

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 556.535:556.537

Н.И. Алексеевский, Д.Н. Айбулатов, С.Р. Чалов

УСЛОВНЫЕ ПОРЯДКИ ВОДОТОКОВ НА УЧАСТКАХ МНОГОРУКАВНОГО РУСЛА

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-0069), а также проекта российско-германской лаборатории О.Ю. Шмидта (OSL-12-01).

Проведено исследование структуры водотоков на разветвленных участках рек. Для этой цели обобщена информация по 120 разветвленным участкам 40 рек России, а также по многим дельтовым разветвлениям устьев рек на юге и севере России. Изучена возможность формализации структуры водотоков на участках многорукавного русла. Предложена концепция условных порядков для определения относительных размеров рукавов в русловых и дельтовых разветвлениях. Дано обоснование метода определения условных порядков этих рукавов в зависимости от их водоносности. Получен критерий подобия условий рассредоточения речного стока по водотокам на участках многорукавного русла и определены его диапазоны изменения, соответствующие слабому, умеренному, сильному и исключительно сильному вариантам развития этого процесса.

Ключевые слова: русловые и дельтовые разветвления; структуры водотоков; условные порядки водотоков; критерии подобия разветвлений.

В теории геоморфологической и гидрологической науки широко используются представления о порядковой организации структуры микроручейковой, русловой и речной сети в пределах водосборных территорий [1–4]. В максимальной степени они используются в исследованиях структуры речных сетей, которую отличает хорошо выраженный древовидный рисунок строения. Главная идея такого подхода заключается в определении начального элемента структуры сети (водотока 1-го порядка) и его использовании в качестве своеобразного эталона. В зависимости от числа этих начальных элементов P_0 находится размер (порядок N) любого другого элемента в структуре речной сети [5, 6], поскольку

$$N_{\text{ш}} = 1 + \log_2 P_0, \quad (1)$$

где P_0 – число водотоков 1-го порядка в бассейне данной реки выше створа определения $N_{\text{ш}}$. В качестве рек первого порядка удобно использовать водотоки с длиной менее 10 км [7, 8]. В полном соответствии с величиной N изменяются все гидрографические, осредненные за большие интервалы времени гидрологические и морфодинамические характеристики системы поток – русло [2, 8]. В частности, надежные корреляционные зависимости существуют между средними многолетними расходами воды Q_0 и порядками рек, определенными в системе А. Шейдеггера [5]. Они имеют вид

$$Q_0 = aN_{\text{ш}}^b, \quad (2)$$

где a и b – эмпирические параметры. Параметры зависимости (1) имеют бассейновый характер (при относительной стабильности показателя степени b).

В условиях достаточного и избыточного увлажнения речных бассейнов древовидная структура русловой сети обуславливает постепенное или скачкообразное увеличение водоносности главной реки под влиянием притоков. Эта закономерность нарушается лишь на участках русловых и дельтовых разветвлений русла, в пределах которых процессы сосредоточения стока в речной сети прерываются на относительно коротких участках долины (русловые разветвления) или сменяются необратимыми явлениями рассредоточения стока (дельтовые разветвления). Разветвления характерны для 17–35% протяженности рек Северной Евразии, а на отдельных крупных реках могут доминировать на 70%

их длины [9, 10]. В разветвлениях существует определенное соподчинение главных и второстепенных рукавов, однако общие закономерности их структуры изучены явно недостаточно [11, 12].

Поэтому исследование структуры водотоков на разветвленных участках рек является актуальной научной задачей. Для этой цели нами обобщена информация по 120 разветвленным участкам 40 рек России, а также по многим дельтовым разветвлениям устьев рек на юге и севере России. Обработка этой информации показала, что наличие разветвления русла реки означает уменьшение водоносности любого рукава Q_i по сравнению с расходом воды выше разветвления $Q_{\text{вх}}$, поскольку

$$Q_{\text{вх}} = \sum_{i=1}^M Q_i \quad (3)$$

где M – число водотоков, пересекаемых условной плоскостью сечения долины. Чем больше число водотоков K_a представлено в структуре разветвления, тем больше указанные отличия в их водоносности, сильнее проявляются процессы рассредоточения стока (бифуркации русла) в пределах разветвления длиной l . Аналогичным образом на эти процессы влияет увеличение числа островов на участках многорукавного русла [12], а также число узлов деления русла на рукава, уровней последовательного осуществления этого процесса [9]. Однако наличия этой информации недостаточно для анализа подобия (или отличий) структуры водотоков русловых и дельтовых разветвлений. Явно не хватает количественной характеристики размера этих водотоков, которая была бы достаточно эффективной для их сопоставления в условиях крайне слабой гидрологической изученности отдельных рукавов разветвлений.

В этой связи можно воспользоваться концепцией условных порядков N_y , обоснованной в ряде публикаций [7, 8, 9, 13]. Эта концепция в одинаковой мере реализуется в варианте использования региональной зависимости (2) или в варианте балансовых идей на участках деления главного русла на рукава. В последнем случае анализируется очевидная пропорция между величиной $Q_{\text{вх}}$ (сформированной некоторым числом водотоков первого порядка P_0 , которые находятся в бас-

сейне реки выше разветвления (см. уравнение (1)) и известной водоносностью некоторого рукава разветвления Q_i (обусловленной влиянием неизвестной части водотоков первого порядка P_i), т.е.

$$\frac{P_i}{P_0} = \frac{Q_i}{Q_{вх}}. \quad (4)$$

Определение величины P_i по этому уравнению позволяет оценить величину порядка реки $N_{ш,i}$ по формуле (1) (при замене $P_0 = P_i$). Поскольку его величина оценена не по фактическому, а по рассчитанному значению P_i , такой порядок водотока предложено называть условным ($N_y = N_{ш,i}$). Следовательно, условный порядок водотока N_y в разветвлениях рек равен фактическому порядку $N_{ш}$, если одинакова их водоносность. На аналогичном утверждении базируется другой вари-

ант определения условных порядков рукавов русловых и дельтовых разветвлений.

Наличие данных о водоносности рукавов позволяет решить обратную задачу и рассчитать неизвестную величину $N_y = N_{ш,i}$ с учетом уравнения (2). При отсутствии гидрологических данных по рукавам разветвлений можно использовать зависимости между меженной шириной русел водотоков B_i и характерными расходами воды Q_{0i} , а затем по полученным данным и уравнению (2) рассчитывается искомая величина $N_{ш,i}$. Для изученных водотоков в дельте Лены, например, зависимость между этими переменными имеет вид $B_i = 19,7 Q_{0i}^{0,5}$ [14]. Полученные с учетом этой зависимости условные порядки дельтовых водотоков в устьевой области Лены характеризуют закономерное уменьшение элементов русловой сети дельты от ее вершины к морскому краю (рис. 1).

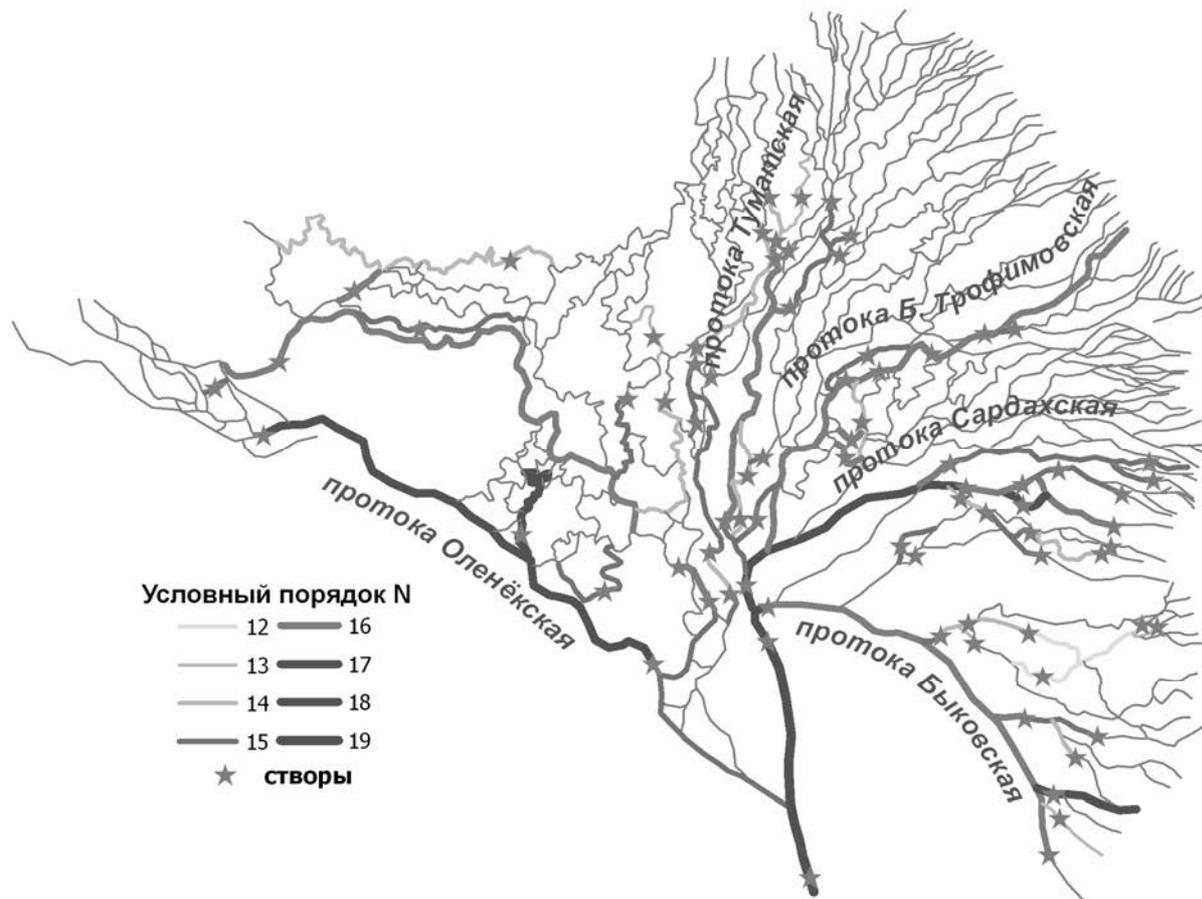


Рис. 1. Изменение условных порядков дельтовых водотоков в устьевой области Лены

Информация о величине условных порядков рукавов разветвлений создает предпосылки для их сопоставления по относительным размерам, определения стока влекомых наносов по параметрам гряд, оценки скорости размыва вогнутых берегов излучин (они являются функцией порядка водотоков), решения других практических и научных гидрологических задач. В частности, на основе этой информации можно обосновать критерии подобия разветвлений одной реки или разветвлений разных рек по условиям продольного рассредоточения стока воды. Для этого определяется разность [13]:

$$\Delta N = N_{ш} - N_{ш,i}, \quad (5)$$

где $N_{ш}$ – порядок реки выше разветвления, а $N_{ш,i}$ – минимальный условный порядок водотока, возникающего при последовательном делении русла реки на все более мелкие рукава. Разность ΔN зависит от размера реки. Она возрастает при увеличении размера реки $N_{ш}$. Поэтому для сравнения разветвлений рек, отличающихся по размеру, разность ΔN нормируется, т.е.

$$\Delta N_1 = \Delta N / N_{ш} \quad (6)$$

Величина ΔN_1 является критерием подобия разветвлений по условиям рассредоточения стока воды. Два разветвления подобны друг другу, если для них вели-

чина $\Delta N_1 = \text{const}$. В этой связи неочевиден вывод о том, что разветвления рек, для которых $N_{\text{ш}} = 3$ ($N_{\text{my},i} = 1$) и $N = 15$ ($N_{\text{my},i} = 5$), подобны, поскольку критерий ΔN_1 для них одинаков ($\Delta N_1 = 0,667$).

Обработка натурной информации показала, что величина ΔN_1 изменяется в диапазоне от 0,05 до 0,8, зависит от типа разветвлений. Существование двух равных по водности рукавов отличает некоторые простые одиночные разветвления. Более 75% таких разветвлений характеризуются слабым рассредоточением стока воды или слабой выраженностью водораспределительных функций ($\Delta N_1 < 0,2$). Сложные одиночные разветвления отличает умеренное рассредоточение стока, для большинства из них $\Delta N_1 = 0,2-0,4$. Аналогичное рассредоточение стока наблюдается в системах сопряженных разветвлений. Сильное рассредоточение стока воды характерно для пойменно-русловых разветвлений полугорных рек, а также параллельно-рукавных разветвле-

ний больших равнинных рек. Для них $\Delta N_1 = 0,4-0,6$. Этот процесс достигает максимума, если $\Delta N_1 > 0,6$. Он характерен для осередковых разветвлений и участков точечной многорукавности [9].

Большую часть разветвлений отличает умеренный тип рассредоточения стока воды. Он свойствен примерно для 40% всех изученных разветвлений. Предельно большая интенсивность этого процесса характерна для участков точечной многорукавности, создаваемой обломками горных пород в период снижения уровней воды. Она соответствует наличию на этом участке большого числа водотоков ($K_d/l = 100-500 \text{ км}^{-1}$) (таблица). Для пойменных разветвлений K_d/l изменяется в более широком диапазоне значений, а в среднем этому типу многорукавности свойственно сильное рассредоточение стока. Слабая степень рассредоточения стока характерна для участков одиночных русловых разветвлений.

Критерии подобия процессов рассредоточения речного стока (обозначения даны в тексте)

Тип многорукавности	Структурный уровень внутридолинного рельефа	$K_d/l, \text{ км}^{-1}$	ΔN_1
Точечная	Частицы русловых отложений	100–500	0,6–0,8
	Отдельные обломки		
Осередковая	Гряды	> 50	0,2–0,7
	Зандровые поля	>> 100	> 0,4
Русловая	Формы русла	< 50	0,03–0,4
Пойменная	Пойма	0–1000	0,3–0,7

Эти закономерности рассредоточения характерны и для устьевых областей дельтового типа. Анализ данных об условных порядках 75 наиболее крупных дельтовых водотоков в устьевой области Лены показал, что критерий условий рассредоточения стока по системам Быковской, Оленекской, Трофимовской, Туматской и Сардахской проток соответственно равен 0,33; 0,05, 0,43; 0,41 и 0,45. Это означает, что наибольшее рассредоточение ленского стока происходит по направлению Сардахской протоки. Наоборот, оно выражено наиболее слабо вдоль Оленекской протоки.

Наличие сведений об условиях рассредоточения стока воды является важным фактором исследования гидрологических функций русловых и дельтовых разветвлений. Под функциями разветвлений русла пони-

мается закономерное изменение гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла, состояния речной водной массы, объема речных отложений и наносов, теплосодержания и температуры воды, экологического состояния водотоков и водохозяйственной обстановки под влиянием бифуркации русла [9]. Исследование этих функций – путь к изучению закономерностей трансформации составляющих речного стока на многорукавных участках рек, условие изучения особенностей маргинального эффекта в устьевых областях рек. Концепция условных порядков – единственная пока возможность для описания топологических свойств сети водотоков на участках русловых и дельтовых разветвлений, анализ масштабных эффектов изменения вещественных потоков в их пределах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карашев А.В. Общие и некоторые частные вопросы теории русловых процессов и склоновой эрозии // Труды ГТИ. 1972. № 191. С. 5–22.
2. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 240 с.
3. Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю. Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки // Эрозия почв и русловые процессы / под ред. Р.С. Чалова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. № 14. С. 7–34.
4. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.
5. Шайдеггер А.Е. Теоретическая геоморфология. М.: Прогресс, 1964. 450 с.
6. Shreve R.L. Statistical law of stream numbers // J. Geol. 1966. № 74(1). С. 17–37.
7. Алексеевский Н.И. Индикационные методы гидрогеоморфологических исследований. Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 12 / науч. ред. Р.С. Чалов. М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 232–240.
8. Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Косицкий А.Г. Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // Динамика и взаимодействие атмосферы и гидросферы. М.: Городец, 2004. С. 345–412.
9. Алексеевский Н.И., Чалов Р.С. Гидрологические функции разветвленного русла. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2009. 280 с.
10. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР) / под ред. Р.С. Чалова. М.: Изд-во МГУ, 1994. 336 с.
11. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 543 с.
12. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
13. Алексеевский Н.И., Соколова Ю.В. Структура сети водотоков в русловых и дельтовых разветвлениях и способы ее формализации // Вестник Московского университета. Сер. География. 1999. № 2. С. 13–19.
14. Коротавев В.Н., Михайлов В.Н., Бабич Д.Б. и др. Гидролого-морфологические процессы в дельте р. Лены // Земельные и водные ресурсы. Противозеронозная защита и регулирование русел / под ред. Р.С. Чалова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. С. 120–144.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 25 марта 2013 г.