

---

---

**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ  
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

---

---

УДК 556.522

## ПОДОБИЕ РЕК И ИХ СИСТЕМ<sup>1</sup>

© 2013 г. Н. И. Алексеевский, А. Г. Косицкий, В. В. Носань, А. В. Христофоров

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

*119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы*

*E-mail: alexhydro@mail.ru*

Поступила в редакцию 05.12.2012 г.

Изучены критерии подобия рек и речных систем. Определен состав зональных и азональных признаков их подобия. Рассмотрена роль рисунка речных систем в изменении гидрографических и гидрологических характеристик рек от истоков к их устьям. Исследованы результативности методов фрактального и индикационного анализа речных систем. Установлено, что величина и масштабный эффект изменения различных характеристик системы поток–русло зависят от изменения порядков рек. Проведено сопоставление фрактальной размерности и масштабных эффектов их изменения. Получена универсальная зависимость порядка рек от площади водосборной территории и густоты речной сети. Вычисленная по 274 водосборам общая средняя квадратическая погрешность этой формулы равна 0,27, что доказывает возможность ее использования для гидрологических расчетов в различных ландшафтных условиях.

*Ключевые слова:* подобие рек и речных систем, фракталы, порядки рек, масштабные эффекты, гидрологические расчеты.

**DOI:** 10.7868/S0321059613060035

Огромное разнообразие рек затрудняет систематизацию информации об их состоянии и режиме, создает уникальность каждого водотока. При этом существует зональное изменение характеристик речного стока, типы водного режима рек, закономерное увеличение или уменьшение гидрологических характеристик при изменении площади речного бассейна [5, 7, 10, 15, 17]. В географо-гидрологических исследованиях указанные закономерности трансформации гидрологического режима рек широко используются для обоснования методов расчета и прогноза характеристик неизученных рек, являются основой для разработки разнообразных классификаций рек. Существенно реже эти закономерности используются при изучении подобия гидрологических объектов и процессов. Это мощное средство обобщения и интерпретации эмпирического материала редко применяется для характеристики пространственных или временных закономерностей изменения характеристик стока, других гидрологических процессов. Часто интуитивное использование при обобщениях признаков подобия процессов и территорий их проявления осу-

ществляется без особого внимания к смыслу последующего их применения. В частности, большинство обобщений пространственных распределений гидрологических характеристик [6] отражает подобие средних рек по условиям формирования их стока. Оно утрачивается при переходе к малым водотокам, формирующим сток под большим влиянием азональных факторов, и к крупным рекам, сток которых зависит от особенностей формирования стока в нескольких природных зонах. Поскольку на этом обстоятельстве исследователи обычно не заостряют внимания, считая его очевидным, то формируются представления о “безразмерности” рек. Даже в наиболее известных учебниках по гидрологии роль размера рек в изменении их режимных характеристик часто не рассматривается вообще или оценивается в частных случаях. Все это порождает проблемы, когда расчетные зависимости, полученные на одних водных объектах, пытаются применить на других объектах. Масштабные искажения — одна из наиболее старых и острых проблем науки, которая не может быть преодолена без решения задачи учета размера рек в разнообразных методах гидрологических расчетов и прогнозов. В предлагаемой статье представлены современные взгляды на важ-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-05-00069).

**Таблица 1.** Зональное изменение водоносности рек  $Q_0$ , м<sup>3</sup>/с [13]

Природная зона	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>			
	100	1000	10000	100000
Тундра	10.3	47.9	223	1040
Тайга	2.24	17.2	132	1010
Смешанный лес	5.52	30.0	163	885
Лесостепь, степь	0.46	3.48	26.6	203
Полупустыни, пустыни	0.03	0.67	13.0	254

ность учета размера рек при характеристике их подобия, а также подобия структуры речной сети.

### ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ РЕК

Реки и гидрологические процессы могут быть подобны, если для них одинаковы признаки подобия. На основе учета этих признаков созданы многочисленные гидрологические классификации [9, 16]. Основным признаком подобия рек — сходство ландшафтных условий формирования их поверхностного стока. Две реки подобны друг другу, если для средних многолетних условий разности между слоями осадков  $x$  и испарения  $z$  в их бассейнах идентичны. Это условие следует из нормированного (на слой осадков) уравнения водного баланса для бассейна реки за многолетний период [2]. Равенство коэффициентов стока и испарения (соответственно  $y/x$  и  $z/x$ , где  $y$  — слой стока) — признак подобия рек по климатическим условиям формирования стока воды.

Различия рек одной природной зоны определяются степенью влияния аazonальных факторов. Азональность рек обычно проявляется в отклонении характеристик их состояния или режима от регионального фона. В частности, эти отклонения возникают вследствие различий сопоставляемых рек по средней высоте [2]. Орoграфический фактор определяет высотную зональность, который влияет на отношение разности между  $x$  и  $z$ , нарушение зонального характера ее распределения по территории, оказывает заметное воздействие на густоту речной сети. Реки, формирующие сток в одной природной зоне, будут заметно различаться между собой, если их бассейны расположены на равнине или в горной местности. Поэтому различают равнинные, полугорные и горные водотоки. Зависимость среднего многолетнего модуля стока  $M_0$  от средней высоты речного бассейна  $H_{cp}$  особенно четко проявляется в горных районах. Однако и сравнительно неболь-

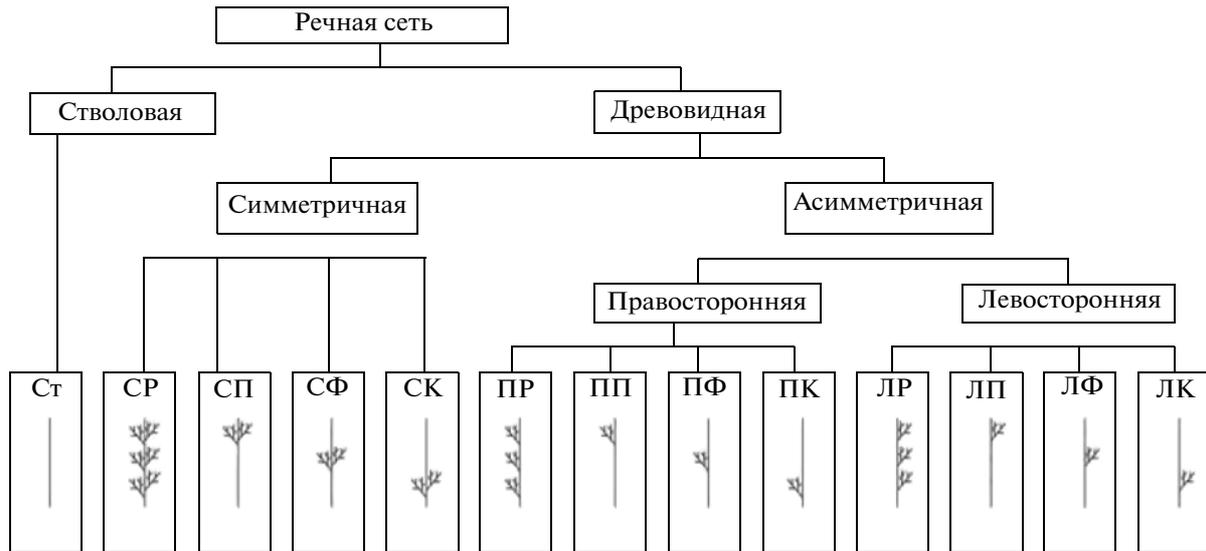
шие возвышенности на равнинных территориях существенно влияют на величину стока [18].

Мощный аazonальный признак подобия рек — их размер. В качестве характеристик размера рек обычно принимаются их длина, площадь речного бассейна и водоносность (средний многолетний расход воды или норма стока). Наиболее часто для этой цели в гидрологии используется величина площади водосбора  $F$ .

Варианты включения  $F$  в расчетные зависимости выражают значения этого предиктора в функциях изменения гидрологических характеристик по длине рек. При прочих равных условиях конкретному значению  $F$  соответствуют близкие гидрографические и осредненные гидрологические характеристики (расходы воды, наносов, растворенных веществ, биологических субстанций, тепла) [1, 12, 13, 19]. Если для двух и большего числа зональных рек  $F_1 = F_2 = \dots = F_n = \text{const}$ , то эти реки должны мало различаться по средним гидрологическим характеристикам. Увеличение абсолютного значения  $F$  (при равенстве других условий) соответствует однозначному и нелинейному возрастанию средних многолетних расходов воды (табл. 1). При переходе от условий избыточного увлажнения (тундра) к аридным происходит уменьшение нормы стока ( $F = \text{const}$ ). Водоносность рек, формирующаяся в разных зональных условиях, может различаться в 5–300 раз и больше. Чем больше площадь водосбора реки, тем меньше зональные различия средних многолетних расходов воды вследствие увеличения естественной зарегулированности стока [4, 11, 20].

Площадь водосбора — количественный критерий для разделения рек на малые, средние и крупные. Малыми считаются реки с  $F < 2000$  км<sup>2</sup>. К средним относятся водотоки, площадь бассейна которых составляет  $2000 \leq F < 50000$  км<sup>2</sup>. К большим относят реки с площадью бассейна  $> 50000$  км<sup>2</sup> [8]. Целесообразно большие реки делить на крупные ( $50000 \leq F < 250000$  км<sup>2</sup>), очень крупные ( $250000 \leq F < 1000000$  км<sup>2</sup>) и крупнейшие ( $F > 1000000$  км<sup>2</sup>).

Бассейны больших рек расположены в нескольких природных зонах, что обуславливает полизональный тип их гидрологического режима. Для средних рек характерны зональные, а для малых — аazonальные особенности формирования их гидрологического режима. Это проявляется, в частности, в большем или меньшем дренировании подземных водоносных горизонтов, питающих реки. Большие и средние реки полностью дренируют подземные водоносные горизонты в пределах их водосбора, а малые — некоторую их часть. Вследствие этого возникают особые усло-



**Рис. 1.** Классификация типов рисунка речной сети. Ст – стволовая, СР – симметричная равномерная, СП – симметричная привершинная, СФ – симметричная Ф-образная, СК – симметричная корневая, ПР – правобережная равномерная, ПП – правобережная привершинная, ПФ – правобережная Ф-образная, ПК – правобережная корневая, ЛР – левобережная равномерная, ЛП – левобережная привершинная, ЛФ – левобережная Ф-образная, ЛК – левобережная корневая сеть.

вия формирования их водоносности, продолжительности фаз водного режима [10]. Интегральный признак подобия рек по совокупности азональных факторов – густота речной сети водосборных территорий [11]. Соотношение суммарной длины водотоков и площади, на которой развивается их сеть, уменьшается на равнинных территориях, в условиях слаборасчлененного рельефа, при распространенности на водосборах легкопроницаемых пород, почвенного покрова с преобладанием частиц легкого механического состава. Увеличение густоты речной сети сопровождается значительным расчленением водосборов. При этом возрастает доля площади водосбора, занятая труднопроницаемыми отложениями, коренными породами, лесными массивами. В соответствии с изменением этого фактора происходит трансформация зональных значений стока (при  $F = \text{const}$ ).

## ПОДОБИЕ РЕЧНЫХ СИСТЕМ

Изменение осредненных стоковых, гидрографических и морфодинамических характеристик по длине средней и большой реки происходит за счет впадения малых водотоков. Ниже слияния рек эти изменения носят скачкообразный характер вследствие соответствующего изменения площади водосбора. Поэтому трансформация характеристик реки по ее длине зависит от типа рисунка речной сети [2, 12]. В общем случае речные сети имеют стволовой или древовидный рисунок

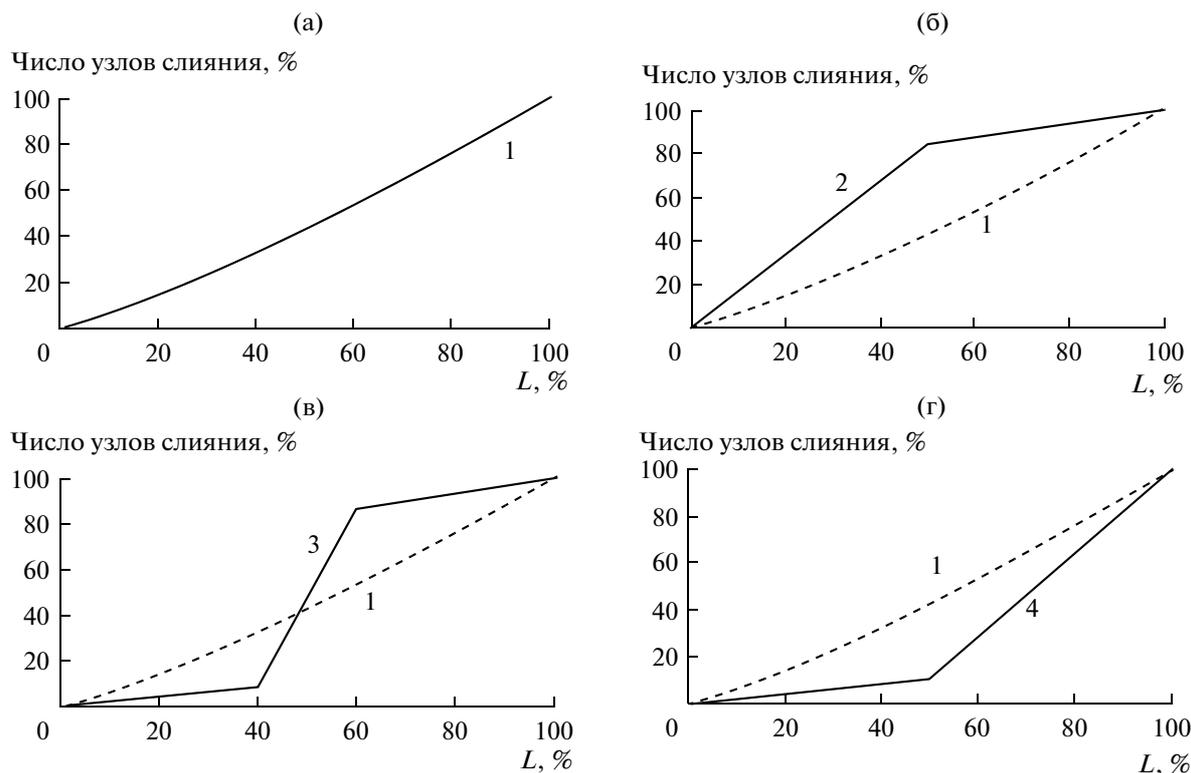
(рис. 1). Стволовые сети характеризуются довольно малым числом водотоков (часто одним). Такой рисунок сети возможен в самых верхних звеньях речной сети. При увеличении размера главной реки маловероятно сохранение стволового типа рисунка. Такой тип речной сети характерен для некоторых озерных рек.

Абсолютное большинство водосборных территорий имеет древовидную структуру речной сети. Степень ее выраженности определяется тем, симметрична она или нет, что зависит от соотношения площадей водосборов право- ( $F_{\text{пр}}$ ) и левобережных ( $F_{\text{л}}$ ) притоков. При условии  $F_{\text{пр}} \approx F_{\text{л}}$  древовидная речная сеть симметрична. Не менее часто формируются асимметричные русловые сети с  $F_{\text{пр}} \neq F_{\text{л}}$ . При выполнении неравенства

$$0.5 < \Sigma F_{\text{пр}} / \Sigma F_{\text{л}} < 2 \quad (1)$$

речную сеть можно считать симметричной. В случае  $\Sigma F_{\text{пр}} / \Sigma F_{\text{л}} < 0.5$  речная сеть имеет левостороннюю, а при  $\Sigma F_{\text{пр}} / \Sigma F_{\text{л}} > 2$  – правостороннюю асимметрию [2]. Классический пример асимметрии дают речные сети в бассейнах Оби (левосторонняя) и Енисея (правосторонняя асимметрия).

Тип рисунка речной сети зависит от регулярности впадения притоков в главную реку. При регулярном их впадении число узлов слияния водотоков в бассейне реки – возрастающая функция ее длины (рис. 2а). Большинство речных систем – квазиравномерные. Для них увеличение числа узлов слияния по длине главной реки мало отлича-



**Рис. 2.** Нарастание общего числа узлов слияния по длине главной реки при симметрично равномерном (а, 1), привершинном (б, 2), Ф-образном (в, 3) и корневом (г, 4) типе рисунка речной сети.

ется от аналогичного процесса, характерного для “идеальной” древовидности русловой сети. Если основные притоки реки сосредоточены в ее верховьях, то русловая сеть называется неравномерной привершинной (рис. 2б). Она характерна для случаев расположения верхней части бассейна реки в зоне избыточного (или достаточного) увлажнения, а средней и нижней – в аридной зоне. Неравномерный привершинный рисунок русловой сети имеет, например, р. Урал. Если основное количество притоков приурочено к среднему или нижнему течению главной реки, то такой рисунок сети считается неравномерным Ф-образным (рис. 2в) и корневым (рис. 2г). Такие рисунки русловой сети формируются относительно редко [12]. Ф-образный рисунок характерен для р. Яны, а корневой – р. Тобол.

### ПОРЯДКИ РЕКИ И ФРАКТАЛЫ

Степень изменения гидрологических характеристик по длине рек зависит не только от расположения притоков, но и от их размеров. В рамках структурной гидрологии относительные размеры притоков устанавливаются на основе сравнения порядков ( $N$ ) рек. Порядок реки – критерий подобия элементов (размера и структурного поло-

жения речной сети) относительно главной реки водосборной территории. Классическая схема для определения  $N$  (рис. 3а) широко используется при разработке структуры справочников, электронных баз данных. Она основана на учете только местоположения устья конкретного притока относительно главной реки и не учитывает размера этого притока. Притоки, непосредственно впадающие в главную реку, в рамках такой схематизации считаются притоками первого порядка. Притоки рек первого порядка считаются притоками второго порядка и т.д. По отношению к Волге Ока – река первого, Москва – второго, Яуза – третьего порядка. В результате оказывается, что реки Суда, Кострома, Ока, Кама и Еруслан имеют одинаковый (первый) порядок по отношению к Волге, существенно различаясь между собой по всем гидрологическим характеристикам. Это исключает использование данной схемы для определения относительных размеров всех водотоков, определяющих строение речных систем.

В максимальной степени этой задаче соответствует метод задания  $N$ , который предложен Р. Хортоном [23] и развит его последователями [19, 22, 26]. В соответствии с этим методом, рекой первого порядка ( $N = 1$ ) считается самый малый

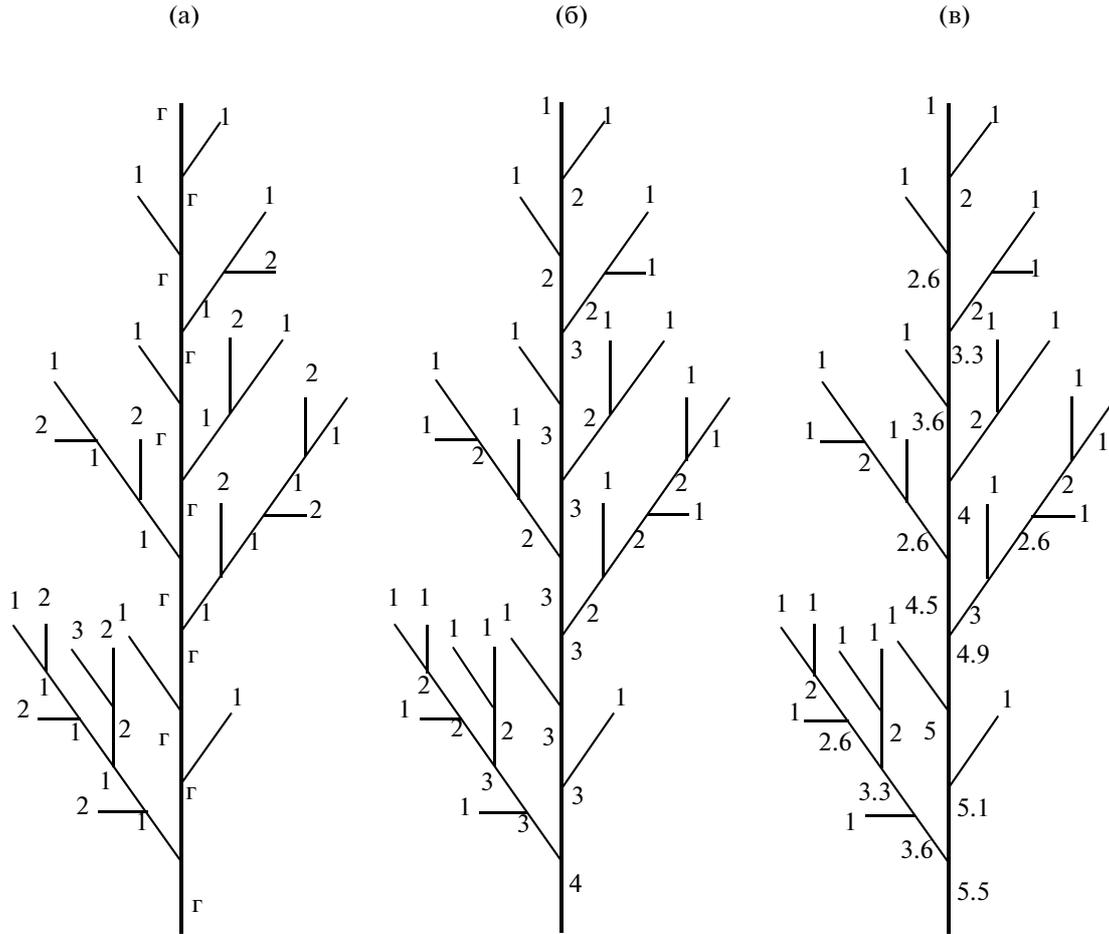


Рис. 3. Схемы (а – классическая, б – Стралера-Философова, в – Шейдеггера) для определения порядков рек (цифры на схемах); г – главная река.

водоток, не имеющий притоков. Слияние двух рек первого порядка образует реку второго порядка ( $N = 2$ ). Слияние двух рек второго порядка образует реку третьего порядка и т.д. (рис. 3б). В общем случае слияние двух рек одного порядка означает увеличение  $N$  образующегося водотока на единицу, а слияние двух рек разного  $N$  приводит к возникновению объединенного потока, у которого, по А. Шейдеггеру,

$$N_{ш} = 1 + \lg_2 P, \tag{2}$$

где  $P$  – количество рек первого порядка в речном бассейне выше створа определения  $N_{ш}$ . Лишь в частном случае  $N$  реки – целое число. Значения  $N$  у притоков Волги – Суды, Костромы, Оки, Камы и Еруслана различаются, составляя соответственно 10.8, 12.4, 15.1, 17.0 и 4.9.

Этим относительным размерам элементов русловой сети (порядкам) соответствуют вполне определенные и закономерно изменяющиеся длины  $L$  рек, площади их бассейнов  $F$ , водоносность и морфодинамические характеристики [2].

Например, при увеличении  $N$  реки на каждую единицу закономерно возрастает  $L$ , площадь водосбора, характерные значения стоковых характеристик, ширина межженного русла, ширина и площадь поймы, высота и длина формы руслового рельефа, уменьшается уклон реки. Это позволяет установить степень выраженности масштабных эффектов изменения гидрологических характеристик при изменении структурного размера рек. В аналитическом виде этот эффект учитывается коэффициентом бифуркации [19, 23] или коэффициентом масштабного изменения некоторой гидрологической характеристики  $X (K_X)$ :

$$K_X = \frac{X_{N+1}}{X_N}, \tag{3}$$

где  $X_N$  – значение характеристики, соответствующее реке порядка  $N$ ,  $X_{N+1}$  – порядка  $N + 1$ .

Коэффициенты масштабного изменения гидрологических характеристик рек зависят от типа этих характеристик и от ландшафтных условий

формирования и существования речных систем [2, 12]. Коэффициент масштабного изменения площади речного бассейна  $K_F$  при последовательном увеличении порядка реки на единицу постоянен для всех рек и равен 2.0. Это связано с особенностями определения порядка реки по уравнению (2), которое предполагает, что двукратное увеличение числа водотоков первого порядка  $P$  сопровождается аналогичным изменением площади водосбора. Нарушение этой закономерности возможно при аномальных значениях густоты водотоков. Чем больше густота речной сети  $d$ , тем меньше площадь водосбора  $F$ , необходимая для формирования реки некоторого порядка  $N$ .

Масштабные эффекты изменения характерны и для других гидрологических характеристик [2, 19]. Гидрографические, стоковые и морфодинамические характеристики реки  $X$  связаны с ее порядком  $N$  экспоненциальной зависимостью следующего типа [2]:

$$X = ae^{bN}, \quad (4)$$

где  $a, b$  – эмпирические параметры, изменяющиеся в зависимости от типа характеристики  $X$  и ландшафтов, в которых расположены бассейны рек. Сопоставление формул (3) и (4) дает

$$K_X = e^b, \quad (5)$$

или

$$b = \ln K_X. \quad (6)$$

Следовательно, значение параметра  $b$  выражает степень масштабного эффекта изменения характеристики  $X$  по длине реки в конкретных ландшафтных условиях ее водосбора. Для масштабного эффекта изменения площади водосбора с возрастанием порядка реки характерно равенство  $K_F = 2$ , независимо от ее географического расположения. Средний многолетний расход воды  $Q_0$ , равный произведению площади бассейна и среднего многолетнего модуля стока  $M_0$  при условии  $M_0(N) = M_0(N+1) = \dots = \text{const}$  (характерно для средних и больших рек), также возрастает в два раза при каждом последовательном увеличении  $N$  на единицу, т.е.  $K_{Q_0} = 2$ . Следовательно, параметр  $b$  в соотношении (4) равен 0.69, что подтверждают и обобщения эмпирических данных [2, 12].

Явные масштабные эффекты изменения гидрологических характеристик при усложнении речной сети водосборной территории свидетельствуют о самоподобии участков этой сети, ее отдельных элементов или об их фрактальности. Степень подобия геометрических объектов характеризует фрактальная размерность  $D_S$  [25].

Например,  $L$  р. Мзымты на картах масштабов 1 : 1000000, 1 : 500000, 1 : 200000, 1 : 100000, 1 : 50000 возрастает с уменьшением знаменателя ( $M$ ) в выражении масштаба карты в соответствии с соотношением

$$L = L_1 \left( \frac{M_1}{M} \right)^{0.028}, \quad (7)$$

где  $M_1 = 1000000$ ,  $L_1$  – длина реки на карте масштаба 1 : 1000000. Например, фрактальная размерность изменения длины р. Мзымты равна показателю степени  $D_{S_0} = 0.03$  в уравнении (7), для удобства откорректированному на 1 [25], т.е.  $D_S = D_{S_0} + 1 = 1.03$ . Для других природных условий величина фрактальной размерности может быть другой. Например, для р. Сторожки (приток р. Москвы)  $D_S = 1.10$ .

Самоподобны и другие гидрологические характеристики, сопоставляемые с некоторой довольно малой их величиной. Такими свойствами обладают, в частности, изменения количества  $n$  и суммарной протяженности рек  $\Sigma L$  с увеличением степени генерализации. При заданной минимальной длине рек  $L_{\min}$  и ее последовательном увеличении в 2 раза количество водотоков с  $L_i \geq L_{\min}$  и их суммарная длина закономерно уменьшаются. Исследование нескольких речных систем в пределах России показало, что для них характерны различия абсолютных значений этих характеристик (табл. 2), связанные с разнообразием природных условий на территориях, по которым они протекают, и с размером рек. Однако эти речные сети подобны друг другу при изменении этих характеристик при последовательном увеличении  $L_{\min}$ . На это указывает параллельность линий связи в координатах  $n$  и  $L_{\min}$  (рис. 4). Поэтому для рассматриваемых четырех речных систем в изменении общего количества водотоков по мере увеличения  $L_{\min}$  учитывается одна общая зависимость:

$$n_i = n_j \left( \frac{L_{\min j}}{L_{\min i}} \right)^{1.6}, \quad (8)$$

а в изменении суммарной протяженности рек с характерной длиной ( $L_i > L_{\min}$ ) – следующая зависимость:

$$\Sigma L_i = \Sigma L_j \left( \frac{L_{\min j}}{L_{\min i}} \right)^{0.71}. \quad (9)$$

Это означает, что фрактальная размерность для изменения количества рек равна 2.6, а для изменения протяженности речной сети – 1.7.

Из анализа формулы (2) и полученных выводов относительно изменчивости густоты речной сети следует, что количество водотоков  $P$  в произ-

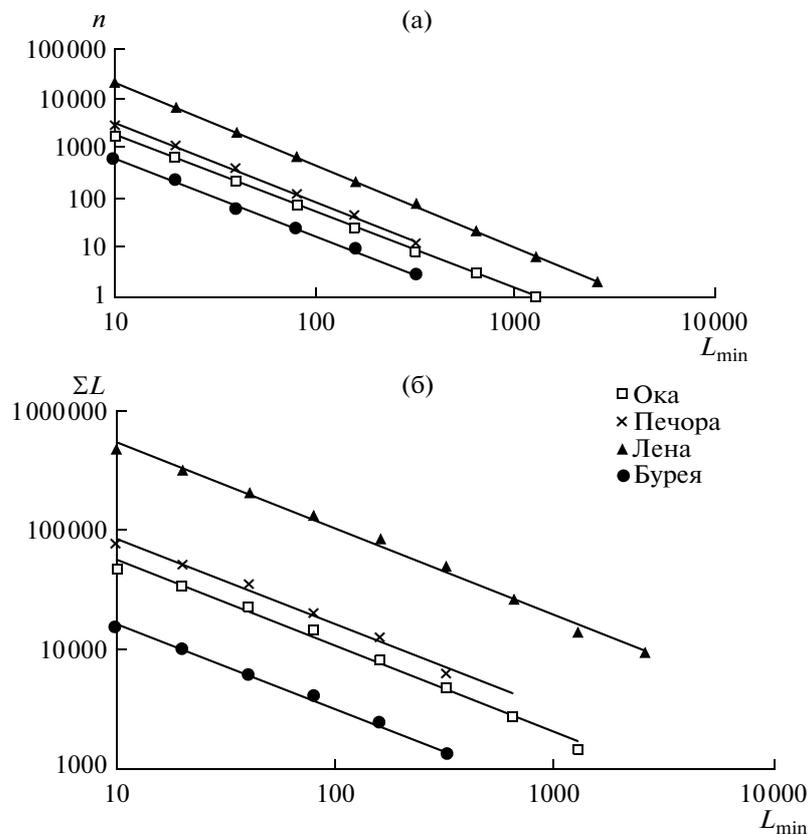
**Таблица 2.** Общее количество ( $n$ ) и суммарная протяженность ( $\Sigma L$ ) рек с длиной  $L \geq L_{\min}$  (прочерк – отсутствие данных)

$L_{\min}$	Бассейн реки							
	Ока		Печора		Лена		Буряя	
	$n$	$\Sigma L$	$n$	$\Sigma L$	$n$	$\Sigma L$	$n$	$\Sigma L$
10	1614	47028	2692	74933	18142	475626	631	15771
20	668	34324	1063	53059	6394	316658	222	10213
40	235	22803	385	34948	1981	200011	60	6010
80	79	14433	114	20291	658	128913	23	3980
160	24	8307	42	12552	225	82234	9	2410
320	8	4846	11	6165	74	49757	3	1310
640	3	2842	1	1809	22	27291	–	–
1280	1	1500	1	1809	6	14060	–	–
2560	–	–	–	–	2	9659	–	–

вольной части водосборного бассейна возрастает в зависимости от площади бассейна  $F$  и густоты речной сети  $d$  в соответствии с зависимостью

$$P = cF^a d^b, \quad (10)$$

где  $c, a, b$  – эмпирические коэффициенты.



**Рис. 4.** Изменение  $n$  (а) и  $\Sigma L$  (б) рек в бассейнах Оки, Печоры, Лены и Бурей при последовательном увеличении их длины  $L_{\min}$ .

Таблица 3. Статистические характеристики зависимости (8)

Название бассейна	Статистические характеристики					
	$m$	$a$	$b$	$C$	$\sigma$	$\sigma_0$
Верхняя Волга	81	1.04	1.68	-0.81	0.17	0.22
Печора	46	1.02	1.46	-1.14	0.15	0.27
Верхний Амур	34	0.98	1.79	-0.02	0.19	0.31
Средний Амур	54	0.99	1.83	-0.28	0.24	0.32
Нижний Амур	59	1.05	2.12	-0.65	0.20	0.24

Из сопоставления формул (2) и (7) следует:

$$N = a \log_2 F + b \log_2 d + C, \quad (11)$$

где  $C = 1 + \log_2 c$ . Универсальность зависимости (11) подтверждает обобщение данных по рекам в бассейне Верхней Волги, Печоры и Амура. Бассейн р. Амур был разделен на Верхний, Средний и Нижний для сокращения разницы в численности водотоков по сравнению с другими бассейнами. Определение для  $m = 274$  водосборов, находящихся в пределах этих крупных территорий, характерных для них значений  $N_i$ ,  $F_i$  и  $d_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) позволяет определить по зависимости (11) и на основе метода наименьших квадратов эмпирические параметры  $a$ ,  $b$  и  $C$  (табл. 3). Погрешности оценки этих параметров определялись по формуле [24]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-3} \sum_{i=1}^m (N_i - a \log_2 F_i - b \log_2 d_i - C)^2}. \quad (12)$$

Для объединенного ряда значений  $N$ ,  $F$  и  $d$  по всем 274 водосборам, находящимся в частных пяти бассейнах, использование метода наименьших квадратов дает обобщенное уравнение для расчета порядка реки в зависимости от определяющих факторов:

$$N = 1.05 \log_2 F + 1.75 \log_2 d - 0.55. \quad (13)$$

Стандартная оценка средней квадратической погрешности  $\sigma = 0.24$  свидетельствует о достаточно высокой эффективности использования формулы (13) для определения  $N$ , поскольку  $\Delta N = 0.24$  соответствует различию площадей бассейнов рек менее чем на 20%.

Структуру уравнения (13) подтверждает и теория фракталов. Из геометрического подобия всех элементов фрактала на плоскости [21] следует, что длина каждого элемента русловой сети  $L$  пропорциональна квадрату корню из значения площади его водосбора ( $L = \gamma F^{0.5}$ , где  $\gamma$  — общий коэффициент пропорциональности [16]). Анализ фактического соотношения между длиной реки и площадью ее водосбора показал, что коэффициент  $\gamma \approx 1.4$  [17]. Если число рек на территории бас-

сейна равно  $P$ , то средняя площадь каждой реки  $f_{cp} = F/P$ , а средняя длина  $l_{cp} = L_n/P$ , где  $L_n$  — протяженность русловой сети. При выполнении для  $f_{cp}$  и  $l_{cp}$  условия геометрического подобия  $l_{cp} = \gamma \sqrt{f_{cp}}$  возведение в квадрат обеих частей уравнения  $l_{cp} = \gamma \sqrt{f_{cp}}$  приводит к соотношению

$$\frac{L_n^2}{P^2} = \gamma^2 \frac{F}{P}. \quad (14)$$

С учетом равенства  $L_n = dF$  из уравнения (14) получаем

$$P = \frac{1}{\gamma^2} d^2 F. \quad (15)$$

При значении  $\gamma \approx 1.4$  приходим к полуэмпирической формуле

$$P = 0.5 d^2 F. \quad (16)$$

Из формул (2) и (16) получаем величину порядка реки

$$N = \log_2 F + 2 \log_2 d. \quad (17)$$

Полуэмпирическая формула (17) лишь незначительно отличается от обобщенной формулы (13), что подтверждает ее эффективность для рек, находящихся в разных природных условиях. Среднее отклонение фактических значений  $N$  от величин, рассчитанных по формуле (17), мало отличается от нуля. Для пяти бассейнов, представленных в табл. 3, коэффициент корреляции между фактическими и рассчитанными по формуле (17) значениями  $N$  превышал 0.95. Эффективность этой формулы характеризует средняя квадратическая погрешность  $\sigma_0$ , рассчитанная по формуле (12) при  $a = 1$ ,  $b = 2$  и  $C = 0$ . Разность  $m - 3$  в знаменателе подкоренного выражения (12) можно заменить на  $m$ , так как ни один из параметров формулы (17) не оценивался по данным о водосборах рассматриваемых бассейнов. Значения  $\sigma_0$  несколько превышают значения погрешностей  $\sigma$  для случая использования зависимостей вида (13) со специально подобранными для каж-

дого бассейна значениями параметров. Однако значения  $\sigma_0$  достаточно малы по сравнению со значениями  $N$  рек. Вычисленная по всем 274 водосборам общая  $\sigma_0$  для формулы (17) равна 0,27, что указывает на высокую эффективность универсальной зависимости между  $N$  реки,  $F$  и густотой речной сети. При  $F = \text{const}$   $N$  реки – возрастающая функция  $d$  речной сети: чем больше  $d$ , тем больше  $N$ . Густота речной сети определяет условия для изменения характеристик речного стока по длине русловых систем. При прочих равных условиях большей густоте речной сети соответствуют более полноводные реки.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРЯДКОВ РЕК В ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

Соответствие площади водосбора, густоты речной сети, порядков рек и их водоносности  $Q_0$  создает методическую основу для определения  $Q_0$  неизученных (в гидрологическом отношении) водотоков. Возможности этого метода гидрологических расчетов изучены по российской части бассейна р. Амур. Использование данных существующей сети гидрологических наблюдений (табл. 4) позволяет обосновать зависимость  $Q_0$  от  $N$  для изученных рек и использовать ее для расчета среднего многолетнего стока для неизученных рек региона. Зависимость имеет следующий вид:

$$Q_0 = 0.024e^{0.69N}. \quad (18)$$

Коэффициент корреляции равен 0,97. Несмотря на большое разнообразие физико-географических условий в российской части бассейна р. Амур ( $F = 1.03$  млн км<sup>2</sup>, длина реки превышает 2000 км, ширина бассейна – 1300 км, диапазон изменения абсолютных высот – 2370 м, резко континентальный климат на западе и муссонный на востоке бассейна), корреляционная связь между  $Q_0$  и  $N$  достаточно тесная.

Наличие на исследуемой территории рек разного размера затрудняет пространственный анализ изменения  $Q_0$ . Для устранения этой проблемы можно использовать процедуру приведения искомым гидрологической характеристики к некоторому значению  $N$  реки, например к  $N = 10$ . Для этого достаточно рассчитать отношения значений фактических расходов воды к рассчитанным их величинам по уравнению (18) и откорректировать их с учетом оценок  $Q_0$  по зависимости (18) при  $N = 10$ , т.е.

$$Q_{10} = \frac{Q_0(N)}{0.024e^{0.69N}} (0.024e^{0.69 \times 10}) \quad (19)$$

или

$$Q_{10} = \frac{Q_0}{e^{0.69(N-10)}}. \quad (20)$$

Поскольку в этой зависимости отсутствует параметр  $a$ , равный для бассейна р. Амур 0,024, а параметр  $b = 0.69$ , для получения среднего многолетнего расхода воды  $Q_{10}$ , соответствующего реке с  $N = 10$ , достаточно знать лишь значения  $Q_0$  и  $N$ .

На основе данных табл. 4, относящихся к средним рекам (с пренебрежимо малой ролью местных и полизональных факторов), можно оценить пространственное распределение значения  $Q_{10}$  (рис. 5а) и средних многолетних модулей стока (рис. 5б). Средние многолетние расходы воды  $Q_{10}$  в основном находятся в диапазоне 20–30 м<sup>3</sup>/с. В центральной части бассейна (от узла слияния рек Шилки и Аргуни до бассейна р. Бира) значения  $Q_{10}$  увеличиваются, достигая максимума в правобережной части бассейна Нижней Зеи (90 м<sup>3</sup>/с). Прямая подстановка  $N = 10$  в уравнение (18) дает значение 24 м<sup>3</sup>/с, что соответствует небольшому отклонению фактических значений нормы стока от рассчитанных значений по уравнению (18).

Характер изменения значений  $M_0$  отличается от изменения значений  $Q_{10}$ . Модули стока (рис. 5б) изменяются от 2 в западной части бассейна до 16 л/(с км<sup>2</sup>) в восточной по мере перехода от резко континентального климата к муссонному. Увеличение модулей стока характерно и для горных территорий в пределах российской части бассейна Амура. С юга на север территории величина  $M_0$  закономерно увеличивается вследствие изменения зонального соотношения между приходными и расходными составляющими водного баланса.

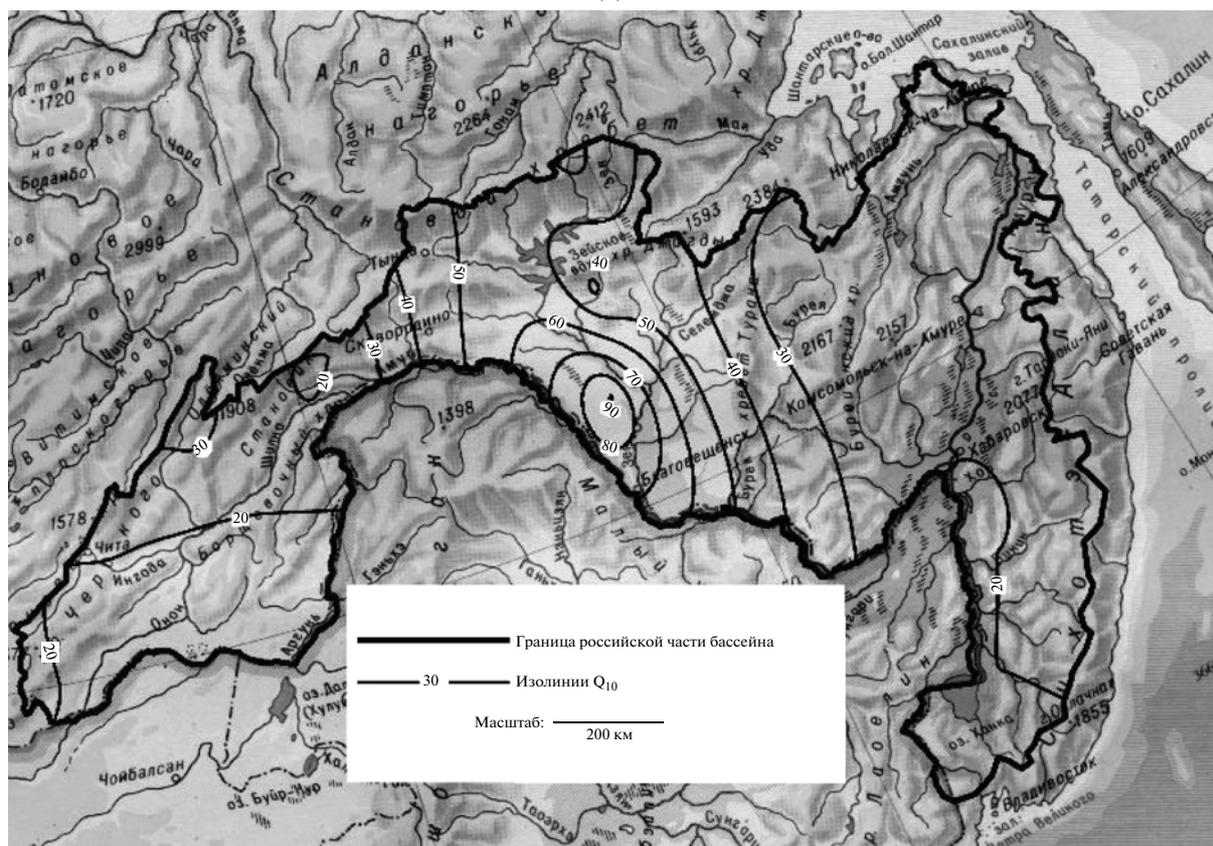
Это означает, что многие факторы, влияющие на увеличение стока (смена резко континентального климата на муссонный, увеличение средней высоты водосбора), влияют и на порядок реки через увеличение густоты речной сети  $d$ . Средняя величина  $d$  для российской части бассейна р. Амур равна 0,55 км/км<sup>2</sup>. В западной части бассейна она составляет 0,2–0,3, в восточной – увеличивается до 0,7, а в горной части – до 0,9 км/км<sup>2</sup>. В соответствии с уравнением (17) увеличение  $d$  при  $F = \text{const}$  приводит к аналогичному изменению  $N$ . Поэтому увеличение  $Q_0$  и  $M_0$  сопровождается возрастанием  $N$ , что уменьшает отклонения расчетных значений  $Q_0$  от фактических расходов воды. В центральной части бассейна значения фактических расходов воды оказываются больше рассчитанных значений. Это объясняется уменьшением густоты речной сети в правой части низовья бассейна р. Зеи. Уменьшение параметра  $d$  в данном случае не сопровождается аналогичным изменением

Таблица 4. Гидрологические данные по рекам российской части бассейна Амура

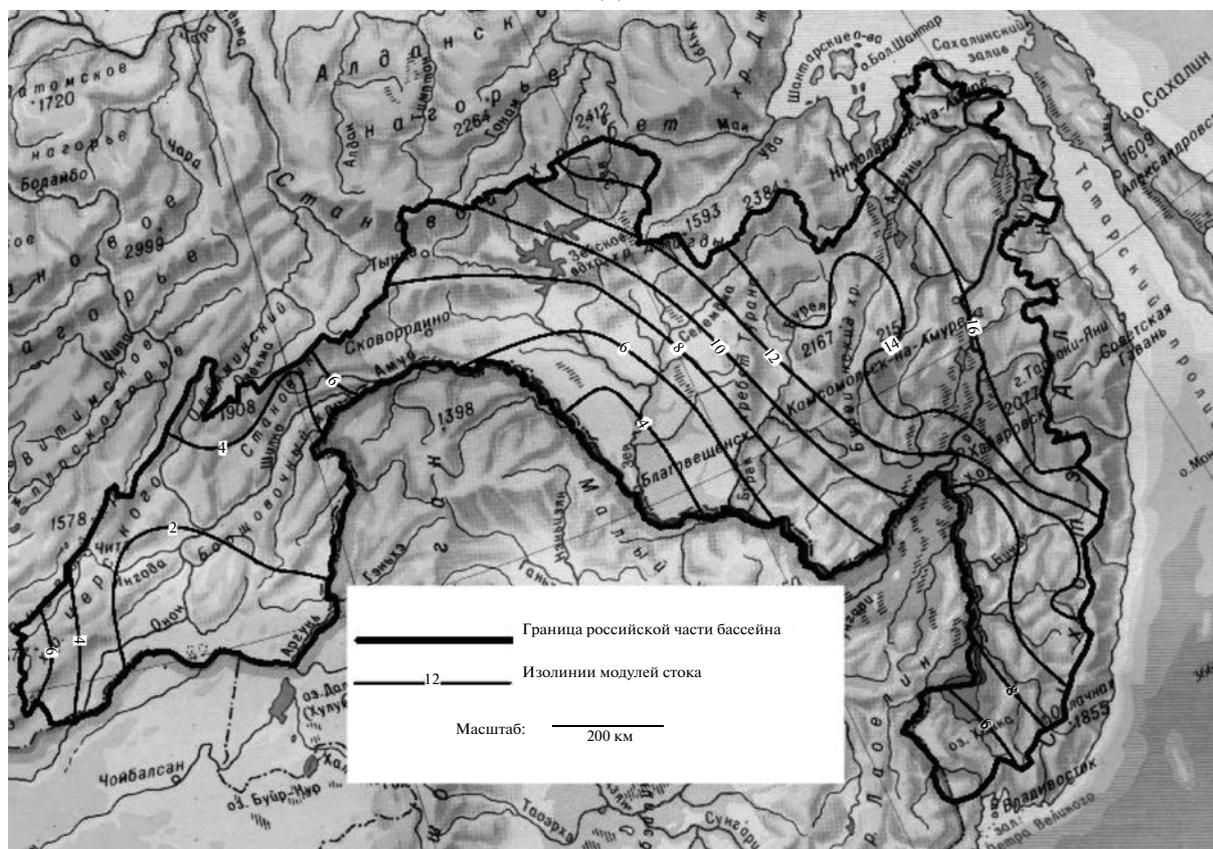
Река	Пост	Период наблюдений, годы	$F$ , км <sup>2</sup>	$N$	$Q_0$ , м <sup>3</sup> /с	$M_0$ , л/(с м <sup>2</sup> )	$Q_{10}$ , м <sup>3</sup> /с
Урулюнгуй	ст. Маргуцек	1965–2008	3540	6.6	1.83	0.5	20
Верхняя Борзя	с. Бырка	1963–2008	2280	7.4	3.12	1.4	19
Газимур	с. Батакан	1959–2008	7140	10.3	22	3.1	18
	с. Александровский завод	1958–2008	811	6.9	1.68	2.1	15
Тайна	с. Тайна	1963–1997	297	6.4	1.12	3.8	14
Кыра	с. Кыра	1963–2008	5100	10.3	24.6	4.8	21
Учирка	с. Бытев	1963–2008	462	6.8	0.61	1.3	6
Иля	с. Иля	1963–2008	1370	7.9	4.18	3.1	18
Борзя	г. Борзя	1942–2008	3980	8.4	3.26	0.8	10
Турга	с. Бырка	1963–2008	2810	7.2	1.92	0.7	14
Ага	с. Агинское	1963–2008	2190	8.1	2.71	1.2	10
Могойтуй	ст. Могойтуй	1963–2008	580	4.7	0.73	1.3	29
Хила	ст. Ага	1963–2008	1490	5.6	0.74	0.5	16
Ингода	с. Атамановка	1941–2008	22000	12.4	87	4.0	16
	с. Дешулан	1951–2008	6130	11.1	45.5	7.4	21
Читинка	г. Чита	1941–2008	4170	8.7	10.8	2.6	26
Нерча	с. Нерчинск	1948–2008	27500	11.7	94.0	3.4	29
	с. Кыкер	1957–2008	13200	10.9	64.4	4.9	35
Амазар	ст. Амазар	1963–2008	8150	10.6	30.4	3.7	19
Могоча	с. Могоча	1963–2008	1340	9.0	8.55	6.4	17
Большая Чичатка	ст. Амазар	1963–2008	2830	10.1	20.8	7.4	20
Большой Невер	г. Сквородино	1963–2008	563	6.8	2.74	4.9	26
Зея	с. Бомнак	1933–1982	29200	12.8	323	0.27	47
	с. Белогорье	1963–2008	229000	15.8	1740	7.6	32
Ток	Приток Николаевский	1963–2000	3820	9.8	56.8	14.9	64
Гилюй	У перевоза	1942–2008	21100	13.1	193	3.06	23
Деп	Зимовье Рычково	1963–2008	8440	10.8	64.5	7.6	38
Селемджа	с. Усть-Ульма	1940–2008	67000	14.3	648	9.7	32
Большая Пера	с. Дмитровка	1963–2008	3180	7.0	11.6	3.6	91
Малая Пера	с. Сукромли	1962–2008	913	4.2	4.39	4.8	250
Томь	с. Светиловка	1950–2008	16000	10.6	84	5.3	56
Бурья	с. Усть-Ниман	1949–2008	26500	14.0	386	14.6	25
	с. Камнка	1911–2002	67400	14.9	882	13.1	29
Ниман	В 12 км от устья	1963–2008	14500	13.2	216	14.9	23
Илистая	с. Иваново	1959–2008	998	8.7	7.73	7.7	19
	с. Халкидон	1942–2008	4030	10.3	19.6	4.9	16
Абрамовка	с. Абрамовка	1956–2008	839	6.0	3.07	3.7	49
Осиновка	с. Осиновка	1954–2008	289	6.2	1.20	4.2	16
Молоканка	с. Жариково	1952–2008	390	7.5	2.39	6.1	14
Большая Уссурка	с. Вагутоно	1928–2008	23000	13.6	275	12.0	23
	с. Рошино	1928–2008	18500	13.2	225	12.2	24
Малиновка	с. Ракитное	1915–2008	4730	11.2	48.6	10.3	22
Ореховка	пос. Поляны	1967–2008	1790	7.7	7.05	3.9	35
Бикин	ст. Звеньевая	1945–2008	21400	13.2	237	11.1	26
Горбун	с. Пушкино	1953–2008	143	6.4	1.13	7.9	14
Подхоренок	с. Дормидонтовка	1952–2008	2330	10.2	19.4	8.3	17
Хор	пос. Хор	1930–2008	24500	14.0	394	16.1	24
	пос. Среднехорский	1964–2008	14500	13.4	248	17.1	24
Тунгуска	с. Архангеловка	1929–2008	29400	13.7	386	1.34	30
Кур	с. Новокуровка	1929–2008	11400	12.8	170	14.9	25
Амгунь	с. Каменка	1963–2007	21300	13.2	269	12.6	29
	с. Гуга	1942–2007	41300	14.0	468	1.45	29

Рис. 5. Распределение средних многолетних расходов воды, приведенных к  $N = 10$ , (а) и средних многолетних модулей стока (б) по территории российской части бассейна Амура.

(а)



(б)



$M_0$ , что, вероятно, связано с геологическими ограничениями развития русловой сети. Поэтому значения  $N$  при  $F = \text{const}$  оказываются меньше, а фактические величины средних многолетних расходов воды – больше рассчитанных по уравнению (18) значений.

Для оценки возможности использования пространственного изменения значений  $Q_{10}$  в гидрологических расчетах проведена проверка точности карты (рис. 5а) на независимом материале для бассейна р. Амур с использованием метода выбрасываемой точки [24]. Для центра водосбора каждой средней реки линейной интерполяцией по ближайшим (расположенным с разных сторон от центра) четырем смежным изученным водосборам определялось значение  $Q_{10}$ . При отсутствии фактических значений  $Q_{10}$  для водосбора с какой-либо стороны от центра данного бассейна искомая величина определялась по двум ближайшим створам наблюдений с учетом расстояния  $R$  до центра данного водосбора, т.е.

$$Q_{10} = \frac{Q_{10.1}R_2 + Q_{10.2}R_1}{R_1 + R_2}, \quad (21)$$

где  $Q_{10.1}$ ,  $Q_{10.2}$  – значения  $Q_{10}$  для двух ближайших пунктов наблюдений;  $R_1$  и  $R_2$  – расстояния от центра водосбора до этих створов. С учетом этих данных и формулы (20) легко получить расчетные значения среднего многолетнего расхода воды  $Q_P$ :

$$Q_P = Q_{10}e^{0.69(N-10)}. \quad (22)$$

Точность карты (рис. 5а) в этом случае характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  фактических  $Q_{\Phi}$  и рассчитанных  $Q_P$  средних многолетних расходов воды:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{\Phi,i} - Q_{P,i}}{Q_{\Phi,i}} \right)^2}{n} \times 100\%, \quad (23)$$

здесь  $n$  – количество пунктов наблюдений, по которым проводилась проверка. Величина  $\sigma$  для исследуемого региона оказалась равной 37%. При аналогично проведенной проверке оценки  $Q_0$  по карте среднего многолетнего модуля стока (рис. 6б)  $\sigma = 66\%$ . Это означает, что величина порядка реки – важный предиктор расчетных зависимостей оценки характеристик стока неизученных рек.

## ВЫВОДЫ

Наличие индивидуальных гидрологических свойств у каждой реки не противоречит возможности существования критериев и признаков подобия рек, речных систем и гидрологических процессов. Признаки подобия могут быть связаны с

зональными и а зональными факторами изменения гидрологических характеристик. Важнейший гидрографический критерий подобия рек – их порядок, определенный в рамках концепции Р. Хортона. В современной интерпретации методики определения порядка реки, по А. Шейдеггеру, величина этого критерия определена величиной площади бассейна и густотой речной сети. Характер связи между этими переменными универсален для разных ландшафтных условий. Чем больше площадь бассейна и густота речной сети, тем больше порядок главной реки. Количество и суммарная протяженность рек уменьшаются при переходе от мелких элементов речной сети к крупным. Характер этого процесса не зависит от физико-географических условий, в которых находятся реки. Порядок реки определяет величину ее среднего многолетнего расхода воды. Для российской части бассейна Амура связь переменных учитывает экспоненциальное уравнение при корреляционном отношении 0.97. Для определения средних многолетних расходов воды неизученных рек этого бассейна можно использовать картографические обобщения, характеризующие распределение величин среднего многолетнего расхода воды, приведенных к значению порядка реки  $N = 10$ . Проверка этой методики на независимом материале показала, что точность оценки  $Q_0$  сопоставима с точностью, обеспеченной использованием ранее выполненных картографических обобщений в отношении распределения среднего многолетнего модуля стока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: МГУ, 1998. 202 с.
2. Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Косицкий А.Г. Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, Общество, Окружающая среда. М.: Городец, 2004. Т. VI. С. 345–374.
3. Алексеевский Н.И., Гончаров А.В., Ефремов П.В. Подобие и гидроэкологические особенности малых рек и водосборных территорий // Гидроэкология: теория и практика. М.: МГУ, 2004. С. 38–60.
4. Андреянов В.Г. Внутригодовое распределение речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 328 с.
5. Антипов А.Н., Корытный Л.М. Географические аспекты гидрологических исследований. Новосибирск, 1981. 174 с.
6. Атлас расчетных гидрологических карт и номограмм. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 28 с.
7. Глушков В.Г. Географо-гидрологический метод. Л.: Об-ние науч.-техн. изд-в Нар. ком. тяжелой промышленности СССР, 1933. 7 с.

8. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. 36 с.
9. *Догановский А.М., Малинин В.И.* Гидросфера Земли. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. 630 с.
10. *Евстигнеев В.М.* Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
11. *Евстигнеев В.М., Шенберг Н.В.* О возможностях оценок характеристик стока по структурным показателям речных систем // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. № 4. 2000. С. 38–42.
12. *Косицкий А.Г.* Масштабные эффекты изменения стока в различных природных условиях // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2003. 25 с.
13. *Косицкий А.Г.* Особенности формирования речного стока в разных природных условиях // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1999. № 1. С. 56–60.
14. *Косицкий А.Г., Ретеюм К.Ф., Чуткина Л.П., Шенберг Н.В.* Масштабные эффекты изменения стока по длине речных систем // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. Вып. 1. М.: МГУ, 1999. С. 141–156.
15. *Кузин Л.С., Бабкин В.И.* Географические закономерности гидрологического режима рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 200 с.
16. *Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А.* Гидрология. М.: Высш. шк., 2008. 463 с.
17. *Нежиховский Р.А.* Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 476 с.
18. Оценка ресурсов и качества поверхностных вод (на примере Московского региона) / Под ред. Скорнякова В.А., Эдельштейна К.К. М.: Изд-во МГУ, 1989. 196 с.
19. *Ржаницын Н.А.* Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 240 с.
20. *Соколовский Д.Л.* Речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 538 с.
21. *Федер Е.* Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
22. *Философов В.П.* О значении порядков долин и водораздельных линий при геолого-географических исследованиях // Вопр. морфометрии. Вып. 2. 1967. С. 4–66.
23. *Хортон Р.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: Иностранная лит., 1948. 158 с.
24. *Христофоров А.В.* Надежность расчетов речного стока. М.: МГУ, 1993. 168 с.
25. *Mandelbrot B.B.* The fractal Geometry of Nature. N.Y.: Freeman, 2002. 666 p.
26. *Schidegger A.E.* Theoretical Geomorphology. N.Y.: Springer, 1961. 333 p.