

УДК 551.4

*В.В. Скрипко*

## Особенности структуры речных бассейнов равнинной части Алтайского края

*V.V. Skripko*

## Characteristics of Structure of River Basins in a Flat Part of the Altai Territory

На основе анализа территориальной структуры с использованием структурных индексов рассмотрены особенности внутреннего строения речных бассейнов равнинных районов Алтайского края, контролирующее пространственное распределение потоков воды и наносов.

**Ключевые слова:** бассейновый анализ, структурные индексы: длин, площадей, уклонов, бифуркации, бассейны третьего порядка.

**Введение.** Определение параметров рельефообразующих процессов, исходя из структуры геоморфологической системы, относится к проблемам, имеющим большое теоретическое и прикладное значение в геоморфологии. В этом отношении особый интерес представляют речные бассейны, которые можно рассматривать как большие сложные системы, контролирующие потоки вещества и энергии. Структура этих систем, в свою очередь состоящих из вложенных подсистем – бассейнов более низкого иерархического уровня, определяется элементами, к которым относятся иерархически упорядоченные русла разных порядков и опирающиеся на них фасетки склонов. Подсистемы, обладающие похожей структурой, будут характеризоваться аналогичными характеристиками потоков вещества и энергии между своими элементами, а также сходной реакцией на внешние воздействия.

**Объект и методы исследования.** Объектом исследования являются бассейны рек Кулунды, Касмалы и Барнаулки, расположенных в равнинной части Алтайского края. Река Кулунда принадлежит области внутреннего стока с базисом эрозии в виде Кулундинского озера, а Касмала и Барнаулка – левые притоки Оби.

Методологической базой исследования стал морфометрический анализ речных бассейнов, который принято называть Хортон-анализом [1]. В его основе – разделение речных бассейнов на группы в зависимости от порядка главного русла. Хортон-анализ постоянно совершенствуется, имеется ряд его модификаций. Нами использовался подход, разработанный независимо друг от друга А. Стралером и В.П. Философовым [2].

This article considers the analysis of the territorial structure with the features of the structural indices of the internal structure of river basins in the plains of the Altai Territory, which control the spatial distribution of water flow and sediment transport.

**Key words:** basin analysis, structural indices: lengths, areas, slopes, bifurcation, third-order basins.

В системе Стралера-Философова, как и у Р. Хортон, водоток (или русло временного водотока), не получающий притоков, относится к руслам 1-го порядка. Два русла 1-го порядка, сливаясь, дают начало водотокам 2-го порядка. По этому правилу ниже узла слияния любых однопорядковых водотоков начинается русло более высокого порядка (порядок увеличивается на единицу). При слиянии разнопорядковых водотоков образованный ниже узла их слияния водоток сохраняет тот порядок, который был у водотока, являвшегося до слияния более старшим (рис. 1) [1].

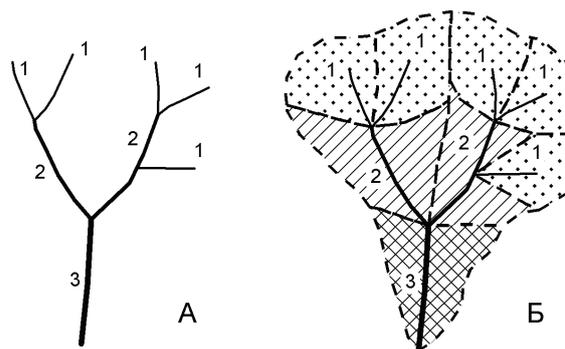


Рис. 1. Определение порядков водотоков в системе Стралера-Философова (А) и схема разделения склонов в зависимости от порядка русла, на которое они опираются в пределах водосборного бассейна 3-го порядка (Б)

В основе анализа внутренней структуры речного бассейна лежат подход и методика, разрабатываемые исследовательским коллективом геоморфологов под руководством Ю.Г. Симонова [3]. По этой мето-

дикое в пределах бассейнов исследуемых рек определены следующие характеристики: порядки водотоков, их длины и уклоны, площади водосборов. В качестве операционной единицы бассейнового анализа авторами методики рекомендованы бассейны 3-го порядка, для которых рассчитываются следующие структурные индексы [1, 3, 4]:

1) индекс структуры бифуркации – параметр, определяющий наличие и соотношение в пределах каждого бассейна водотоков разного порядка. Для этого вычисляется количество разнопорядковых тальвегов, а цифра индекса означает, сколько водотоков более низкого порядка приходится в среднем на один водоток более высокого порядка (например, индекс бифуркации 124 означает, что в этом бассейне есть 1 водоток 3-го порядка, на который приходится 2 водотока 2-го порядка, на каждый из которых в среднем приходится 4 водотока 1-го порядка);

2) индекс структуры площадей – соотношение площадей бассейнов разных порядков (т.е. индекс 532 означает, что 50% площади всего бассейна приходится на водосборы 1-го порядка, 30% – на фасетки склонов, опирающихся на русла 2-го порядка, и 20% – на фасетки склонов, опирающихся на русла 1-го порядка);

3) индекс структуры длин – соотношение средних длин водотоков разных порядков – для каждого порядка вычисляется средняя длина водотока, а потом они между собой сопоставляются по принципу, описанному для индексов структуры площадей;

4) индекс структуры уклонов – для каждого порядка вычисляется средний уклон водотока, а потом они между собой сопоставляются по принципу, описанному для индексов структуры площадей.

Проведение водотоков, определение порядков и расчет структурных индексов выполнены в ArcGIS на основе цифровой модели рельефа SRTM-90 с разрешением пикселя на местности 90×60 м, что приблизительно соответствует масштабу 1:230000.

Выделение русловой сети на основе растровой цифровой модели рельефа имеет свои особенности, которые применительно к решаемым нами задачам следует оговорить отдельно. Дело в том, что растровая линейная сеть, соответствующая руслам водотоков, вычисляется в ГИС на основе так называемого растра «аккумуляции стока», или «суммарного стока». Каждая ячейка этого растра содержит информацию о количестве вышерасположенных в рельефе ячеек, сток из которых проходит через нее.

В настоящее время существуют два основных способа расчета дренажной сети на основе растра аккумуляции стока [5]. Первый способ предполагает, что исследователь задает некоторое пороговое значение, выраженное через минимальное количество ячеек растра или минимальную водосборную пло-

щадь (кв. км), которые дают поверхностный сток. По умолчанию предполагается, что условия формирования стока (количество осадков, водопроницаемость грунтов, влажность насыщения, растительность и др.) являются однородными по всей территории.

В рамках второго способа необходимо задать вручную положение всех точек, соответствующих «источкам» рек. Этот способ наиболее точен, но одновременно и наименее поддающийся автоматизации [5].

Нами был использован первый способ, в рамках которого при построении модели речной сети на основе растра аккумуляции стока пороговая величина выделения ячеек, составляющих русловую сеть, была принята равной 1000. Такое большое пороговое значение связано с тем, что в ходе работы были выявлены некоторые ограничения использования цифровой модели рельефа SRTM-90 для автоматического выделения речной сети средствами ГИС. В частности, из-за того, что на этой цифровой модели рельефа отражена растительность и искусственные сооружения, а не только рельеф земной поверхности, по ней оказалось невозможным достоверно выделить верхние звенья речной сети. В проблемных случаях применялась ручная коррекция.

**Основные результаты и выводы.** Из рассматриваемых в принятом масштабе исследований речных бассейнов наибольшим 6-м порядком в своей приустьевой части обладает Кулунда. Барнаулка имеет 5-й, а Касмала – 4-й порядок.

Полученное распределение склонов по порядкам характеризует долю воды, стекающей с соответствующих склонов в русла, и особенности питания русел наносами, из которых в дальнейшем формируется аллювий.

Структура площадей склонов разного порядка в исследуемых бассейнах была сопоставлена с таковой в модальном бассейне (табл. 1). Модальный тип бассейна с наиболее часто встречающейся структурой не зависит от происхождения бассейна, структурно-тектонических и ландшафтно-климатических условий [3]. Он может рассматриваться как некоторый «эталон» для сопоставления с реальным бассейном.

Сравнивая структуру площадей склонов разного порядка в исследуемых бассейнах со структурой площадей в модальном бассейне, можно заметить, что она отклоняется как в большую, так и в меньшую сторону на некоторую величину, которая будет являться своего рода показателем площадной аномальности. Например, во всех бассейнах отмечается завышенная доля водосборов 1-го порядка.

Изучение причин и геоморфологических следствий такого рода отклонений может стать предметом специального исследования, которое выходит за рамки нашей работы.

Таблица 1

Сопоставление распределения склонов различного порядка в бассейнах Барнаулки, Касмалы и Кулунды с модальным речным бассейном

Порядок склонов	Площадь, кв. км	Доля от общей площади в бассейне, %	Доля от общей площади в модальном речном бассейне [3], %	Величина отклонения от модального значения, %
р. Барнаулка				
1	3664,2	63,5	50	+13,5
2	1084,3	19,0	25	-6,0
3	242,6	4,0	12	-8,0
4	15,6	0,5	6	-5,5
5	758,9	13,0	3	+10,0
р. Касмала				
1	1491,7	58,0	50	+8,0
2	750,2	29,0	25	+4,0
3	138,5	5,0	12	-7,0
4	212,4	8,0	6	+2,0
р. Кулунда				
1	12987,8	65,5	50	+15,5
2	4115,6	18,0	25	-7,0
3	2212,5	8,0	12	-4,0
4	1308,9	5,0	6	-1,0
5	463,27	2,0	3	-1,0
6	529,53	1,5	1,5	0,0

В пределах бассейнов Кулунды, Касмалы и Барнаулки с учетом выше оговоренных условий выделено 57 бассейнов 3-го порядка, из них 33 (58%) приходится на бассейн Кулунды, 4 (7%) – Касмалы, 20 (35%) – Барнаулки. Чтобы более полно исследовать выделенные бассейны, потребовалось уменьшить их количество, объединив в классы, на основе занимаемой площади. Площадь водосбора является одной из наиболее информативных характеристик, поскольку именно она определяет количество поступающих в русло воды и рыхлых отложений. С площадью речного бассейна связаны длина пройденного пути и затрачиваемое время на перемещение воды и наносов со склонов в русла. В качестве способа разделения нами выбрано среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) величины площади бассейна 3-го порядка от среднего значения в большую и меньшую стороны (рис. 2, 3).

Если проанализировать распределение по площади однопорядковых речных бассейнов, то можно увидеть, что бассейны с наиболее часто встречающимися значениями формируют своеобразный «фон», на котором выделяются бассейны с меньшей и большей площадью. Первые из них, несмотря на малую площадь, все же имеют достаточно сложную сеть русел, чтобы набрать необходимый порядок. Вторые – напротив, при значительной площади так и не смогли набрать необходимое количество водотоков и их ветвление, чтобы перейти в другой, более высокий порядок [3].

В нашем случае «фоновым» будет класс со значением  $\sigma = -0,5 - 0,5$  (60% общего числа бассейнов 3-го порядка) (см. рис. 2). При этом наблюдается асимметрия распределения: количество бассейнов с площадью меньше «фоновой» (1 класс, 25%) превосходит количество тех бассей-

нов, у которых площадь больше (3 класс, 9%). Бассейны 4 и 5-го классов выделяются аномально большими размерами, их доля составляет в сумме 6%. Такое распределение обычно указывает на действие какого-то внешнего фактора (климатического, тектонического и др.).

После был произведен расчет структурных индексов для всех 57 бассейнов. В таблице 2 приведены структурные индексы для некоторых бассейнов 3-го порядка в пределах речных бассейнов Кулунды, Барнаулки и Касмалы.

На основе рассчитанных с помощью структурных индексов соотношений распределения водосборных площадей, длин, уклонов, а также особенностей ветвления разнопорядковых водотоков установлены особенности внутреннего строения бассейнов 3-го порядка, контролирующее пространственное распределение потоков воды и наносов.

Например, индексы структуры площадей позволяют сравнить однопорядковые бассейны между собой по распределению поступающих со склонов наносов в главное русло. Так, в бассейне Кулунды более или менее равномерное распределение наносов характерно для бассейна 4-го класса с индексом структуры площадей, равном 532, такое значение индекса структуры площадей соответствует модальному бассейну по Ю.Г. Симонову [3]. У других бассейнов Кулунды и Барнаулки (индексы структуры площадей – 712, 721, 811), по сравнению с ним, питание главного русла наносами идет за счет верхних звеньев (на долю верхних приходится соответственно 70, 70, 80% водосбора), а в питании наносами нижнего звена русла доля местного пополнения рыхлым материалом со склонов снижена.

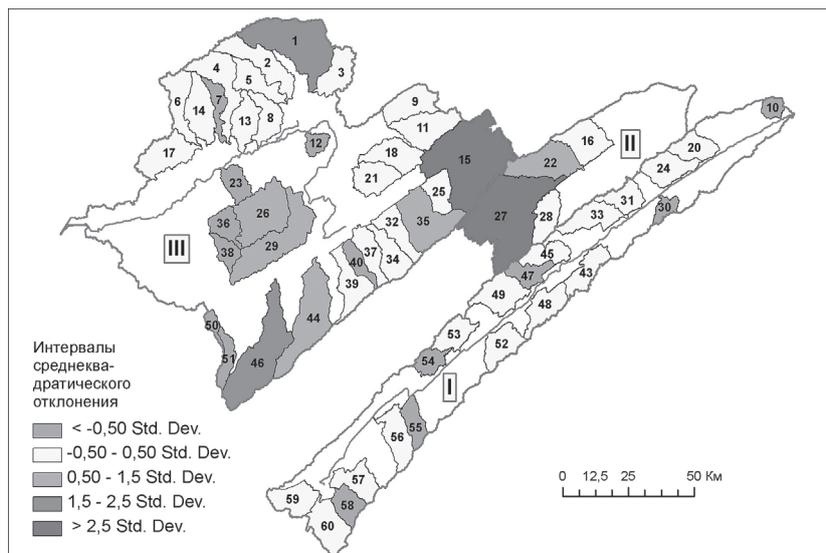


Рис. 2. Распределение бассейнов 3-го порядка по площади относительно среднего значения в бассейнах Барнаулки (I), Касмалы (II) и Кулунды (III)

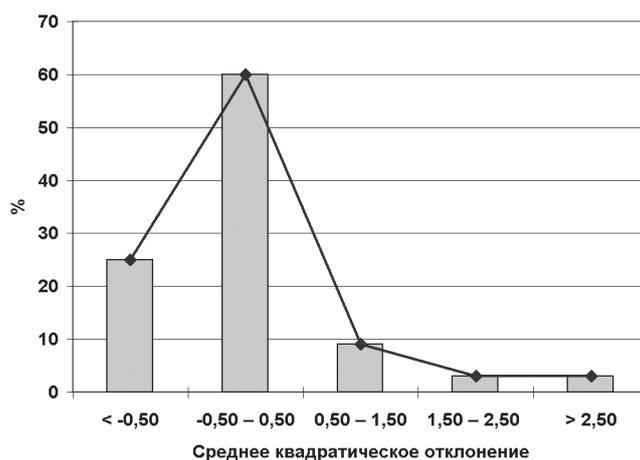


Рис. 3. Гистограмма и кривая распределения площадей бассейнов 3-го порядка относительно среднего значения в бассейнах Кулунды, Касмалы и Барнаулки

Таблица 2

Структурные индексы бассейнов 3-го порядка

Класс бассейна	Площадь S, кв. км (доля в бассейне)	Интервалы ( $\sigma$ )	Структурные индексы			
			площадей	длин	уклонов	бифуркации
р. Кулунда						
1	95–135 (24%)	< - 0,50	721	325	433	124
2	145–220 (56%)	-0,50–0,50	712	118	217	133
3	145–220 (15%)	0,50–1,50	712	127	235	146
4	260–275 (2,5%)	1,50–2,50	532	136	145	155
5	430–450 (2,5%)	>2,50	631	127	253	195
р. Барнаулка						
1	95–135 (30%)	< - 0,50	811	514	514	122
2	145–220 (70%)	-0,50–0,50	721	451	442	123
р. Касмала						
2	145–220 (50%)	-0,50–0,50	541	244	343	133
4	260–275 (25%)	1,50–2,50	622	127	325	136
5	430–450 (25%)	>2,50	631	136	145	166

Сравнение индексов структуры бифуркации (ветвления) бассейнов 3-го порядка дает возможность увидеть, что бассейны 2–4 классов (индекс структуры площадей – 133) в Кулунде и Касмале в 2,25 раза, а 5-го класса (индекс структуры площадей 166) в 3 раза сильнее расчленены в верхнем звене речной сети, чем бассейны 1-го класса (индекс структуры площадей 122). Соответственно, более расчлененный бассейн при прочих равных условиях быстрее и полнее дренирует водосбор, быстрее отводит с ее поверхности воду.

Дополнительную информацию об особенностях строения речных бассейнов можно получить на основе использования соотношения структурных индексов. Например, сопоставление структуры длин индексов и уклонов путем графических построений позволяет на основе формы продольного профиля определить наличие и положение зоны выноса, транзита и аккумуляции рыхлого материала внутри бассейна.

Так, в низине Касмалы преобладают бассейны 3-го порядка со слабоогнутым продольным профилем, что свидетельствует об относительной «молодости» склона, на котором развиваются бассейны, и указывает на преобладание внутри этих бассейнов процессов врезания

и выноса литогенного материала. Ярко выраженные участки аккумуляции при этом отсутствуют. В долине Барнаулки преобладают бассейны 3-го порядка (45% от общего числа), имеющие невыработанный слабоогнутый продольный профиль. Чуть меньше бассейнов имеют вогнуто-выпуклый профиль (35%), который свидетельствует об относительно недавнем понижении местного базиса эрозии. Среди бассейнов с вогнуто-выпуклым продольным профилем выделяется ярко выраженной зоной аккумуляции в узлах слияния водотоков 1 и 2-го порядков бассейн №54. На бассейны с прямым продольным профилем приходится всего 15%. Более разнообразные соотношения структурных индексов установлены для долины Кулунды, что возможно связано с большим разнообразием факторов формирования стока в ее бассейне (рис. 4).

Проведенная адаптация методики и анализ структуры водосборных бассейнов 3-го порядка через структурные индексы создали основу для оценки условий формирования стока, характеристики пространственного распределения потоков воды и наносов в отдельных звеньях речной сети, а также для оценки потенциала оврагообразования.



Рис. 4. Соотношение индексов структуры длин и уклонов в бассейнах 3-го порядка

### Библиографический список

1. Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. - М.; Смоленск, 1998.
2. Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. - Саратов, 1960.
3. Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю. Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки // Эрозия почв и русловые процессы. – М., 2004. – Вып. 14.
4. Новаковский Б.А., Симонов Ю.Г., Тульская Н.И. Эколого-геоморфологическое картографирование Московской области. - М., 2005.
5. Яковченко С.Г., Жорнов В.А., Постнова И.С. Создание и использование цифровых моделей рельефа в гидрологических и геоморфологических исследованиях. - Кемерово, 2004.