

(with reference to the Pamir — Tien-Shan boundary)

S. A. BULANOV

Summary

Erosional dissection of mountain ridges between the Pamir and Tien-Shan had been profoundly influenced by folding process within the upper 10 km of the sedimentary mantle, displaced and deformed by the tangential pressure of the Indostan plate. As the uplift proceeds, folding processes continue, and valley floors do not keep pace with ridges. At early stages fluvial processes contribute to the relative heights increase, but later they cannot remove all the debris and the latter accumulates in valleys. The balance between the input from slopes and removal by streams is achieved after glaciers formation. Increase in slope angle and valley depth results in development of an optimum cross-profile of the range, usually with narrow crest and rather steep slopes.

УДК 551.435.11

© 1993 г. А. А. ДАРБУТАС

УСТОЙЧИВОСТЬ РУСЛА Р. НЕМАН

Устойчивость речного русла, подверженного динамическому воздействию потока, зависит от многих факторов, учесть которые количественно в настоящее время практически невозможно, поэтому при решении этой задачи допускаются определенные упрощения. В основу критерия устойчивости речного русла положено известное соотношение между силой сопротивления частицы, лежащей на дне потока, и силой лобового давления на нее. Исходя из этого, критерий устойчивости речного русла примет вид $V = K \sqrt{d}$, где K — постоянный множитель, d — диаметр частиц, V — скорость течения в придонном слое. Из уравнения видно, что устойчивость русла увеличивается с возрастанием крупности частиц, слагающих русло реки, и резко уменьшается с увеличением скорости течения.

В. М. Лохтин [1] предложил критерий устойчивости в виде

$$L = d/H,$$

где d — средний диаметр частиц, слагающих ложе потока, мм; H — среднее падение реки, м/км. Величина H (численно равная среднему уклону, в ‰) пропорциональна квадрату скорости (согласно формуле Шези). Существует ряд модификаций числа Лохтина, выполненных с целью усиления физической его сущности, приведения к безразмерному виду и т. д. (М. А. Великанова, В. М. Маккавеева и др.), а также ряд других подходов — морфометрический (С. Г. Шатаева), гидравлический (В. С. Лапшенков) и др. обстоятельный обзор существующих подходов неоднократно выполнялся при обосновании либо нового показателя, либо модификации и уточнения имеющихся. Наиболее полные принадлежат С. Г. Шатаевой [2] и В. И. Антроповскому [3]. Со времени этих обзоров были предложены три новых показателя: К. В. Гришанина [4],

$$M = h(gB)^{1/4}/\sqrt{Q},$$

представляющий собой по существу гидроморфологическую зависимость для устойчивых плесовых прямолинейных участков и позволяющий оценить направленность вертикальных деформаций (размыв или аккумуляция) по неравенству $0,75 \leq M \leq 1,05$; Я. И. Каганова [5] для оценки направленности русловых деформаций на горных реках; В. С. Лапшенкова [6]

$$\sigma_v = \frac{V_p}{V_6},$$

представляющего собой отношение размывающей скорости для донных наносов к фактической бытовой.

Наиболее обоснованная модификация числа Лохтина принадлежит Н. И. Маккавееву [7], который назвал ее коэффициентом стабильности русла

$$K_c = d \cdot 1000 / IB,$$

где d — средний поперечник наносов, мм; B — ширина русла, м; I — уклон, ‰.

Поскольку ширина русла — функция величины реки (ее водности), то этот коэффициент так же, как и число Лохтина, сохраняет зависимость от величины реки, т. е. испытывает масштабное искажение. Отсюда естественны попытки исследователей устранить этот недостаток путем введения поправки на расход [8], либо предложений региональных схем классификации по устойчивости русел [9].

Для оценки степени устойчивости русла Немана нами использовались число Лохтина и коэффициент стабильности русла Н. И. Маккавеева, в первую очередь в связи с обеспеченностью соответствующим материалом (табл. 1).

От слияния Уссы с Лошей до устья Шары (верхнее течение) средние значения коэффициента стабильности K_c и числа Лохтина уменьшаются вниз по течению. Выше устья Березины максимальные значения $L = 3,8$ и $K_c = 117$ зафиксированы лишь в районе прорыва крутой излучины у д. Делятичи и на относительно прямолинейном участке выше узла слияния Немана с Березиной — $L = 4,7$; $K_c = 135$. Увеличение здесь L и K_c связано с местным уменьшением уклона, тогда как средний поперечник донных наносов изменяется мало; по-видимому, сказывается также влияние подпорных явлений у устья Березины.

Ниже устья Березины коэффициент стабильности и число Лохтина до устья Дитвы колеблются в незначительных пределах: $K_c = 52,1$, $L = 3,8$ ниже узла слияния Немана с Березиной, $K_c = 53,6$, $L = 4,1$ у д. Ляховичи. Ниже Николаевского сужения увеличиваются уклоны, и поэтому у с. Морино число Лохтина уменьшается в среднем до 1,6 ($K_c = 15,4$), на прямолинейном участке — до 0,9 ($K_c = 11$), а на крутой излучине ниже д. Бурносы — $L = 1,0$; $K_c = 8,8$. Ниже по течению до устья Шары на относительно прямолинейных участках число Лохтина стабильно и равно 2,1; коэффициент стабильности русла колеблется в пределах 13,3—18,1. На участках свободного меандрирования значения показателей L вниз по течению увеличиваются от $L = 0,9$ у д. Белицы до $L = 2,7$ у прорыва выше устья Шары; в то же время величина K_c испытывает тенденцию к уменьшению (соответственно от 23 до 18), что связано с увеличением ширины русла вниз по течению. На этом же участке в местах разветвлений на рукава значения числа Лохтина составляют $L = 3—3,5$, коэффициента стабильности $K_c = 22,4—24,6$. При этом в протоках возле небольших островов выше устья Молчади (7 км) и в 11 км выше устья Шары K_c увеличивается до 150; в этих протоках диаметр частиц наносов существенно больше, чем в основном русле.

Если на верхнем Немане до устья Шары в русле преобладают среднезернистые пески, то ниже впадения Шары до впадения Котры — крупнозернистые. Особенно отчетливо увеличение крупности наносов прослеживается в сужениях долины. Однако, что касается устойчивости русла, влияние изменения крупности наносов нейтрализуется местным увеличением уклонов, вследствие чего значения показателей изменяются мало: в сужениях долины на прямолинейных участках $L = 2,5$, $K_c = 15,6$, в расширениях на относительно прямолинейных отрезках $L = 2,3$, $K_c = 14,4$, на свободно меандрирующих отрезках $L = 3—3,2$, $K_c = 19,4$. В целом в верхнем течении Немана (на участке устье Березины — устье Шары) значения числа Лохтина меняются сравнительно мало (рис. 1) и в основном составляют величину немногим больше 2 (максимальные значения 4,1), лишь на двух сравнительно коротких отрезках (с. Морино и д. Бурносы) они падают до 0,9—1,0. В то же время величина коэффициента стабильности K_c колеблется в широких пределах от 18 до 150, что является отражением изменчивости ширины русла, и, по-видимому, свидетельствует о большей чувствительности показателя K_c по сравнению с L к изменению условий руслоформирования.

Таблица 1

Устойчивость русла Немана с учетом типа русла (средние значения показателей по участкам)

Участок реки	Число Лохти-на (Л), коэф-фициент ста-бильности (Кс)	Широкопойменное				Врезанное			
		меандрирующее			разветвлен-ное	относитель-но прямоли-нейное	извилистое	разветвлен-ное	прямоли-нейное
		вынужден-ное	адаптиро-ванное	свободное					
Слияние Уссы и Лоши — устье Березины	Л	—	—	3,5	—	3,7	—	—	—
	Кс	—	—	71	—	92,5	—	—	—
Устье Березины — устье Дитвы	Л	—	—	2,5	—	2,3	—	—	—
	Кс	—	—	27,8	—	25,9	—	—	—
Устье Дитвы — устье Шары	Л	1,1	—	2,4	3,0	2,1	—	—	—
	Кс	12,2	—	18,5	24,6	16,2	—	—	—
Устье Шары — устье Котры	Л	—	4,9	3,1	—	2,3	2,1	—	2,5
	Кс	—	30,6	19,4	—	14,4	12,3	—	15,6
Устье Котры — устье Гожки	Л	—	—	—	—	—	12,1	—	11
	Кс	—	—	—	—	—	65	—	106
Устье Гожки — устье Мяркис	Л	—	—	—	8,2	6,6	11	—	7,2
	Кс	—	—	—	64	35	43	—	45
Устье Мяркис — устье Пуняле	Л	—	—	—	—	—	6,7	—	6,5
	Кс	—	—	—	—	—	58	—	52
Устье Пуняле — устье Дробинги	Л	—	—	—	—	—	2,5	—	2,5
	Кс	—	—	—	—	—	19,9	—	18,1
ГЭС — устье Нярис	Л	—	—	—	—	—	11,0	—	—
	Кс	—	—	—	—	—	53,6	—	—
Устье Нярис — устье Тильжале	Л	—	2,67	—	—	—	—	—	—
	Кс	—	12,97	—	—	—	—	—	—
Устье Тильжале — Куршский залив	Л	—	—	3,0	—	2,7	—	—	—
	Кс	—	—	9,2	—	13,3	—	—	—

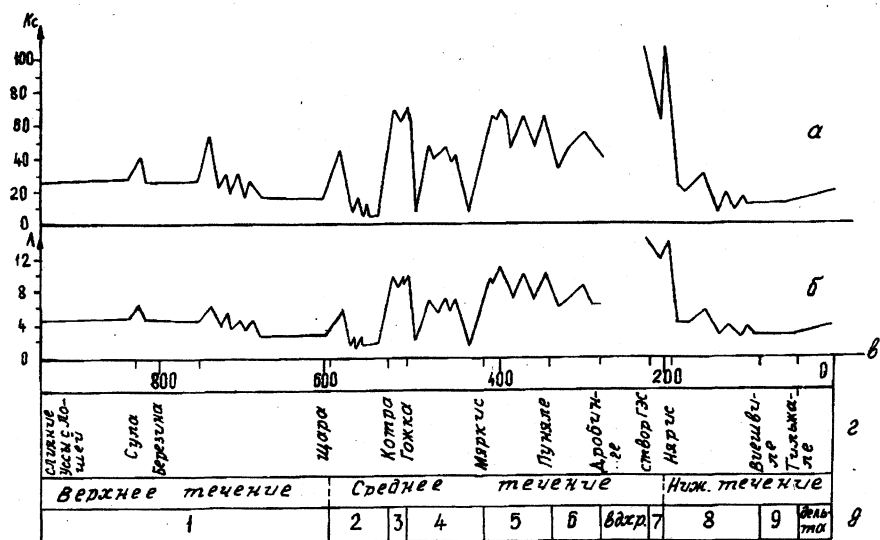


Рис. 1. Изменение показателей устойчивости по длине р. Неман
 а — коэффициент стабильности (K_c); б — число Лохтина (L); в — расстояние от устья Немана (км); г — притоки Немана, разделяющие реку на характерные участки; д — номера участков

Ниже впадения Котры с увеличением скорости потока и крупности руслообразующих наносов от 2,42 до 100 мм и более (здесь преобладает гравелисто-песчаный и галечно-валунный материал) число Лохтина L возрастает до 11–12, а K_c до 65 и больше. На отдельных отрезках (выше д. Пышки, ниже устья Лососны, в районе д. Меловые Горы и д. Бальня Сольная), где поперечник донных наносов $d = 10$ мм, число Лохтина L достигает 20, а коэффициент стабильности K_c — 106 (у врезанного прямолинейного русла). Аналогичную величину получил на Немане В. М. Лохтин [5]. Согласно его данным, у г. Гродно средний поперечник наносов $d = 7,0$ мм, среднее падение соответствующего участка р. Неман $H = 0,1535$ м/км, число Лохтина $L = 22,5$. Ниже впадения Гожки до устья Мяркис в расширениях долины происходит отложение наносов, которые через Гродненское сужение проходят транзитом. Поэтому здесь вновь снижаются значения показателей устойчивости — $L = 6,6$, $K_c = 35$ относительно значений в сужениях — $L = 11$, $K_c = 65$ –100. Однако они выше в 2–3 раза как по числу Лохтина, так и по коэффициенту стабильности по сравнению с участком широкопойменного русла верхнего Немана.

Ниже устья Мяркис число Лохтина на Немане колеблется от 1,65 до 9,7, а коэффициент стабильности K_c — от 8,7 до 52. Малые значения показателей приурочены к участку от устья Стасуписа до д. Дубравай, где распространены среднезернистые пески. На остальных участках Немана (выше Каунасского водохранилища), где преобладают гравелистые пески, средние значения показателей устойчивости колеблются в пределах: L — от 6,5 до 9,7, K_c — от 52 до 84.

Непосредственно ниже ГЭС, где в русле преобладают крупнозернистые и гравелистые грунты, средние значения числа Лохтина изменяются от 11 до 14,2, коэффициент стабильности K_c — от 54 до 69. В нижнем течении Немана (от устья Нярис до разветвления на рукава в дельте) средние значения числа Лохтина колеблются от 1,1 до 5, а коэффициент стабильности K_c от 4,5 до 31,0. Максимальные значения показатели устойчивости достигают в районе пос. Велены — $L = 12$; $K_c = 33,6$, где местами диаметр средневзвешенных наносов достигает 1,2–1,5 мм. Ниже устья Тильжале от истока рукава Матросовки по длине основного рукава Немана идет уменьшение крупности наносов и уклонов. Здесь средние значения $L = 2,5$ –3,6; $K_c = 7,67$ –24,7.

В целом по длине Немана изменения показателей устойчивости повторяют изменения руслообразующих наносов по крупности. При этом отчетливо выделя-

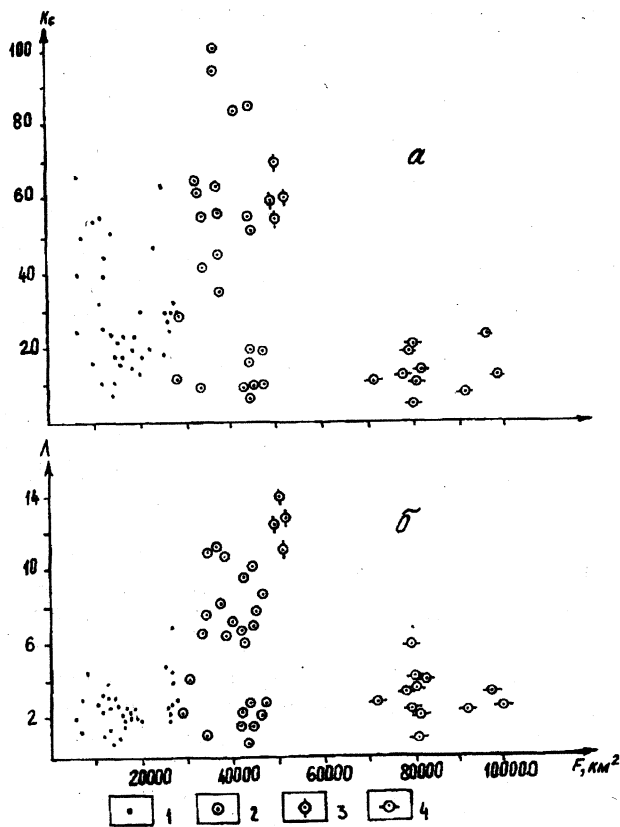


Рис. 2. Связь показателей устойчивости с площадью бассейна р. Неман (F)

a — коэффициент стабильности (K_c); $б$ — число Лохтина ($Л$). 1 — устье Уссы и Лоши — устье Котры; 2 — устье Котры — водохранилище; 3 — ГЭС — устье Нярис; 4 — устье Нярис — Куршский залив

ются участки верхнего течения (низкие значения показателей) среднего течения (повышенные значения показателей и колебания в сужениях и расширениях dna долины), приплотинный участок (высокие показатели за счет размыва русла) и нижнее течение (низкие значения показателей) (рис. 1). При этом изменение коэффициента K_c более сложно благодаря влиянию на его величину ширины русла.

Исследование зависимости числа Лохтина ($Л$) и коэффициента стабильности (K_c) от размеров реки, в качестве показателя которого принята площадь бассейна, обнаруживает отсутствие связи между этими параметрами. На графиках связи (рис. 2) четко выделяется участок среднего течения с повышенными значениями обоих показателей устойчивости, что обусловлено геолого-геоморфологическими условиями формирования русла (река здесь пересекает Гродненскую возвышенность и Балтийскую гряду). Поэтому для условий Немана не требуется введения поправок на расход при сравнительной оценке устойчивости русла на разных участках реки. Это дает возможность разработать единую классификацию его русла по степени устойчивости.

Между обоими показателями установлена прямая пропорциональная зависимость для нижней огибающей поля точек, которая дифференцируется по трем участкам, соответствующим верхнему, среднему и нижнему течению. Зависимости описываются уравнениями вида $K_c = \alpha Л$, где $\alpha = 20$ — для верхнего Немана, $\alpha = 10$ — для среднего и $\alpha = 5$ для нижнего Немана (рис. 3).

Как известно, отражением степени устойчивости русла является его ширина: чем меньше она, тем интенсивнее размываются берега реки и шире становится русло. Именно поэтому Н. И. Маккавеев, модифицируя число Лохтина ($Л$), ввел в знамена-

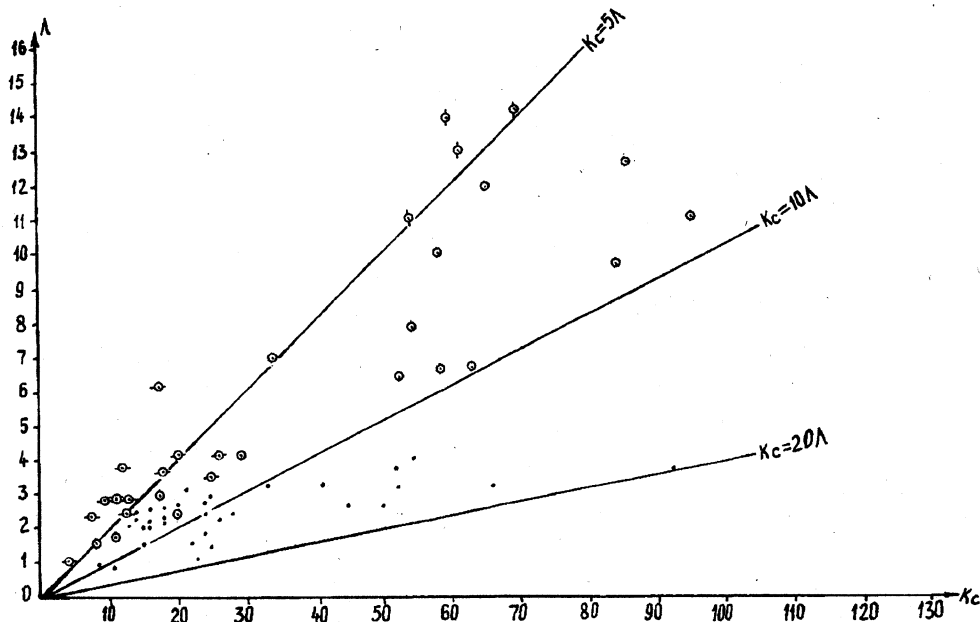


Рис. 3. Связь числа Лохтина (Λ) с коэффициентом стабильности (K_c)
Условные обозначения см. рис. 2

тель ширину русла. Однако на нее помимо устойчивости влияют многие факторы: морфодинамический тип русла, элементы формы русла (например, вершина излучины или ее крыло), условия прохождения руслоформирующих расходов (в том числе в сужениях и расширениях поймы), наличие коренных берегов, развитость перекатов и т. д. Поэтому связь между шириной русла и показателями устойчивости оказывается достаточно сложной (рис. 4). Она дифференцируется как по длине реки, так и в зависимости от типа русла и условий его формирования. Кривые связи на графиках располагаются слева направо в следующей последовательности: 1 — верхнее течение выше устья Березины, широкопойменное русло; 2 — верхнее течение между устьями Березины и Шары, отдельные расширения в среднем течении, широкопойменное русло; 3 — нижнее течение, адаптированное и широкопойменное русло; 4 и 5 — среднее течение, врезанное русло; 6 — приплотинный участок.

По значению показателя Лапшенкова русло Немана также подразделяется на три участка, соответствующие верхнему, среднему и нижнему течению. Они характеризуются песчаными, гравийно-галечными и снова песчаными наносами, а также преимущественным распространением широкопойменного, врезанного и адаптированного с элементами широкопойменного русла. В верхнем течении для меженных условий σ , колеблется в пределах 0,62—0,90, в среднем течении на многих участках он превышает 1,0 и достигает 1,5, в нижнем течении σ , в межень имеет наименьшие значения и достигает величины 0,48. Таким образом, в меженный период русло Немана в среднем течении устойчивое, практически недеформируемое. На остальных участках, а также в расширениях в среднем течении деформации не затухают даже в межень и по сезонам года меняется только их интенсивность. Это совпадает в целом по длине реки с изменениями числа Лохтина и коэффициента стабильности K_c . Вместе с тем связь между этими показателями и показателем Лапшенкова для каждого створа реки (более 50 точек) отсутствует.

Сравнение величин Λ и K_c с характером проявления и интенсивности русловых деформаций (например, со средней скоростью размыва берегов), а также анализ связей между этими показателями и зависимости ширины русла от них позволяет предложить классификацию участков русла Немана по степени устойчивости, придавая каждому

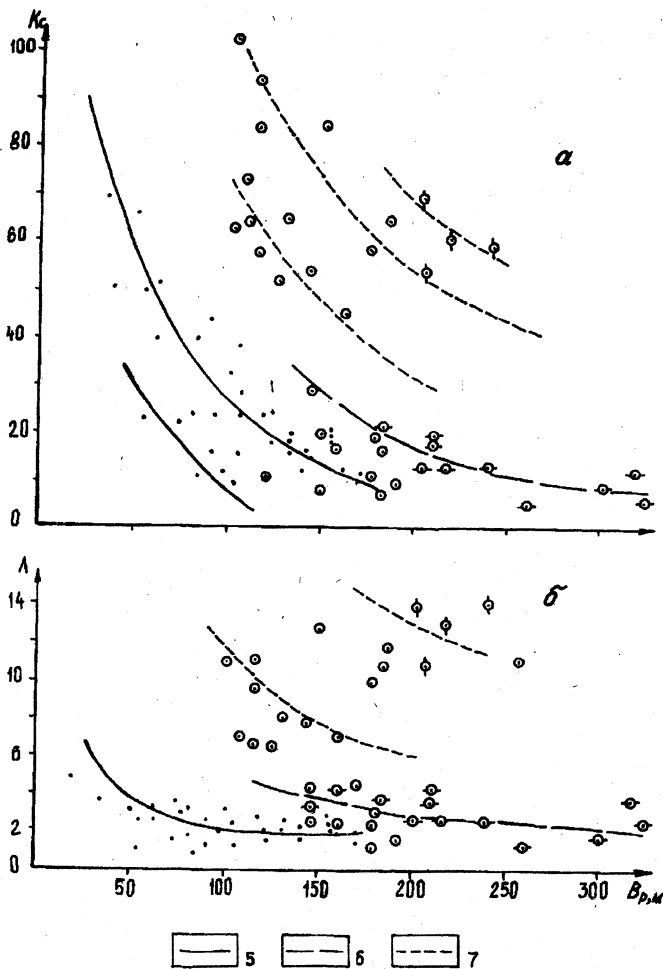


Рис. 4. Связь показателей устойчивости с шириной русла (B_p)
 а — коэффициент стабильности (K_c); б — число Лохтина ($Л$). Условные обозначения 1 — 4 см. рис. 2; 5 — широкопойменное русло; 6 — адаптированное русло; 7 — врезанное русло

типу русла приближенные численные градации, а также выделить участки реки, соответствующие тому или иному типу (табл. 2). Как видно из таблицы, на верхнем Немане преобладает относительно устойчивое русло; лишь в нижней части этого участка реки русло слабоустойчивое. Это проявляется в изменении на верхнем Немане морфодинамического типа русла. Свободно меандрирующее русло сменяется ниже устья Дитвы широкопойменным, относительно прямолинейным. В среднем течении Немана и на приплотинном участке преобладает устойчивое русло. Исключение здесь составляют участки русла в четко выраженных расширениях дна долины, где резкие изменения условий формирования приводят к потере устойчивости; русло становится неустойчивым, разветвляясь на рукава, образуя многочисленные перекаты и т. д. В нижнем течении Немана (ниже устья Нярис) русло на всем протяжении слабоустойчивое.

Сравнение предложенной классификации с классификацией Р. С. Чалова [8, 9] для рек средней водности ($Q = 1000-2000 \text{ м}^3/\text{с}$) обнаруживает определенные расхождения как по градациям $Л$, так и K_c . В классификации Р. С. Чалова слабоустойчивыми являются русла с $Л = 2-5$, относительно устойчивыми — $Л = 5-10$ и устойчивыми — $Л > 10$. По K_c к неустойчивым отнесены русла с $K_c < 6$, слабоустойчивым — $K_c = 6-15$, относительно устойчивым — $K_c = 15-20$ и устойчивым $K_c > 20$. По-видимому, эти расхождения можно

Классификация русла Немана по степени устойчивости

Характеристика русла	Показатели устойчивости		Участки русла	Средняя скорость размыва берегов, м/год
	число Лохтина, Л	коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева, K_c		
Устойчивое	> 6	> 40	Устье Шары — водохранилище (кроме широкопойменных участков), ГЭС — устье Нярис	0,4—0,7
Относительно устойчивое	6—4	40—20	Слияние Уссы с Лошей — устье Дитвы	1—2
Слабоустойчивое	4—2	20—10	Устье Дитвы — устье Шары, устье Нярис — устье Тильжяле	2—3
Неустойчивое	< 2	< 10	Широкопойменные отрезки русла на участках устье Шары — устье Котры и устье Гожки — устье Мяркаса	3—5

объяснить различной водностью Немана ($Q \sim 600 \text{ м}^3/\text{с}$) и рек, русла которых послужили основой классификации Р. С. Чалова ($Q > 1000 \text{ м}^3/\text{с}$).

Приведенный анализ устойчивости русла Немана по всей длине реки показывает тесную связь ее показателей как с морфодинамическими типами русла, так и с геолого-геоморфологическими условиями руслоформирования, проявляющимися в разделении реки на участки верхнего, среднего и нижнего течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лохтин В. М. // Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 23—59.
2. Шатаева С. Г. Определение объемов дноуглубительных работ с помощью показателя устойчивости русла // Тр. ЦНИИЭВТ. 1969. Вып. 68. С. 59—74.
3. Антроповский В. И. Гидроморфологические зависимости и их дальнейшее развитие // Тр. ГГИ. 1969. Вып. 169. С. 34—36.
4. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 144 с.
5. Каганов Я. И. Русловые переформирования при регулировании рек горно-предгорной зоны. Львов: Виша школа, 1981. 120 с.
6. Лапшенков В. С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 239 с.
7. Экспериментальная геоморфология. Вып. 2/Под редакцией Н. И. Маккавеева. М.: Изд-во МГУ, 1969. 179 с.
8. Чалов Р. С. Показатели устойчивости русла, их использование для оценки интенсивности русловых деформаций и пути совершенствования // Динамика русловых потоков. Л.: Изд-во ЛПИ, 1983. С. 46—53.
9. Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 231 с.

Литовская сельскохозяйственная академия

Поступила в редакцию
30.11.92

STABILITY OF THE NEMAN CHANNEL

A. A. DARBUTAS

Summary

A channel stability is estimated using a number of coefficients (those introduced by Lokhtin, Makkaveev, Lapshenkov), their informativity and relation to channel processes factors being assessed. The stability coefficients are proved to be closely related to morphodynamic type of channel and to geological-geomorphological environments of the channel formation.