической схеме распределения энергии русловых потоков, предложенной А.Н. Колмогоровым [7; 8], энергия для поддержания наносов во взвешенном состоянии отбирается от турбулентной компоненты. При этом скорость диссипации энергии – турбулентная мощность потока в негладком, шероховатом русле существенно не однородна по глубине потока и резко возрастает в придонной области

$$\xi = V_*^3 \cdot \rho / \Delta, \quad (6)$$

где Δ – характерный размер донной шероховатости,

V_* – динамическая скорость потока.

Принимая, что

$$M \sim \xi, \quad (7)$$

а так же

$$\Delta \sim d_{вл}, \quad (8)$$

то из сопоставления соотношений (5, 6, 7, 8) следует, что

$$S_{вл} \sim \frac{V_*^3}{d_{вл} \cdot \omega \cdot g}. \quad (9)$$

Учитывая, что

$$V_{cp} \sim \frac{V_* \cdot C}{\sqrt{g}}, \quad (10)$$

где $C \sim \sqrt{g} \cdot P_1 \left(\frac{h}{\Delta}\right)^{1/6}$ [4; 16], P_1 – коэффициент пропорциональности.

Подставляя (10) в (9), имеем

$$S_{вл} \sim \frac{V_{cp}^3}{d_{вл} \cdot \omega \cdot g} \cdot \left(\frac{\Delta}{h}\right)^{3/6}. \quad (11)$$

Если допустить, что влекаемые частицы достаточно крупные и характеризуются квадратичным режимом гидравлического сопротивления [4; 16], что имеет место при

$$d > \left(\frac{g}{v^2}\right)^{1/3}, \quad (12)$$

где v – кинематическая вязкость воды,

$$\omega(d_{вл}) \sim g^{1/2} \cdot d_{вл}^{1/2}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (11) и учитывая (8), получаем

Гидрология
Лепихин А.П., Возняк А.А.

$$S_{вл} \sim \frac{V_{cp}^3 \cdot d_{вл}^{1/2}}{d_{вл} \cdot h^{1/2} \cdot g^{3/2} \cdot d_{вл}^{1/2}}. \quad (14)$$

Тождественно преобразуя (14), учитывая, что $Fr \sim \frac{V_{cp}}{\sqrt{g \cdot h}}$, имеем

$$S_{вл} \sim \frac{h}{d_{вл}} Fr^3.$$

Принимая, что толщина слоя транспорта влекомых наносов Δh сопоставима с $d_{вл}$, т.е.

$$\Delta h \sim k_{\Delta h} \cdot d_{вл}, \quad (15)$$

и, подставляя (15) в (5), для потока влекомых наносов будем иметь

$$q_{вл} = V \cdot \Delta h \cdot S_{вл} = k_{\Delta h} \cdot V \cdot h \cdot Fr^3. \quad (16)$$

Характерной особенностью данного соотношения является то, что оно не включает в себя в явном виде размеры влекомых наносов.

Принимая по [6; 13], что высота гряд

$$h_{gp} \sim P_{zh} \cdot h, \quad (17)$$

а скорость ее перемещения в реках

$$V_{gp} \sim P_{zv} \cdot V \cdot h \cdot Fr^3, \quad (18)$$

соответственно, расход влекомых наносов, транспортируемый в грядовом режиме, составляет

$$q_{gp} \sim P_{zq} \cdot V \cdot h \cdot Fr^3. \quad (19)$$

В формулах (17)–(19) P_{zh} , P_{zv} и P_{zq} – эмпирические коэффициенты, определяющие высоту гряд, скорость перемещения гряд и расход влекомых наносов, соответственно.

В работе [13] соотношение (19) рассматривается как наиболее эффективное соотношение для оценки расхода влекомых наносов.

Необходимо подчеркнуть, что соотношение (16) может быть эффективным для оценки влекомых наносов как для грядового, так и безгрядового режима.

Взвешенные наносы. Исходя из схемы энергетики речного потока, предложенной А.Н. Колмогоровым [8], оценим транспортирующую концентрацию взвешенных наносов, используя число Колмогорова [2]

$$Ko \sim \frac{g \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right)}{\left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2}, \quad (20)$$

являющееся аналогом плотностного числа Ричардсона, характеризующее часть турбулентной энергии, идущей на поддержание наносов во взвешенном состоянии. Данная схема оценки транспортирующей способности руслового потока по отношению к взвешенным наносам, на основе анализа числа Колмогорова, использовалась в [11]. Здесь S – концентрация взвешенных наносов.

Учитывая, что

$$\frac{\partial S}{\partial z} \sim -\frac{\omega}{\chi \cdot k_{zz}} S, \quad (21)$$

$$\text{а } k_{zz}(z) \sim \frac{\omega \cdot S}{\chi \cdot V_* \cdot z},$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{V_*}{\chi \cdot z}, \quad (22)$$

где k_{zz} – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии;
 χ – постоянная Кармана.

Гидрология
Лепихин А.П., Возняк А.А.

Интегрируя соотношения (21, 22) в диапазоне $\Delta d \leq z \cdot H$ и учитывая, что $H/\Delta \gg 1$, в то же время $\frac{V_{cp}}{V_*} = \frac{C}{\sqrt{g}}$, $C \sim \sqrt{g} \ln(H/\Delta d)$, имеем

$$\overline{Ko} \approx \frac{V_{cp}^3 \cdot S}{g \cdot \omega \cdot h}$$

Соответственно, для оценки концентраций взвешенных наносов

$$S_{вз} \sim k_{вз} \cdot \frac{V_{cp}^3}{g \cdot \omega \cdot h} \quad (23)$$

Данное соотношение, как известно, очень широко используется для оценки транспортируемой концентрации взвешенных наносов [11; 14; 19] и др., соответственно, поток взвешенных наносов будет описываться соотношением

$$q_{вз} = V \cdot h \cdot \left(k_{вз} \cdot \frac{V^3}{g \cdot \omega \cdot h} \right), \quad (24)$$

а суммарный поток влекомых и взвешенных наносов

$$q_{\Sigma} = k_{вл} \cdot V \cdot h \cdot Fr^3 + V \cdot h \cdot k_{вз} \cdot \frac{V^3}{g \cdot \omega \cdot h} = V \cdot h \cdot Fr^3 \cdot \left(k_{вл} + k_{вз} \cdot \frac{(g \cdot h)^{1/2}}{\omega} \right). \quad (25)$$

Если взвешенные наносы достаточно крупные $d_{вз} / \left(\frac{g^{1/3}}{v^{2/3}} \right) > 1$, т.е. $d \geq 0.03-0.05 \cdot 10^{-3}$ м и поток имеет квадратичный режим сопротивления, в этом случае имеем

$$q_{\Sigma} = k_{вл} \cdot V \cdot h \cdot Fr^3 \cdot \left(1 + P_{\Sigma} \cdot \left(\frac{h}{d_{вз}} \right)^{1/2} \right), \quad (26)$$

где $P_{\Sigma} = \frac{k_{вз}}{k_{вл}}$.

Общий поток наносов. Характерным, наиболее типичным режимом любого водотока является режим, когда наблюдается устойчивость его русла.

При унимодальных распределениях размеров наносов должна быть существенно устойчивая зависимость между характерными размерами взвешенных и влекомых наносов $d_{вз} \sim k \cdot d_{вл}$, соответственно, $k \ll 1$, тогда нетрудно видеть, что при учете (1) имеем

$$Fr^3 \sim \frac{V^3}{(g \cdot h)^{3/2}} \sim \frac{V_*^3}{(g \cdot h)^{3/2}} \cdot \left(\frac{h}{d_{вл}} \right)^{3/6} \sim i^1. \quad (27)$$

С учетом (27) соотношение (26) для устойчивых русел будет выглядеть следующим образом:

$$q_{\Sigma} = k_{вл} \cdot V \cdot h \cdot i \cdot \left(1 + P_{\Sigma} \cdot i^{-1/2} \right). \quad (28)$$

Таким образом, расход влекомых наносов пропорционален гидравлическому уклону водотока i , а расход взвешенных наносов пропорционален \sqrt{i} , если $d_{вз} \sim \Delta$, в то же время, если $d_{вз} \sim d_{\Delta} \cdot i$, то нетрудно видеть, что поток $q_{вз} \sim i$.

Данные оценки имеют принципиально важное значение для анализа потоков наносов в реальных водотоках.

При этом необходимо понимать, что соотношение (23) не может быть корректно для достаточно малых размеров частиц. Данное соотношение корректно при $d_{вз} > \frac{g^{1/3}}{v^{2/3}} > \Delta_{вяз}$, где $\Delta_{вяз}$ – толщина вязкого подслоя (где $\Delta_{вяз} \sim 4 \cdot \nu / V_*$, при этом ν – кинематическая вязкость).

Сопоставим данные оценки с предлагаемым в [17] расчетным соотношением для оценки транспортирующей способности руслового потока

Гидрология
Лепихин А.П., Возняк А.А.

$$q_{\Sigma} = V \cdot h \cdot \left(\frac{C1}{h \cdot g} - (1-f) \cdot \rho \cdot i \right), \quad (29)$$

где f – коэффициент внутреннего трения, б/р; $C1$ – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²), остальные обозначения прежние.

Нетрудно видеть, что, если принять $(C1/h \cdot g) \sim 1$, а $f = \left(1 + P_{\Sigma} \cdot \left(\frac{h}{d_{63}} \right)^{1/2} \right)$, соотношения (28) и (29)

становятся тождественными, т.е. соотношение (29) может быть корректно для установившегося потока в стабильном русле.

Если принять в (29) $C1 \sim const$, а $f = 1$, то при выполнении условия (1) соотношение (29) становится тождественным известному в геоморфологии соотношению Lane [11]

$$q_s \cdot d_{63} \sim Q \cdot i. \quad (30)$$

В то же время, если принять в (29) $C1 = 0$, а $f \sim const$ при выполнении базового требования (1), то модель (29) будет тождественной модели Henderson [22]

$$q_s \cdot d^{3/2} = (q \cdot i)^2, \quad (31)$$

где $q = h \cdot v$ – удельный расход воды, построенной на основе сопряжения схемы переноса наносов Эйнштейна-Брауна с уравнением Маннинга – Штриклера.

Выводы

В настоящее время в оценке транспортирующей способности русловых потоков отчетливо проявляются два подхода, заложенные в речной гидравлике еще во второй половине XVIII в. работами А. Шези и П. Дюбуа. Сложность геометрии, широкий диапазон размеров транспортируемых наносов, необходимость учета влияния изменения морфометрии русла на гидродинамику водотока обуславливают применение все более сложных моделей, требующих значительных и очень значительных вычислительных ресурсов. В то же время для ориентировочных начальных оценок необходимо использование моделей с минимальным количеством определяющих параметров. Требование обеспечения стабильности русла при расчете транспорта наносов позволяет существенно снизить количество определяющих параметров. Наиболее известные простейшие модели транспорта наносов построены на основе данного принципа. Включение в расчетные соотношения дополнительных параметров в условиях их очень существенной пространственной и временной изменчивости обуславливает, в первую очередь, очень низкую их эффективность, констатируемую многими исследователями.

Таким образом, оба подхода (и А. Шези, и П. Дюбуа) могут достаточно эффективно применяться для решения задач расчета транспорта наносов. Применение того или иного подхода определяется характером решаемых задач, начальными и граничными условиями, а также объемом и точностью задания исходных данных.

Библиографический список

1. Алексюк А.И., Беликов В.В. Моделирование течений мелкой воды с областями обмеления и разрывами дна // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2017. Т. 57. № 2. С. 316–338.
2. Баренблатт Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке // Прикладная математика и механика, 1953. Т.17. №3. С. 261–274.
3. Горбачев П.Ф. Формулы скорости течения жидкости. М., Л.: ОНТИ. Гл. ред. строительной лит., 1936. 171 с.
4. Гришанин К.В. Динамика речных потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 428 с.
5. Католиков В.М. О статье «транспортирующая способность речного потока» // Ученые записки РГГМУ. 2019. №56. С.188–193.
6. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани. СПб.: Нестор-История, 2011. 504 с.
7. Колмогоров А.Н. О логарифмически-нормальном законе размеров частиц при дроблении // Доклады АН СССР. 1941. Т. 31. С.99–101.
8. Колмогоров А.Н. О новом варианте гравитационной теории движения взвешенных наносов // Вестник Моск. ун-та. 1954. № 3. С.41–45.
9. Королев В.Ю. О распределении размеров частиц при дроблении // Информатика и ее применения, 2009. Т.3. Вып.3. С.60–68.

Гидрология

Лепихин А.П., Возняк А.А.

10. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
11. Лепихин А.П., Капитанова Е.Н., Казаков А.Г. К методике расчета транспортирующей способности русловых потоков // Вопросы гидрологии и водной экологии Камских водохранилищ и их водосборов: межвуз. сб. науч. тр.. Пермь, 1985. С.111–118.
12. Лепихин А.П., Тиунов А.А. Современные гидродинамические модели русловых процессов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2019. №4. С.114–143.
13. Петровская О.А. Оптимизация методов расчета расхода донных наносов с учетом гидравлических параметров рек: автореф. диссертации канд. техн. наук. СПб.: Изд-во ГГИ, 2018. 26 с.
14. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 218 с.
15. Форхгеймер Ф. Гидравлика. М., Л.: ОНТИ, 1935. 615с.
16. Чоу В. Гидравлика открытых каналов. М.: Стройиздат, 1969. 462 с.
17. Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Транспортирующая способность речного потока // Ученые записки РГГМУ. 2019. №56. С.171–187.
18. Berger R.C., Tate J.N., Brown G.L., Savant G. Adaptive Hydraulics (AdH) Version 4.5 // Hydrodynamic User Manual. 2015 (January).
19. Bogardi J. Sediment transport in alluvial streams // Akadémiai Kiadó, Budapest. 1974. 826 p.
20. Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments User Manual January 12, 2011 Delft Deltares. 672 p.
21. Du Buat P.-L.-G. Principes d'hydraulique et de pyrodynamique / Paris, 1816.
22. Henderson, F. M. Open channel flow. McMillan. New York, 1966. 273 p.
23. Hickin, E.J. River Geomorphology: Chapter 4 Sediment Transport, 1995. 106 p.
24. Lane, E.W. "The importance of fluvial geomorphology in hydraulic engineering." Proc. ASCE, 1955. 81, Paper 745, P. 1–17.
25. Reference Manual "RiverFlow2D Two-Dimensional River Dynamics Model", August, 2016, Hydronia LLC.

References

1. Aleksyuk, A.I. and Belikov, V.V. (2017), "Simulation of shallow water flows with shoaling areas and bottom discontinuities", *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 57, no. 2, pp. 318–339. Doi: 10.1134/S09655425 17020026.
2. Barenblatt, G.I. (1953), "On the motion of suspended particles in a turbulent flow", *Prikladnaya Matematika i Mekhanika [Applied Mathematics and Mechanics (PMM)]*, vol. 17, no. 3, pp. 261–274. (In Russ.).
3. Gorbachev, P.F. (1936), *Formuly skorosti techeniya zhidkosti*, M., L.: ONTI. Gl. red. stroitel'noi lit, 171 p. (In Russ.).
4. Grishanin, K.V. (1969), *Dinamika rechnykh potokov [The dynamics of channel flows]*, L.: Gidrometeoizdat, 428 p. (In Russ.).
5. Katolikov, V.M. (2019), "About article "transporting capacity of the river flow", *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, no. 56, pp. 188–193. doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-188-193. (In Russ.).
6. Klaven, A.B. and Kopaliani, Z.D. (2011), *Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlichesкое моделиrovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsessa*, SPb.: Nestor-History, 504 p. (In Russ.).
7. Kolmogorov, A.N. (1941), O logarifmicheski-normal'nom zakone razmerov chastits pri droblenii, *Doklady AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, vol. 31, pp. 99–101. (In Russ.).
8. Kolmogorov, A.N. (1954), On a new version of the gravitational theory of suspended sediment movement, *Vestnik MGU [Moscow University Physics Bulletin]*, no. 3, pp. 41–45. (In Russ.).
9. Korolev, V.Yu. (2009), "On particle size distribution during crushing", *Informatika i ee primeneniya [Informatics and its application]*, vol. 3, no. 3, pp. 60–68. (In Russ.).
10. Cramer, H. (1975), *Matematicheskie metody statistiki [Mathematical methods of statistics]*, M.: Izd. Mir, 648p. (In Russ.).
11. Lepikhin, A.P., Kapitanova, E.N. and Kazakov, A.G. (1985), *K metodike rascheta transportiruyushchei sposobnosti ruslovykh potokov*, *Voprosy gidrologii i vodnoi ekologii Kamskikh vodokhranilishch i ikh vodosbrosov: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov*, Perm', pp. 111–118. (In Russ.).
12. Lepikhin, A.P. and Tiunov, A.A. (2019), "Modern Hydrodynamic Models of the Bed Processes", *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water Sector of Russia: problems, technologies, management]*, no. 4, pp. 114–143. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-4-6 (In Russ.).
13. Petrovskaya, O.A. (2018), *Optimizatsiya metodov rascheta rashoda donnykh nanosov s uchetom gidravlicheskikh parametrov rek*, Abstract of Ph.D. in Technology dissertation. GGI, SPb., 26p. (In Russ.).
14. Rossinskii, K.I. and Debol'skii, V.K. (1980), *Rechnye nanosy*, M.: Nauka, 218 p. (In Russ.).
15. Forkhgeimer, F. (1935), *Gidravlika*, M., L.: ONTI, 615 p. (In Russ.).
16. Chou, V. (1969), *Gidravlika otkrytykh kanalov*, M.: Stroizdat, 462 p. (In Russ.).

Гидрология

Лепихин А.П., Возняк А.А.

17. Shmakova, M.V. and Kondrat'ev, S.A. (2019), "Transporting capacity of river flow", *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, no. 56, pp. 171–187. Doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-176–187. (In Russ.).
18. Berger, R.C., Tate, J.N., Brown, G.L. and Savant, G. (2015), *Adaptive Hydraulics (AdH) Version 4.5, Hydrodynamic User Manual*.
19. Bogardi, J. (1974), *Sediment transport in alluvial streams*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 826 p.
20. Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments User Manual, (January 12, 2011), Delft Deltares, 672 p.
21. Du Buat, P.-L.-G. (1816), *Principes d'hydraulique et de pyrodynamique*, Paris.
22. Henderson, F. M. (1966), *Open channel flow*, McMillan, New York, 273 p.
23. Hickin, E.J. (1995), *River Geomorphology: Chapter 4 Sediment Transport*, 106p.
24. Lane, E.W. (1955), "The importance of fluvial geomorphology in hydraulic engineering", Proc. ASCE, 81, Paper 745, P. 1–17.
25. Reference Manual "RiverFlow2D Two-Dimensional River Dynamics Model", (August, 2016), Hydronia LLC.

Поступила в редакцию: 31.07.2020

Сведения об авторах**Анатолий Павлович Лепихин**

доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; директор, Камский филиал, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Россия, 614002, Пермь, ул. Николая Островского, 113; заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78А.

Анна Анатольевна Возняк

кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15; ведущий научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Камский филиал Россия, 614002, Пермь, ул. Николая Островского, 113; старший научный сотрудник лаборатории проблем гидрологии суши, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78А.

About the authors**Anatoly P. Lepikhin**

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia; Director of the Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources (Kama Branch); 113, Nikolaya Ostrovskogo st., Perm, 614002, Russia; Head of the Laboratory for Land Hydrology Problems, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) 78A, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia

e-mail: lepikhin49@mail.ru

Anna A. Wozniak

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia; Leading Researcher, Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources (Kama Branch); 113, Nikolaya Ostrovskogo st., Perm, 614002, Russia; Senior Researcher, Laboratory for Land Hydrology Problems, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) 78A, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia

e-mail: aavoznyak@gmail.com

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лепихин А.П., Возняк А.А. К проблеме оценки транспорта наносов // Географический вестник = Geographical bulletin. 2020. №4(55). С. 125–136. doi 10.17072/2079-7877-2020-4-125-136.

Please cite this article in English as:

Lepikhin, A.P., Wozniak, A.A. (2020). On the problem of sediment transport assessment. *Geographical bulletin*. No. 4(55). P. 125–136. doi 10.17072/2079-7877-2020-4-125-136.