

УДК 551.435.11

Б. Ф. СНИЩЕНКО

СВЯЗЬ ТИПОВ РУСЕЛ С ФОРМАМИ РЕЧНЫХ ДОЛИН

На обширном материале исследований в натуре установлено, что необходимые условия перехода свободно меандрирующих русел к прямолинейным состоят в совместном уменьшении относительной ширины дна долины и увеличении меры использования потоком уклона долины. Приведены критериальные характеристики типов русла, которые могут применяться при прогнозировании типов русловых форм в зарегулированных реках и созданных искусственным путем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Среди составляющих физико-географической среды, формирующих облик речного русла, Н. И. Маккавеев (1955) выделил особое значение элементов геоморфологического строения речных долин — сужений, расширений и продольного профиля. Н. Е. Кондратьев (1959) в ряд независимых факторов, влияющих на характер руслового процесса, поставил условия, ограничивающие свободное развитие русел, — так называемые ограничивающие факторы. Они связываются с ограничением поим коренными склонами долины, с наличием базального слоя и с местными базисами эрозии. Карта распространения типов руслового процесса, составленная С. И. Пиньковским (Кондратьев и др., 1959), показала, что они связаны со строением рельефа поверхности, в частности с размерами речных долин.

Среди характеристик определяющих факторов многие авторы выделяют уклон дна долины I_0 , предпочитая его в данном случае уклону потока I . Так, В. В. Ромашин (1968), заменив I на I_0 в критериальном уравнении $IQ = \text{const}$ Леопольда и Вольмана (Leopold, Wolman, 1957), выделил с его помощью на графике $I_0 = f(\bar{Q}_{\max})$ четыре типа руслового процесса. Проведя эксперименты по образованию макроморфов в лаборатории, Аккерс и Чарлтон (Ackers, Charlton, 1970), а также Шумм и Кхан (Shumm, Khan, 1972) подтвердили, что условия перехода одного типа руслового процесса в другой в первую очередь связаны с изменением уклона дна долины. Читале (Chitale, 1970) указывает на важную роль уклона долины в формировании русел, в общем подтверждая положение Леопольда и Вольмана.

Полученные первые критериальные связи, позволяющие разделить русла по типам, безусловно, сыграли важную роль в исследованиях русловых процессов. Однако необходимо отметить и их несовершенство. В частности, оперирование с абсолютными, а не с относительными значениями уклонов и расходов воды, приводит к статистической неоднородности выборок в силу широкого диапазона существующих в природе значений переменных и вынуждает рассматривать полученные связи как региональные. Нельзя не подчеркнуть, что к настоящему времени не найдено общепринятых объяснений причин возникновения различных типов русел, как нет и количественной оценки в этом процессе удельного веса разных определяющих факторов.

В настоящей работе предпринята попытка найти количественные связи типов русел с геоморфологическими элементами дна речных долин и некоторыми характеристиками жидкого и твердого стока. При этом рассматриваются шесть типов русел по Н. Е. Кондратьеву и И. В. Попову (1967): осередковый (русловая многорукавность); побочный; ограниченное, незавершенное и свободное меандрирование; пойменная многорукавность.

В качестве показателя ограничения амплитуды блуждания русла введем отношение ширины современного дна долины B_0 , включающей активную часть поймы и русло, к ширине потока на уровне пойменных

Таблица 1

Крайние значения морфологических и гидравлических элементов исследованных участков рек

Крайние значения	B_0 , км	$B_{пр}$, км	B , км	I_0	I	\bar{Q}_{max} , м ³ /с
Минимум	0,80	0,20	0,04	0,000014	0,000007	82,5
Максимум	25,0	20,0	4,5	0,00059	0,00057	40 000

бровок B , т. е. B_0/B . Соотношение потерь энергии в потоках разной степени извилистости можно охарактеризовать отношением уклона дна долины I_0 к уклону потока по тальвегу I , т. е. I_0/I . Соотношение уклонов обычно рассматривается как коэффициент извилистости $\bar{k} = I/I_0$, где l — длина реки по тальвегу, а l_0 — по оси пояса руслоформирования. Однако в отличие от чисто линейного смысла k , отношению уклонов можно придать энергетическую интерпретацию. Действительно, разный дефицит уклонов $\Delta I = I_0 - I$ в меандрирующих и прямолинейных руслах отражает разные способы потери энергии в этих типах русла.

Из принятых соотношений составим функциональную зависимость

$$I_0/I = f(B_0/B) \quad (1)$$

и покажем, что с помощью уравнения (1) можно косвенно выразить связь амплитуды блужданий русла по дну долины и потерь энергии потока с типом русла.

Данные о размерах морфологических элементов дна речных долин получены на основе обработки картографических материалов. Сведения о среднемноголетних максимальных расходах \bar{Q}_{max} и уровнях на опорных водомерных постах получены из гидрологических ежегодников.

Участки с разными типами русел охватывали преимущественно равнинные реки в разных географических регионах СССР, находящиеся в естественном состоянии. Было отобрано примерно по 30 участков рек разного размера для каждого типа русла. Длина морфологически однородных участков составляла от 10 до 165 км. В итоге рассмотрено 35 рек, 183 участка общей длиной 4523 км. Крайние значения морфологических и гидравлических элементов исследованных участков приведены в табл. 1.

За характерную ширину дна долины B_0 принималась часть долины между подошвами склонов надпойменной террасы, в пределах которой заметны следы русловой деятельности современного потока. Таким образом, в величину B_0 включалась активная часть поймы, ширина пояса руслоформирования $B_{пр}$ и ширина русла B между бровками пойменных берегов. В разветвленном русле, исключая осередковый тип, ширина реки равнялась сумме ширины потоков. Уклон дна долины I_0 измерялся по оси пояса руслоформирования, а уклон потока I — по тальвегу. Указанные характеристики принимались средними в пределах выделенных участков.

ВЕЛИЧИНЫ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ШИРИНЫ ДНА ДОЛИНЫ ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ РУСЕЛ

Установить преимущественное значение ширины дна долины B_0 , свойственное разным типам русел, возможно лишь относя ее к ширине русел B , которая прямо связана с расходом воды и, следовательно, с масштабом реки. Оперирование с абсолютными величинами может привести к неверному выводу вследствие статистической неоднородности сравниваемых между собой рядов.

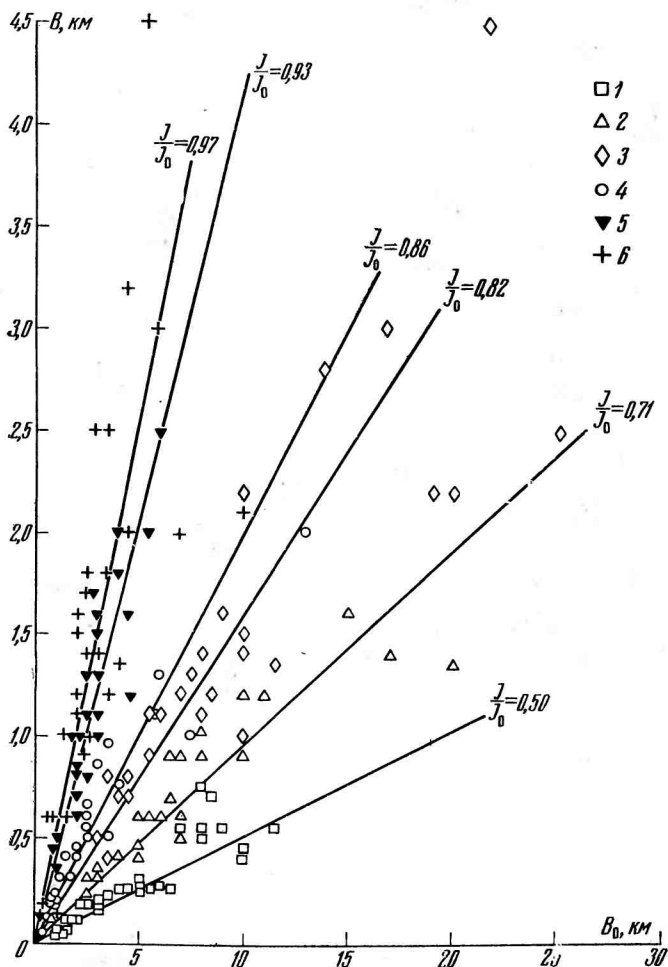


Рис. 1. Распределение типов русел в зависимости от ширины и уклонов реки и дна долины

1 — свободное меандрирование, 2 — незавершенное меандрирование, 3 — пойменная многорукавность, 4 — ограниченное меандрирование, 5 — боковой тип, 6 — русловая многорукавность (осередковый тип)

В соответствии с требованиями уравнения (1) были составлены отношения B_0/B для каждого типа русла. Частные графики $B=f(B_0)$ совмещены на одном рисунке (рис. 1). Были составлены также два дополнительных соотношения $B=f(B_{пр})$ и $B_{пр}=f(B_0)$. Первое из них косвенно характеризует амплитуду колебания потока в плане, второе ставит амплитуду в зависимости от ширины дна долины. Анализируя графики, можно отметить следующие свойства указанных соотношений. 1. Каждая ветвь графика на рис. 1 характеризует область существова-

ния определенного типа русла, необходимым условием образования которого является определенное значение относительной ширины дна долины. 2. При сближении бортов долины ($B = \text{const}$) типы русел последовательно изменяются в следующем порядке: свободное меандрирование, незавершенное меандрирование, пойменная многорукавность и ограниченное меандрирование, приближающееся к прямолинейному с развитием побочной и русловой многорукавности (Снищенко, 1976). 3. Необходимые условия, при которых реализуется указанная смена

Таблица 2

Значения характерной относительной ширины элементов дна долины при разных типах русла реки

Тип русла	B_0/B	$B_{\text{пр}}/B$	$B_0/B_{\text{пр}}$
Свободное меандрирование	18,30	8,86	2,07
Незавершенное меандрирование	10,39	5,67	1,83
Пойменная многорукавность	6,50	5,58	1,18
Ограниченное меандрирование	5,41	3,41	1,48
Побочный тип	2,43	1,18	2,06
Русловая многорукавность	1,92	1,01	1,90

типов русла, состоят в приближенном соблюдении некоторых исследуемых соотношений, приведенных в табл. 2.

Полученные связи между характерными величинами ширины отличаются высокими коэффициентами корреляции — от 0,75 до 0,97.

СООТНОШЕНИЯ УКЛОНОВ ДНА ДОЛИНЫ И ПОТОКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ РУСЛА

Связь уклона дна долины I_0 , нормированного по i , выражается на общем графике семейством прямых $I = f(I_0)$, расположенных в той же последовательности, что и функция $B = f(B_0)$ на рис. 1. Таким образом, существует прямая пропорциональность между уклоном руслового потока и уклоном дна долины для каждого типа русла. Представление о мере использования рекой уклона дна долины и коэффициентах извилистости русла в разных типах русел дают следующие средние значения I/I_0 и k : свободное меандрирование — $I = 0,50 I_0$, $k = 2,00$; незавершенное меандрирование — $I = 0,71 I_0$, $k = 1,41$; пойменная многорукавность — $I = 0,82 I_0$, $k = 1,22$; ограниченное меандрирование — $I = 0,86 I_0$, $k = 1,16$; побочный тип — $I = 0,93 I_0$, $k = 1,07$; русловая многорукавность — $I = 0,97 I_0$, $k = 1,03$. Коэффициенты корреляции колеблются от 0,86 до 0,99.

Анализ материалов позволил получить некоторые качественные закономерности в связях между абсолютными значениями I_0 и B_0 и типами русел. Они сводятся к следующему: более широким поймам свойственны меньшие уклоны I_0 ; более широкие русла рек развиваются в условиях меньших уклонов I_0 ; наблюдается некоторое увеличение уклонов I_0 при переходе от ограниченного меандрирования к свободному и далее к незавершенному меандрированию и пойменной многорукавности.

ОБОБЩЕННАЯ СВЯЗЬ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ УКЛОНОВ И ШИРИНЫ ДОЛИН С ТИПАМИ РУСЕЛ

Методом наименьших квадратов уравнение (1) было аппроксимировано линейной зависимостью

$$\frac{I_0}{I} = 0,05 \frac{B_0}{B} + 0,95. \quad (2)$$

На рис. 2, а нанесен график уравнения (2) вместе с натурными точками. График показывает, что по мере относительного сужения дна долины извилистость русла уменьшается, а использование потоком уклона долины возрастает. При этом определенные интервалы B_0/B и I_0/I выделяют на графике области опытных данных, соответствующие вполне определенным типам русел. Границы между областями размыты,

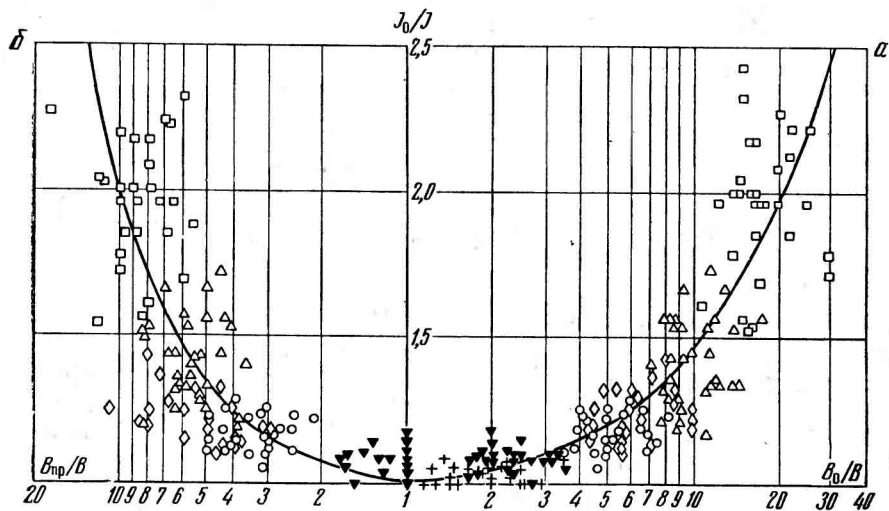


Рис. 2. Связь типов русел с относительными уклонами и шириной дна долины (а) и с относительными уклонами и шириной пояса руслоформирования (б)
Обозначения см. на рис. 1

что свидетельствует о наличии переходной зоны между типами русел в природе. Из анализа графика следует, что уклон руслового потока может уменьшаться по сравнению с уклоном долины не более чем в 2,5 раза, а ширина активной части дна долины не превышает ширину русла более чем в 30 раз. Таким образом, необходимое условие перехода свободно меандрирующих русел к прямолинейным состоит в сов-

Таблица 3

Относительные значения уклонов и ширины долины при разных типах русла реки

Тип русла	Среднее/стандарт σ		
	I_0/I	B_0/B	$B_{пр}/B$
Свободное меандрирование	2,00/0,22	18,30/4,57	8,86/2,53
Незавершенное меандрирование	1,41/0,02	10,39/5,70	5,67/1,35
Пойменная многорукавность	1,22/0,09	6,50/1,79	5,58/1,85
Ограниченное меандрирование	1,16/0,06	5,11/1,10	3,41/0,71
Побочное русло	1,07/0,04	2,43/0,54	1,18/0,24
Русловая многорукавность	1,03/0,03	1,92/0,64	1,01/0,05

местном уменьшении относительной ширины дна долины и увеличении меры использования потоком уклона дна долины.

По аналогии с исследованным графиком была построена зависимость $I_0/I = f(B_{пр}/B)$ (рис. 2, б). Сказалось, что относительная величина пояса руслоформирования тесно коррелирует с относительным уклоном долины — коэффициент корреляции всей совокупности опытных точек составил 0,79. Порядок смены типов русел соответствует выявленной

выше очередности, показанной на графике 2, а. Уравнение, аппроксимирующее зависимость, имеет вид:

$$I_0/I = 0,04 (B_{пр}/B)^{1,4} + 0,96. \quad (3)$$

Статистическая обработка опытных данных, описываемых уравнениями (2) и (3), привела к результатам, приведенным в табл. 3.

О СВЯЗИ КРИТЕРИЕВ I_0/I И B_0/B С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЖИДКОГО И ТВЕРДОГО СТОКА

Рассматриваемые критерии характеризуют условия существования морфологически однородных участков рек со свойственным им транспортом наносов. Однако количественно связать показатели транспорта

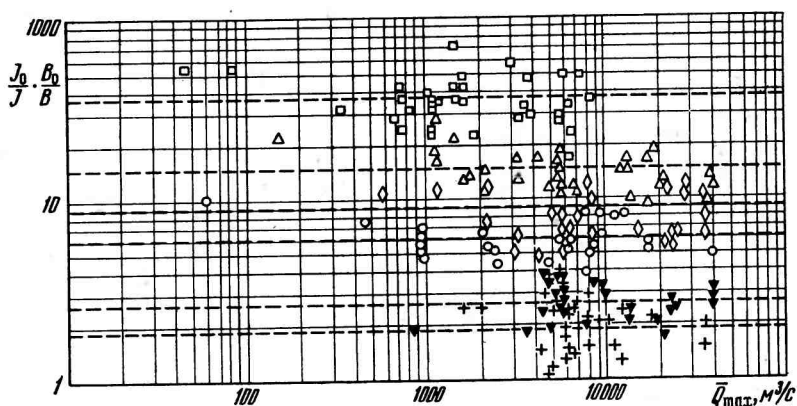


Рис. 3. Критериальный график типов русел
Обозначения см. на рис. 1

наносов с типами русел, как, впрочем, и всю совокупность характеристик жидкого и твердого стока, в настоящее время невозможно из-за отсутствия репрезентативных натуральных данных. Исключение составляют два параметра — расход и мутность воды.

Свяжем с расходом \bar{Q}_{max} параметр $A = \frac{I_0}{I} \frac{B_0}{B}$, представляющий собой произведение двух критериев, и построим график указанной функции (рис. 3). Из графика следует, что условия существования типа русла не зависят от абсолютной величины жидкого расхода — зоны опытных точек, одноименных по типам процесса разделяются лишь вдоль оси ординат и параллельны оси абсцисс. Поскольку график $\frac{I_0}{I} \frac{B_0}{B} = f(\bar{Q}_{max})$ позволяет определить не только область существования типа русла, но и размер реки (пропорциональный расходу), то его можно отнести к критериальным графикам. Соответственно параметр A можно именовать критерием типа русла. Средние значения критерия A приведены в табл. 4.

Одни и те же типы русел образуются в реках с разной мутностью воды. В этом легко убедиться, если сопоставить карту мутности К. Н. Лисицкой (Сток наносов, 1977) с картой типов русел Пиньковского. Так, например, свободное меандрирование развивается как в реках с мутностью воды 10—25 г/м³, так и в реках, где мутность увеличена в 100 раз — до 1000—2500 г/м³. Инвариантность типов русел относительно расхода и мутности воды указывает на то, что роль этих характеристик в условиях образования русловых форм неодинакова.

Средние значения критерия типа русла реки

Тип русла	A	Стандарт σ
Свободное меандрирование	36,60	11,50
Незавершенное меандрирование	14,65	4,01
Пойменная многорукавность	7,93	2,43
Ограниченное меандрирование	5,93	1,34
Побочное русло	2,60	0,59
Русловая многорукавность	1,97	0,63

Определяющее значение в образовании типов русла принадлежит показателям I_0/I и B_0/B , связанным с геоморфологическим строением долин. Совокупность характеристик водности и твердого стока определяет динамические особенности руслового рельефа как форм транспорта наносов: размеры морфологических элементов русла и поймы, темпы деформаций и т. п.

ВЫВОДЫ

Анализ обширного материала, охватывающего реки разных порядков, расположенных в разных регионах страны, приводит к следующим выводам.

1. Проявляется отчетливая связь типа русла с относительной шириной B_0/B и относительным уклоном дна долины I_0/I . Роль ширины дна долины сказывается в том, что она является главным фактором, ограничивающим амплитуду блужданий русла и снижающим степень его извилистости. Отношения уклонов и ширины дна долины взаимосвязаны. Связь между параметрами прямая — относительный уклон долины растет вместе с ростом относительной ширины дна долины.

2. Роль независимой переменной в уравнении (2) играет относительная ширина дна долины B_0/B . Уклон реки I есть величина производная; с одной стороны, она определяется степенью сжатия долиной амплитуды колебаний потока, т. е. B_0/B , а с другой — уклоном дна долины I_0 , который определяется геологической историей долины. В указанном смысле средний уклон реки может быть выражен формулой

$$I = \frac{I_0}{0,05 \frac{B_0}{B} + 0,95} \quad (4)$$

3. Критериальной характеристикой, определяющей тип русла является произведение двух отношений $\frac{I_0}{I} \frac{B_0}{B}$. Связанное с расходом воды

как с масштабом реки $\frac{I_0}{I} \frac{B_0}{B} = f(\bar{Q}_{\max})$, оно позволяет построить критериальный график, который указывает на области, свойственные разным типам русел, границы между областями, независимость типа русловых форм от расхода воды.

4. Отношение $\frac{I_0}{I} \frac{B_0}{B}$ можно рассматривать отдельно как произведение $I_0 B_0$ и IB . К. В. Гришанин (1969) показал, что IB характеризует величину гидравлических сопротивлений русла. При такой трактовке критерий приобретает энергетический смысл: он выражает отношение сопротивления потока в заполненной пойме к сопротивлению руслового потока в пойменных бровках.

Поскольку переход от меандрирования к русловой многорукавности сопровождается уменьшением критерия A , то этим отражается также уменьшение сопротивлений движению пойменного потока и возрастание роли сопротивлений русла, т. е. роль основного фактора потери энергии в потоках прямолинейной формы переходит к руслу. Как следствие указанного процесса при переходе от свободного меандрирования к осередковому руслу наблюдается перестройка внутренних характеристик руслового процесса: рост скорости потока и расхода русловых наносов, изменение форм транспорта наносов и др.

5. Величина расхода воды не оказывает определяющего влияния на тип русла. Одному и тому же расходу соответствуют реки с разными формами русел, абсолютный размер которых пропорционален расходу воды. Типы русел инвариантны также и относительно разной мутности воды.

6. Соотношения $\frac{B}{B_0} = \text{const}$, $\frac{B}{B_{\text{пр}}} = \text{const}$ и $\frac{l_0}{l} = \text{const}$ должны рассматриваться как условия геометрического подобия при исследовании руслового процесса на гидравлических моделях. К подобному выводу о соотношении ширины плесов и перекатов пришел и Н. А. Ржаницын (1961). Полученные закономерности позволяют в первом приближении прогнозировать условия формирования рельефа русла при проведении некоторых водохозяйственных мероприятий: обваловании рек, строительстве каналов и др.

ЛИТЕРАТУРА

- Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеиздат, 1960.
 Кондратьев Н. Е., Ляпин А. Н., Попов И. В., Пиньковский С. И., Федоров Н. Н., Якунин И. И. Русловой процесс. Л., Гидрометеиздат, 1959.
 Кондратьев Н. Е., Попов И. В. Методические предпосылки к постановке сетевых наблюдений за русловым процессом. «Тр. ГГИ», вып. 144, 1967.
 Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., Изд-во АН СССР, 1955.
 Ржаницын Н. А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л., Гидрометеиздат, 1961.
 Ромашин В. В. Типы руслового процесса в связи с определяющими факторами. «Тр. ГГИ», вып. 155, 1968.
 Снущенко Б. Ф. Оценка влияния некоторых характеристик факторов руслообразования на тип руслового процесса. В сб. «Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях». Изд-во МГУ, 1976.
 Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Ред. А. В. Караушев. Л., Гидрометеиздат, 1977.
 Ackers P., Charlton F. The slope and resistance of small meandering channels. The Institution of Civil Engineers. Proceedings, paper 7362 S, 1970.
 Chitale S. River channel patterns. Journal of the Hydraulics Division. «Proc. of Amer. Soc. of Civil Engineers», v. 96, Hyl, 1970.
 Leopold L., Wolman M. River channel patters: braided, meandering and straight «U. S. Geol. Surv. Prof. Paper», No. 282-B, 1957.
 Shumm S., Khan H. Experimental study of channel patters. «Geol. Soc. America Bull.», v. 83, 1972.

Государственный гидрологический институт

Поступила в редакцию
5.VI.1978

VALLEY FORM CONTROL OF RIVER CHANNEL TYPE

B. F. SNISHCHENKO

Summary

A great deal of nature studies reveal necessary conditions of transition of free meandering river channels into linear ones; the conditions are combined decrease in relative valley floor width and increase in degree of valley slope utilisation by the stream. Some criteria of channel type characteristics are given which may be applied to forecasting of channel forms developing in regulated rivers and artificial streams.