

© 2012 г. Р.С. ЧАЛОВ

О РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДАХ К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЧНЫХ РУСЕЛ¹

Введение

Устойчивость речных русел отражает характер взаимодействия руслового потока и грунтов, слагающих берега и дно реки. Ее показатели характеризуют по существу сопротивляемость русла механическому воздействию потока. Морфологически различная устойчивость русел проявляется в интенсивности их переформирований. Устойчивое в динамическом смысле русло сохраняет в пределах протяженного участка в течение длительного времени свои основные размеры и положение на местности в условиях неизменности расхода наносов по длине реки [1, 2]. Нарушение баланса наносов – причина возникновения вертикальных русловых деформаций. Так как сток рек неравномерен во времени, а поток взаимодействует с горными породами и грунтами, различающимися по прочности, то баланс наносов постоянно нарушается как в пространстве, так и во времени. Одновременно осуществляются горизонтальные русловые деформации, проявляющиеся в смещении и постоянном изменении форм русла. К частым пространственно-временным изменениям отметок дна приводит смещение грядовых форм руслового рельефа. И то, и другое происходит с разной скоростью в зависимости от устойчивости русла. К такому же эффекту приводит неустойчивость движения водного потока и изменения его транспортирующей способности. Обобщая имеющиеся представления о механизмах выведения системы “поток-русло” из равновесия и его восстановления, Н.И. Алексеевский [2] определяет устойчивость как состояние во взаимодействии потока и русла, при котором между ними сбалансирован обмен наносами; если это состояние нарушено, то происходят переформирования русла, направленные на восстановление устойчивости системы. Так как на разных реках этот процесс протекает в разных пространственных и временных соотношениях, а в последнем случае может вообще не приводить к сбалансированному состоянию, то русла оказываются характеризующимися разной степенью устойчивости, неодинаковой не только на разных реках, но и на разных, в том числе смежных их участках.

Применяя различные показатели устойчивости русла, можно сравнивать реки и отдельные участки рек, отличающиеся по интенсивности развития русловых деформаций. При этом физически устойчивость русла оценивается как количественными характеристиками русловых деформаций (скоростью перемещения побочной перекатов, интенсивностью размыва берегов и т. д.), так и качественными описаниями, опирающимися на зависимость формы русла от степени его подвижности (при прочих равных условиях реки со слабоустойчивым руслом чаще разветвляются на рукава, у них отсутствуют типичные излуины; чем устойчивее русло, тем меньше вероятность формирования разветвлений русла и более крутых излуин).

Различные подходы к оценке устойчивости русла и их анализ

В русловедении понятие устойчивости русел было введено В.М. Лохтиным [3] и впоследствии стало широко использоваться благодаря работам, в первую очередь, Н.И. Маккавеева [4, 5] и его последователей.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-05-00221) и гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (проект НШ-3284.2010.5).

Словесные модификации этого термина довольно многочисленны – стабильность русел [6], (Н.И. Маккавеев [5], наверное, одним из первых назвал предложенный им показатель устойчивости русел коэффициентом стабильности), динамическая устойчивость русел [7], относительная устойчивость русел [8], временная устойчивость русел [1], как и встречающиеся термины-синонимы (например, подвижность русел [1]), но и противоположные по смыслу устойчивости (подвижные русла – неустойчивые русла). Такая терминологическая вариативность, а зачастую также критическое отношение к использованию различных показателей, характеризующих устойчивость русел как интегральных показателей интенсивности русловых деформаций, связано с тем, что в их основе лежат соотношения между силами, сопротивляющимися отрыву и сдвигу частиц грунта, выраженными через их крупность, и гидродинамическими силами, возникающими в потоке и стремящимися оторвать частицы от поверхности, которую они слагают. При этом подразумевается, что сопротивляются сдвигу и перемещению частиц также силы сцепления, трения, плотность грунта и т.д., а способствует им плотность наносонесущего потока, его турбулентные пульсации, вертикальный градиент скорости и другие свойства потока. Число Лохтина [5] как первый показатель

устойчивости русла $L = \frac{d}{H}$ (здесь d – средний диаметр частиц, мм; H – километрическое падение, м/км, или уклон I в ‰) получено из тех же соображений, что и формула неразмывающих скоростей потока. Опираясь на это, критики такого подхода [1, 6, 7, 9] считают, что он отражает только подвижность частиц (наносов) и, следовательно, свидетельствует об устойчивости не русла в целом, а лишь *частиц* руслообразующих наносов или донных отложений.

Если формально подходить к механизму процесса отрыва и перемещения частиц, то с таким мнением нельзя не согласиться. Но при определении числа Лохтина учитывается не крупность отдельных частиц, а средняя крупность всей совокупности руслообразующих наносов и грунтов на участке русла (а не в данной точке). Именно поэтому В.М. Лохтин при выводе своего показателя, получив сначала выражение

$L = \frac{d}{V^2}$, затем заменил в нем скорость потока V уклоном (километрическим падением) на этом же участке реки. Таким образом, речь идет не о подвижности частиц грунта (наносов), а именно об устойчивости русла в целом к воздействию потока. Вся совокупность руслообразующих наносов, создающих речные отложения, определяет условия их взаимодействия с потоком и, таким образом, саморегулирование системы “поток–русло”.

К такому же выводу пришел и Н.И. Алексеевский [2]; считая, что число Лохтина и его модификации отражают устойчивость отложений, он тем не менее подчеркнул, что в них осуществлен переход от анализа устойчивости отдельных частиц к устойчивости их совокупности на поверхности дна, т.е. устойчивости системы “поток–русло” на участке реки.

К.В. Гришанин [1], критикуя число Лохтина, говорил также о более совершенных и современных показателях устойчивости. обстоятельный их обзор и анализ, как и других показателей устойчивости, был сделан С.Г. Шатаевой [10], Р.С. Чаловым [11, 12], Н.А. Ржаницыным [13], К.М. Берковичем [14], В.Н. Михайловым [7]. Эти показатели, с точки зрения гидродинамики, физически более обоснованы и, что очень важно, являются безразмерными (в отличие от числа Лохтина). Но все они включают такие характеристики, как средняя скорость потока, касательные напряжения на дне, гидравлическую крупность донных частиц, динамическую скорость, которые могут быть соотнесены с отдельным створом (поперечным сечением реки) или даже вертикалью или требуют специальных расчетов. Поэтому в русловых исследованиях для оценки устойчивости русел рек они применяются очень редко.

Существует несколько модификаций числа Лохтина, приводящих его к безразмерному виду, сохраняющих его главные составляющие (средняя крупность наносов и средний уклон на участке русла). Таковы коэффициенты В.М. Маккавеева [6]

$$K_M = \frac{d}{hI},$$

Н.И. Маккавеева [5], названный им коэффициентом стабильности русла,

$$K_c = \frac{d}{Ib_p} \times 1000,$$

Се Дзинхена [16]

$$\Phi = \frac{d}{hI} \left(\frac{Q^{0.5}}{b_p I^{0.2}} \right)^2,$$

Н.А. Ржаницына [17]

$$K_p = \frac{db_p}{hI} \left(\frac{V_d}{V_{cp}^3} - 1 \right),$$

многие другие и, наконец, последний по времени появления – А.Г. Ободовского [18]

$$L_o = \frac{db_p}{Hh} A_{эp},$$

в которых b_p – средняя ширина русла, I – уклон, h – средняя глубина русла, V_d – придонная скорость потока, $A_{эp}$ – эрозионный коэффициент, представляющий собой коэффициент в уравнении связи $R = A_{эp} Q^m$, R – расход взвешенных наносов, Q – расход воды, m – показатель степени. Все эти показатели преследовали главную цель – уйти от размерности числа Лохтина. Но лишь в коэффициенте стабильности Н.И. Маккавеева K_c ширина русла b_p , которая отражает степень устойчивости русла (чем оно больше, тем меньше его ширина, и наоборот), введена в знаменатель; во всех остальных модификациях она находится в числителе, что противоречит фактической связи глубины русла с его устойчивостью (чем больше, тем больше); в то же время глубина потока, являющаяся фактором, препятствующим срыву частиц или его ограничивающим, помещена в знаменатель вместе с уклоном, а это искажает физический смысл самих показателей.

Однако во всех подобных модификациях числа Лохтина и ширина русла, и глубина, и соотношение b/h являются функциями размера реки и, следовательно, их введение в структуру показателя не лишает его масштабного искажения.

Введение в показатели ширины b_p русла или соотношения b_p/h определяется разной крутизной связи расходов воды и уровней на реках с широким, неустойчивым, постоянно и активно переформирующимся руслом или узким, относительно устойчивым руслом. Эту особенность использовал Х.М. Полин [19], предложивший “коэффициент плеса”

$$K_n = \frac{100 \left(4 \times \frac{Q_M}{Q'_M} + \Delta z \right)}{Q'_{cp}}$$

где Q_M – расход воды в течение двух маловодных месяцев в безледный период, Q'_M – производная расхода воды по уровню для межени, Q'_{cp} – производная расхода воды по уровню в пределах годовой амплитуды уровней Δz . Эту закономерность использовала С.Г. Шатаева [10], предложившая морфометрический показатель устойчивости

$$A = \frac{\lg \Delta h}{\lg \Delta b_p},$$

представляющий собой отношение приращения глубины потока Δh при изменении его ширины Δb_p . Он применяется для оценки устойчивости перекатов и плесов на судоходных реках на основе регулярно получаемых от изыскательских партий на водных путях планов русла. С.Г. Шатаева предложила также “технический” вариант показателя $A_{\text{тех}}$, позволяющий определять необходимые объемы дноуглубительных работ на перекатах для обеспечения нормальных условий судоходства.

Иной подход к модификации числа Лохтина предложил Г.В. Бастраков [20]. Разработанный им показатель устойчивости русла

$$P_p = \frac{3 \times 10^{-4} R_c (\Delta h)^{0.5}}{\delta \rho V I Q}$$

включает в себя h – глубину потока в числителе (это принципиальное отличие от всех упомянутых ранее модификаций), R_c – сопротивляемость размыву, Δ – высоту выступов шероховатости, δ – коэффициент сдвигающей силы, ρ – плотность воды, V – среднюю скорость потока и Q – расход воды. При этом сопротивляемость размыву определяется для отобранных проб (образцов) донного и берегового грунта. Формула Г.В. Бастракова упрощена Е.А. Смирновой [8]

$$K_u = \frac{R_c}{Q_{\text{ср.макс}}}$$

и успешно апробирована для оценки устойчивости русла р. Десны в пределах Брянской области. Особенностью этого показателя является комплексный учет как руслообразующих наносов (отложений), так и грунтов, слагающих берега (аллювий поймы, террас и т.д.).

Гидроморфометрические зависимости и устойчивость русла

Исходя из посылки для критики (крупность отдельных частиц; уклон, определенный для короткого отрезка русла, на порядки величин больший, чем диаметр частиц наносов) оппоненты подхода Лохтина–Маккавеева к оценке устойчивости русла, противопоставляют ему оценку по гидролого-морфологическим или по гидроморфометрическим зависимостям, связывающим параметры поперечного сечения русла с гидравлическими характеристиками потока. Вполне определенные соотношения между шириной b_p , глубиной h , b_p/h и т.д., с одной стороны, и водностью потока, с другой, вырабатываются в ходе многолетнего (векового) взаимодействия потока и русла. В зависимости от фазы водного режима они изменяются. Поэтому многие из них связывают глубину и ширину русел с протекающим (наблюдаемым сейчас) и среднемноголетним расходом воды [21]; наиболее полно такой подход к оценке зависимости показателей поперечного сечения русла от водности потока был развит В.Е. Сергутиным [22].

Гидроморфологические зависимости не отражают происходящих переформирований русел, фиксируя некое осредненное во времени соотношение между ними. Кроме того, эти зависимости обычно соотносятся с прямолинейными плесовыми участками русла, как правило, наиболее устойчивыми. Поэтому гидроморфологический подход не может противопоставляться показателям, в интегральном виде отражающим интенсивность русловых деформаций. Оба подхода выполняют свои функции и не только не противоречат друг другу (или служат альтернативой), сколько взаимно дополняют, обеспечивая комплексный подход, с одной стороны, к общей оценке устойчивости русел по интенсивности русловых деформаций, а, с другой, к определению соответствующих соотношений между основными морфометрическими характеристиками русел при данных условиях их формирования – водности, устойчивости и т.д. Первый случай соответствует общему оценочному и прогностическому состоянию русла при изменении определяющих факторов, позволяет дать характеристику потенциальной опасности русловых деформаций и связанной с ней экологической напряженности

при освоении рек, их водных, земельных и минеральных ресурсов. Во втором случае относительно устойчивые гидроморфометрические зависимости между основными морфометрическими характеристиками русла при данной водности рек используются в инженерных расчетах при определении оптимальных соотношений, как правило, на прямых отрезках русла. Именно поэтому они лежат в основе расчетов русел самотечных каналов.

Наиболее известными гидроморфологическими зависимостями, отражающими устойчивые соотношения между морфометрическими и гидравлическими характеристиками русла и поймы являются зависимости М.А. Великанова [23]

$$\frac{b_p}{d} = A_1 \left(\frac{Q}{d^2 \sqrt{g d l}} \right)^{x_1} \quad \text{и} \quad \frac{h}{d} = A_2 \left(\frac{Q}{d^2 \sqrt{g d l}} \right)^{x_2},$$

К.В. Гришанина [1]

$$\text{const} = M = \frac{h(g b_p)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{Q}},$$

И.Ф. Карасёва [24]

$$\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda},$$

где коэффициенты A и x имеют региональный смысл, $\lambda = \frac{2g}{C^2}$ – гидравлические сопротивления, C – коэффициент Шези. Квазиустойчивое соотношение в показателе К.В. Гришанина соответствует условию $0.75 < M < 1.05$; в соответствии с показателем И.Ф. Карасёва при $\Theta < 4.5$ русловой поток имеет вид компактной струи, при $\Theta > 9.5$ он распадается на ряд динамических осей, а при $4.5 < \Theta < 9.5$ характеризуется широкой стрежневой зоной, не имеющей выраженной оси. Эти и другие показатели позволяют оценивать возможные изменения поперечного сечения русла, его ширины и глубины в соответствии с изменяющимися активными факторами русловых процессов, в том числе устойчивостью русла. Они незаменимы в инженерных расчетах при регулировании русел, стеснении потока выправительными сооружениями.

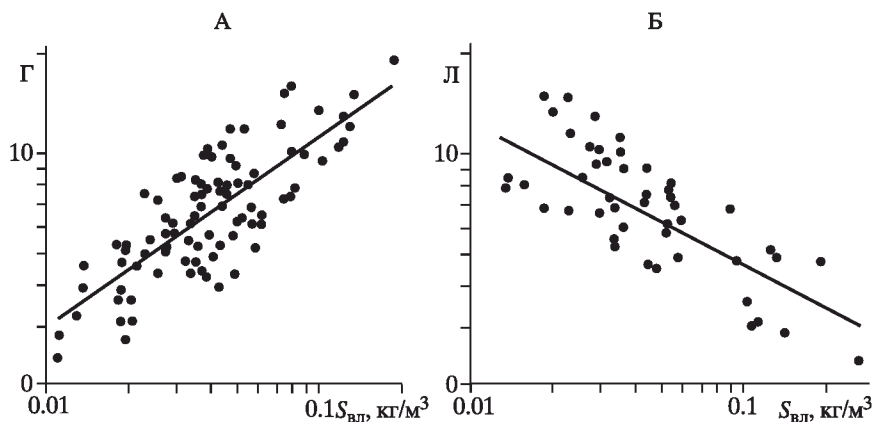
Устойчивость русла, гидроморфометрические зависимости и русловые деформации

Объективность оценки устойчивости русла с помощью интегральных показателей в соответствии с подходом В.М. Лохтина–Н.И. Маккавеева подтверждается многочисленными исследованиями, установившими тесные связи между ними и фактическими показателями интенсивности русловых деформаций – скоростями смещения побочней и перекатов C_n , скоростями размыва берегов U_6 , а также степенью разветвленности русла n_0/l (количество островов n_0 на участке русла длиной l), радиусами кривизны русла и рукавов r и т. д.) Первую такую связь получил Н.И. Маккавеев [4]

$$C_n = 0.05 \frac{Q_\Phi}{L},$$

где Q_Φ – руслоформирующий расход воды. К.М. Беркович и Л.В. Злотина [14] установили достаточно тесные зависимости скорости смещения побочней и осередков C_n и размыва берегов U_6 от коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева K_c :

$$C_n = 115.6 K_c^{-0.97} \quad \text{и} \quad U_6 = 15.6 K_c^{-0.65},$$



Зависимости морфометрического параметра Глушкова (А) и числа Лохтина (Б) от удельной концентрации влекомых наносов $S_{вд}$ (кг/м³)

для которых коэффициент корреляции составил 0.9 и 0.74 (в последнем случае меньшее значение связано, очевидно, с большей неоднородностью отложений, слагающих берега рек). По А.Г. Ободовскому [18], связь предложенного им показателя L_0 со скоростями размыва берегов описывается выражением $L_0 = 7.66U_6 - 3.7$ для условий широкопойменных русел и $L_0 = 12.4 - 3.99U_6$ – для врезанных русел.

Степень разветвленности русла и радиусы кривизны излучин находятся в обратной зависимости от устойчивости русла

$$\frac{n_0}{l} = aK_c^{-n}, \quad r = aK_c^{-n}$$

дифференцируясь по типам разветвлений и степени развитости излучин [12], а также величины стока влекомых наносов, особенностей водного режима и водоносности рек.

Необходимо отметить, что показатели устойчивости русла (число Лохтина Л, коэффициент стабильности русла Н.И. Маккавеева K_c и др.) достаточно тесно связаны с гидроморфометрическими характеристиками, хотя форма связи между ними довольно сложная, отражающая лишь общую тенденцию и не всегда совпадающую по изменению величин [14]. Причины этого разнообразны. Например, один из первых морфометрических показателей – параметр В.Г. Глушкова [25]

$$A_\Gamma = \frac{\sqrt{b_p}}{h},$$

где A_Γ по мнению автора, зависит от противоэрозионной устойчивости грунта (для скальных пород он равен 1.4, для легко размываемых – растет до 5.5), увеличивается с ростом среднегодовой концентрации влекомых наносов $S_{вд}$ (кг/м) (рис. А), тогда как ее связь с числом Лохтина обратная (рис. Б) [26]. В общем, чем более устойчиво русло, тем больше глубина и меньше ширина и соотношение b_n/l , и наоборот.

Однако это не означает, что гидроморфометрические зависимости характеризуют устойчивость русла. Они отражают лишь оптимальную для данных условий, в т.ч. устойчивости русла, форму живого сечения потока. Поэтому их нельзя (или некорректно) использовать для выявления связей с размывами берегов или скоростями смещения побочной перекатов.

В многолетнем плане устойчивость русла и гидроморфометрические зависимости подвержены определенным изменениям, обусловленным естественными и антропогенными изменениями стока воды и наносов [12, 14], отражая связь между этими

Оценка опасности русловых процессов и связанной с ней экологической напряженности по показателям устойчивости русла

Число Лохтина, Л	Коэффициент стабильности, K_c	Опасность русловых процессов	Экологическая напряженность	Баллы
<1	<2	очень высокая (катастрофическая)	кризисная	5
1–2.5	2–4	высокая	кризисная	4
2.5–5	4–15	повышенная	предкризисная	3
5–10	15–20	умеренная	первичные признаки	2
10–50	20–100	слабая	первичные признаки	1
> 50	>100	отсутствует	отсутствует	0

двумя подходами к характеристикам морфологии русла и интенсивности его переформирования.

Гидроморфометрические зависимости также нельзя использовать для оценки опасности проявлений русловых процессов или связанной с ней экологической напряженности. В то же время, если устойчивость русел определять по числу Лохтина, коэффициенту стабильности Н.И. Маккавеева или другим подобным показателям (таблица), то их определенные интервалы, будучи сопоставимы со скоростями размыва берегов или обмеления акваторий, смещением побочной перекатов, развитием или отмиранием берегов и другими показателями русловых деформаций, можно выразить в баллах интегральной оценки или экологической напряженности.

Заключение

Показатели устойчивости русла и гидроморфометрические зависимости взаимно дополняют друг друга, их противопоставление неправомерно. Используются они для разных целей. Первые обычно применяют при анализе русловых процессов и установлении общих закономерностей формирования русел [4]; вторые – в инженерных расчетах при проектировании самотечных каналов, гидротехнических сооружений на реках, спрямляющих излуины прорезей и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришанин К.В. Устойчивость русел рек и каналов. Л.: Госфизматиздат, 1974. 144 с.
2. Алексеевский Н. И. Проблема устойчивости в теории русловых процессов // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 5. М.: Макс-пресс, 2010. С. 27–40.
3. Лохтин В.М. О механизме речного русла // Вопр. гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 23–59.
4. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
5. Проектирование судовых ходов на свободных реках / Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. 1964. 262 с.
6. Беркович К.М. Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов. М.: ГЕОС, 2001. 164 с.
7. Михайлов В.Н. Гидролого-морфометрические характеристики динамически устойчивого русла // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 5. М.: Макспресс, 2010. С. 330–352.
8. Смирнова В.А. Сопротивление размыву грунтов и горизонтальные деформации русла р. Десны (в среднем течении): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Казань: КазГУ, 2009. 20 с.
9. Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Госфизматиздат, 1958. 395 с.
10. Шатаева С.Г. Определение объемов дноуглубительных работ с помощью показателя устойчивости русла // Тр. ЦНИИЭВТ. 1969. Вып. 68. С. 84–121.
11. Чалов Р.С. Показатели устойчивости русел, их использование для оценки интенсивности русловых деформаций и пути совершенствования // Динамика русловых потоков. Л.: Изд-во ЛПИ, 1983. С. 46–53.

12. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
13. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.
14. Беркович К.М., Злотина Л.В. Расчет стабильности речных русел в условиях антропогенной нагрузки // География и природные ресурсы. 2003. № 4. С. 117–123.
15. Маккавеев В.М. Некоторые теоретические задачи динамики открытых потоков // Тр. ГГИ. 1948. Вып. 8 (62). С. 5–26.
16. Sedimentation research in China. Beijing: China water and power press, 1993. 250 p.
17. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 240 с.
18. Ободовський О.Г. Гідролого-екологічна оцінка руслових процесів (на приклад річок України). Київ: Ніка-Центр, 2001. 276 с.
19. Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат. 1949. 202 с.
20. Бастраков Г.В., Шарапаев И.В. Анализ устойчивости русла р. Десны в черте г. Брянска // XV пленарное межвуз. совещ. по пробл. эрозийных, русловых и устьевых процессов. Волгоград–М.: 2000. С. 64–65.
21. Рыбкин С.И. Морфометрическая классификация рек // Метеорология и гидрология. 1947. С. 25–29.
22. Сергутин В.Е., Радюк А.Л. О морфометрии русел и сечении каналов. Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1984. 152 с.
23. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Т. 2. Наносы и русло. М.: Гостехиздат, 1955. 324 с.
24. Глушков В.Г. Морфология речного русла // Тр. I Всесоюз. гидрол. съезда. Л.: 1935. С. 286–290.
25. Карасёв И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
26. Резников П.Н. Сток наносов и его проявление в морфодинамике речных русел: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2007. 23 с.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
06.09.2011

DIFFERENT APPROACHES TO EVALUATION OF RIVER BED STABILITY

R.S. CHALOV

Summary

Different approaches to evaluation of river bed stability are analyzed. It is shown that indexes like Lokhtin number, coefficient of riverbed stability by N.I. Makkaveev, and their modifications allow to reveal general features of riverbed formation and to characterize in generalized form the gradation of bed deformations and hazardous processes. Hydromorphometric relations are indicative of cross-section shape and depend on riverbed stability, but can not be used as its index; they are applied in hydrotechnical engineering calculations.