

Физико-географические исследования

УДК 551.4(045)

О.В. Безгодова

СТРУКТУРНО-МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАССЕЙНОВ МАЛЫХ РЕК КОТЛОВИН ТУНКИНСКОЙ СИСТЕМЫ

В статье проведен сравнительный анализ структурно-морфометрических особенностей малых речных бассейнов котловин Тункинской системы на примере рек Ихе-Ухгунь, Енгарга, Тунка (левые притоки р. Иркут, Тункинские Гольцы) и рек северного макросклона хребта Хамар-Дабан (правые притоки р. Иркут). На основе цифровой модели рельефа ALOS с помощью ГИС получены структурные индексы и проведено их сравнение с модальными показателями для характеристики структурно-морфометрических особенностей бассейнов. Анализ распределения индексов показал наибольшую расчлененность бассейнов Тункинских Гольцов в верхних звеньях эрозионной сети. Выявлено, что наибольшей однородностью структурных индексов характеризуются бассейны 3-го порядка, расположенные в пределах хребта Хамар-Дабан, а наибольшим разнообразием в распределении структурных индексов обладают бассейны днищ котловин. Для малых рек Тункинских Гольцов ведущую роль в преобразовании рельефа и переноса вещества играют водотоки 1-го порядка; для малых рек Хамар-Дабана – 1-го и 3-го порядков.

Ключевые слова: бассейны малых рек, морфометрический анализ, структурные индексы, Тункинская система котловин, цифровая модель рельефа.

DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-1-31-41

Речная сеть является сложной системой, состоящей из взаимосвязанных элементов, где нарушение одного из компонентов приводит к изменению состояния другого. Через котловины Тункинской системы проходит р. Иркут, собирая сток наносов и воды с малых речных бассейнов. В настоящее время территория днищ котловин все больше подвергается преобразованию со стороны деятельности человека (пашни, вырубки, выпас скота, строительство, ведение рекреационной деятельности и т. д.). Изучение и сравнение структурных и морфометрических особенностей бассейнов малых рек необходимо в целях выявления основных закономерностей распределения потоков вещества в пространстве на различных иерархических уровнях, а также для определения особенностей бассейновой организации территории, которая указывает на латеральную и парагенетическую связность пространственной организации географических систем.

Малые реки превосходят средние и крупные по протяженности и общему количеству, но особенности строения долин и русел малых рек способствуют более сильной реакции на различные изменения со стороны природных и антропогенных факторов по сравнению со средними и крупными реками. Данные о структурно-морфометрических особенностях малых рек несут информацию об эколого-геоморфологической обстановке, позволяют определить основные факторы перемещения вещества, выявить закономерности развития речной сети, что важно для рационального природопользования на территории Тункинской системы котловин.

Цифровое моделирование рельефа в геоинформационных системах (ГИС) широко распространено в изучении различных геосистем и отличается простотой, точностью и наглядностью получаемого результата, что необходимо для анализа морфометрии рельефа бассейнов малых рек. Данный метод широко применяется в исследованиях отечественных и зарубежных ученых [1-4]. В настоящее время исследования малых речных бассейнов в пределах территории Тункинской системы котловин довольно редки [5; 6].

Цель данного исследования – сравнительный структурно-морфометрический анализ малых речных бассейнов котловин Тункинской системы (притоки р. Иркут). Автором поставлены и решены следующие задачи:

1) в программе SAGA GIS подготовить цифровую модель рельефа (ЦМР) ALOS DSM и на ее основе получить основные морфометрические карты изучаемой территории (гипсометрическая, карты уклонов, базовых уровней речной сети);

2) получить модель эрозионной сети тальвегов до 6-го порядка по данным ЦМР;

3) рассчитать структурные и морфометрические показатели для сравнительного анализа бассейновой организации водотоков 3-го порядка, берущих начало с хребтов Тункинские Гольцы и Хамар-Дабан.

Бассейны малых рек котловин Тункинской системы, выступающие в качестве объекта исследования, характеризуются низкой изученностью геоморфологических, морфометрических и структурных параметров. В процессе исследования впервые получен ряд картографических материалов, например, гипсометрические карты отдельных бассейнов, уклонов и т. д. Специфика геолого-геоморфологического, тектонического и морфологического строения, а также амплитуда высот речных бассейнов повышают интерес к исследованию данной территории (разнообразие геодинамических обстановок). Сравнительный структурно-морфометрический анализ бассейнов малых рек котловин Тункинской системы с помощью ГИС проводится впервые.

Объект и методы исследований

Тункинская система котловин площадью 2640 км² (без горного обрамления) расположена субшироотно. Длина системы достигает 200 км, а ширина изменяется от 3–6 км (Туранская впадина) и до 32 км в центральной части – в малой Тункинской котловине. Северная граница системы котловин проходит по линии хребта Тункинские Гольцы, южная – по хребту Хамар-Дабан. Тункинская система включает Мондинскую, Хойтогорскую, Туранскую, Тункинскую, Торскую и Быстринскую котловины, а также горное обрамление, образованное хребтами Хамар-Дабан и Тункинские Гольцы [7]. Котловины разделяются горными перемычками, которые являются естественными границами котловин – это Харадабанская, Туранская, Ниловская, Еловская и Зуркузунская горные перемычки (рис. 1).

Рис. 1. Схема расположения котловин в Тункинской системе:

1 – Быстринская, 2 – Торская, 3 – Тункинская, 4 – Туранская, 5 – Хойтогорская, 6 – Мондинская.

Наиболее крупными бассейнами среди малых рек, берущих начало с хребта Тункинские Гольцы, являются бассейны рек Ихе-Ухгунь (846 км²), Енгарга (495 км²) и Тунка (811 км²), занимающие Хойтогорскую и Тункинскую котловины (левые притоки р. Иркут). Протяженность рек составляет 76, 27 и 48 км соответственно, падение – 1207, 1538 и 1488 м. Густота эрозионной сети бассейнов – 0,58, 0,79 и 0,88 км/км². С севера все три бассейна ограничены хребтом Тункинские Гольцы с высотами 2800–3000 м, в геологическом составе которого преобладает саянский комплекс верхнепротерозойских интрузий. Центральные части бассейнов рек Тунка и Енгарга приурочены к аллювиальной равнине

р. Иркут, а также к зонам новейшего погружения фундамента (озерно-аллювиальная равнина) с мощным чехлом четвертичных отложений [8]. С запада и востока бассейны ограничены инверсионным поднятием четвертичных отложений массива Бадар (абсолютная высота 860 м); бассейн р. Ихе-Ухгунь с востока и юга граничит с Ниловской межкотловинной перемычкой с высотами до 1700 м, сложенной неогеновым комплексом вулканогенных отложений. Общие геолого-геоморфологические и тектонические особенности бассейнов: асимметричность речной сети – у рек Ихе-Ухгунь и Тунка сильное преобладание левых притоков, у р. Енгарга – правых; долины приурочены к тектоническим трещинам; центральные части бассейнов заболочены – у рек Тунка и Енгарга наблюдаются озерные расширения русел; большая часть стока направлена в сторону тектонического опускания.

Для хребта Хамар-Дабан с абсолютными высотами до 2800 м нехарактерно развитие ассиметричных бассейнов: вместо этого наблюдаются протяженные и относительно симметричные речные бассейны, расположенные субмеридионально (правые притоки р. Иркут). Рассмотрено 23 малых речных бассейна общей площадью 2755 км², средняя площадь бассейнов 120 км²; минимальная протяженность русла – ручей Будунский (6,9 км), максимальная – р. Харагун (54,4 км), средняя протяженность русел 22,7 км; средний показатель падения русел – 1074 м, средняя густота эрозионной сети – 0,57 км/км². В геолого-геоморфологическом строении территории выделяются: саянский комплекс верхнепротерозойских интрузий в среднегорной части хребта Хамар-Дабан, неогеновые вулканогенные образования и среднеплейстоценовый-голоценовый комплекс четвертичной системы в низовьях малых рек [8].

Климат котловин и горного обрамления Тункинской системы резко континентальный с холодной зимой и умеренно-теплым летом. По данным метеостанции в с. Тунка, годовое количество осадков для центральной части Тункинской котловины составляет 365 мм, а для горного обрамления (Тункинские Гольцы) – 511 мм. Около 70 % годовой суммы осадков приходится на летний период (июль-август) и для центральной части котловины составляет 260 мм [8]. На зимний период приходится около 30–35 мм осадков, из-за чего снежный покров незначителен [9]. В питании рек изучаемой территории преобладают дождевые и снеговые осадки. Из-за ливневых дождей в летний период на реках наблюдаются паводки, значительно превышающих весеннее половодье. Котловинные части являются наиболее освоенными в хозяйственном плане: здесь расположены участки пашни, сенокосов, вырубков, выпаса крупного рогатого скота. На изучаемой территории расположены населенные пункты Монды, Туран, Хойто-Гол, Кырен, Тунка, Хурай-Хобок, Зактуй, Торы, Шулута, Тибельти, Быстрая и др., а также лечебно-оздоровительные курорты Нилова Пустынь, Жемчуг и Аршан.

В качестве методической основы использовались работы отечественных и зарубежных исследователей в области русловедения А. Л. Варенова [10], Р. С. Чалова [11], К. J. Gregory [12], Т. Nagata, Y. Watanabe и др. [13]; работы по структурному анализу в исследованиях геоморфологических и гидрологических особенностей речных бассейнов [14–18].

В основе исследования лежит комплексная обработка ЦМР ALOS Global Digital Surface Model (DSM) с разрешением сетки 30 метров (1 угловая секунда) размером 1x1 градус. Подготовка ЦМР проводилась в программе SAGA GIS (версия 7.8.1) и состояла в смене проекционной системы координат (UTM для зоны 48N), коррекции границ модели согласно границам бассейнов малых рек (модуль «Clip grid with polygon»), а также удалении пустот в ЦМР, которые получены из-за ошибок усреднения высот, интерполяции и округления значений каждого пикселя с помощью модуля Fill Sinks [20]. Далее получены основные производные карты на исследуемые бассейны с использованием пакета модулей «Terrain Analysis», в частности Terrain Classification, Morphometry (Curvature, Slope) и Channels (Channel Network, Channel Network Base Level).

Оформление и анализ данных проводился в программе ArcGIS 10 (ESRI Inc.), где с помощью гидрологических модулей Flow Direction и Stream Order (Spatial Analyst, Hydrology) получены отдельные модели эрозионной сети тальвегов до 6-го порядка (рис. 2), собраны их морфометрические показатели (количество, длина, средняя длина, порядки водотоков и т. д.) (табл. 1). Кодирование водотоков выполнено методом Стралера-Философова, где за временный или постоянный водоток 1-го порядка принимается долина, в которую не впадает другой водоток. При слиянии двух водотоков 1-го порядка образуется водоток 2-го порядка и т. д. Таким образом, выделяются порядкообразующие узлы слияния русел в структуре речных бассейнов.

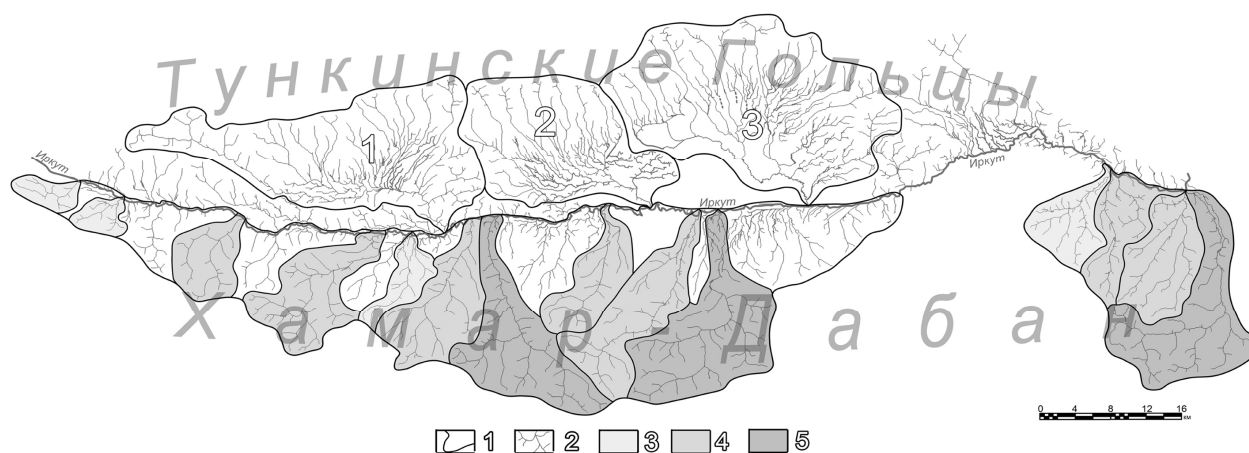


Рис. 2. Карта-схема эрозионной сети тальвегов Тункинской системы котловин
 Условные обозначения: 1 – границы изучаемых бассейнов, 2 – водотоки 1-го – 6-го порядка. Ключевые бассейны хребта Хамар-Дабан: 3 – площадью до 100 км², 4 – площадью 100–300 км², 5 – площадью более 300 км². Цифрами обозначены: 1 – бассейн р. Ихе-Ухгунь, 2 – бассейн р. Енгарга, 3 – бассейн р. Тунка.

Для проведения структурного и морфометрического анализа бассейновой организации речной сети малых рек автором использован методологический подход Ю. Г. Симонова и Т. Ю. Симоновой [18], суть которого заключается в исследовании соотношения морфометрических характеристик отдельных бассейнов 3-го порядка через ряд структурных индексов, рассчитанных для разнопорядковых водотоков. Индекс структуры бифуркации (ИСБ) является соотношением количества разнопорядковых водотоков в бассейнах 3-го порядка, где модальный (эталонный) ИСБ равен 134. Цифры в показателе означают следующее: 1 – 3-й порядок; 3 – 2-й порядок; 4 – 1-й порядок. Данный индекс показывает отношение числа русел разных порядков в бассейне. В бассейне 3-го порядка не может быть больше одного русла данного порядка; водотоков 2-го порядка не может быть меньше двух, так как они должны образовать русло 3-го порядка; водотоков 1-го порядка не должно быть меньше двух, чтобы образовать водоток 2-го порядка. Таким образом, минимальный ИСБ равен 122 [18].

Индекс структуры длин (ИСД) – это соотношение средних длин водотоков разных порядков с модальным показателем 136, где 1 – средние длины водотоков 1-го порядка (10 %); 3 – длины 2-го порядка (30 %); 6 – длины 3-го порядка (60 %). Для получения этого индекса необходимо изменить средние длины водотоков 1-го и 2-го порядков, а также 3-го. Затем получают общую сумму длин, равную 100 %, и далее высчитывается соотношение. Индекс структуры площадей (ИСП) является соотношением средних площадей бассейнов разных порядков. Модальный ИСП равен 532, где 5 – площади склонов 1-го порядка (50 %); 3 – площади склонов 2-го (30 %); 2 – площади склонов 3-го порядка (20 %). Данный индекс указывает, какой порядок тальвегов больше всего дренирует по площади бассейн 3-го порядка. Индекс структуры уклонов (ИСУ) выражает соотношение средних уклонов разнопорядковых водотоков в бассейне в % (тангенс угла наклона тальвегов). Значение ИСУ получают через расчет средних уклонов тальвегов 1-го и 2-го порядка, а также уклона тальвега 3-го порядка. После суммирования значение принимается за 100 %, и далее высчитывается индекс [18]. Индексы говорят о геоморфологической нагрузке на рельеф, которая совершается водотоками в ходе их функционирования как сложной системы. Тем не менее, модальные бассейны в природных условиях Тункинской системы котловин встречаются крайне редко.

Результаты и их обсуждение

Абсолютные высоты бассейнов по данным ЦМР варьируют от 641 до 3207 м, средняя высота – 1387 м, стандартное отклонение – 553 м. Анализ распределения высот по площади исследуемого участка показал, что высоты 641–1000 м занимают 31,3 % площади, наименьший показатель у диапазона высот 2900–3207 (0,3 %). Базовые уровни малых водотоков речной сети распределены по уровням 641–900 (29,2 %), 900–1150 (18,9 %), 1150–1350 (14,5 %), 1350–1600 (12,6 %), 1600–1850 (10,5 %), 1850–2100 (7,5 %), 2100–2300 (5,7 %), 2300–2550 (1,1 %). Такое распределение базовых уровней речной сети исследуемой территории связано с широким распространением областей опус-

кания блоков фундамента (днища котловин), обширной аллювиальной равниной р. Иркут и наличием широкого шлейфа предгорной наклонной равнины.

Для определения индекса структуры уклонов проведен анализ карты уклонов исследуемой территории. По классификации склонов О. К. Леонтьева и Г. И. Рычагова [21] по площади выделяются очень пологие и пологие склоны $0-5^\circ$ (33,8 %) и $5-9^\circ$ (19,2 %), средней крутизны склоны $9-15^\circ$ (15,5 %), крутые $15-35^\circ$ (23,8 %) и очень крутые склоны более 35° (7,7 %). Среднее значение – $15,1^\circ$. Несмотря на преобладание пологих склонов, около 50 % территории занято склонами более 10° , что предполагает развитие широкого перечня склоновых процессов (овражной эрозии, плоскостного смыва), гравитационных процессов (осыпей, обвалов), криогенно-склоновых процессов (солифлюкция).

В целом абсолютные высоты и базовые уровни речной сети Тункинских Гольцов выше на 300–500 м, склоны имеют большую крутизну и обрываются резко на юг к линии Тункинского сброса. Речные долины глубокие, часто с крутыми бортами долин V-образной формы. Здесь хорошо сохранились формы рельефа ледникового происхождения: кары, заполненные моренными комплексами (боковые, конечные) с озерами. В пределах хребта Хамар-Дабан наблюдается более равномерное распределение высот, абсолютные высоты и базовые уровни речной сети ниже, склоны более пологие и чаще имеют северную экспозицию. Плавный переход к днищам котловин фиксируется в виде широких конусов выноса рек (реки Харибияты, Харагун). Формы рельефа ледникового происхождения сохранились в меньшей степени.

Геолого-геоморфологические, тектонические (блоки опускания и поднятия фундамента) и климатические особенности (выпадение ливневых дождей), высокие базовые уровни речной сети, большая площадь средних и крутых склонов способствуют развитию сети постоянных и временных водотоков, поставке рыхлого материала в долины и русла малых рек, выносимого с горных территорий на равнинные (днища котловин). Общее усложнение структуры речной сети котловин приводит к возникновению опасных и катастрофических явлений в руслах рек, например, сходу селей (реки Кынгарга, Харимта, Вторая Шихтолайка и др.)

На водотоки 1-го порядка для каждого бассейна приходится почти 50 % суммарной длины (табл. 1), а сумма длин тальвегов 1–2-го порядков составляет от 75,7 % до 83,8 %, что подтверждает обратный экспоненциальный закон распределения длин разнопорядковых тальвегов. Для рек Тункинских Гольцов выделены бассейны до 5-го порядка, тогда как бассейны малых рек Хамар-Дабана достигают 6-го порядка. Водотоки 3-го порядка в бассейнах малых рек Хамар-Дабана имеют наибольшую длину среди других представленных бассейнов 3-го порядка Тункинских Гольцов, что указывает на высокую степень расчлененности рельефа.

Таблица 1

Параметры тальвегов разных порядков L в бассейнах малых рек Тункинских Гольцов и хребта Хамар-Дабан

Параметр	Порядок рек					
	1	2	3	4	5	6
Тункинские Гольцы						
р. Ихе-Ухгунь (всего 491 км)						
Общая длина (L), км (%)	249 (50,7)	156 (31,8)	67 (13,6)	19 (3,85)	-	-
Средняя длина, км	2,1	2,6	2,02	18,9	-	-
р. Енгарга (всего 391)						
Общая длина (L), км (%)	185 (47,3)	143 (36,5)	39 (10,1)	15 (3,9)	9 (2,2)	-
Средняя длина, км	1,6	2,7	1,3	1,3	8,9	-
р. Тунка (всего 715)						
Общая длина (L), км (%)	317 (44,2)	267 (37,4)	78 (10,9)	35 (4,9)	18 (2,6)	-
Средняя длина, км	2,2	2,6	2,5	2,09	17,9	-
Хамар-Дабан (всего 2983,4)						
Общая длина (L), км (%)	1473 (49,3)	788 (26,4)	452 (15,1)	182 (6,1)	86 (2,9)	2,4 (0,08)
Средняя длина, км	1,9	3,7	8,2	9,9	18,8	2,4

Полученная модель эрозионной сети тальвегов позволила определить структурно-морфометрические особенности бассейнов малых рек через индексы структуры бифуркации (ИСБ),

длин (ИСД), площадей (ИСП) и уклонов (ИСУ) (табл. 2). Для бассейна р. Тунка выделено 4 подбассейна 3-го порядка, для р. Ихе-Ухгунь – 7 подбассейнов, для р. Енгарга – 5 подбассейнов, для Хамар-Дабана выделено наибольшее количество подбассейнов 3-го порядка – 14 (табл. 2). Проведено сравнение полученных показателей с модальными индексами.

Таблица 2

**Структурные индексы подбассейнов 3-го порядка рек Тункинских Гольцов
и хребта Хамар-Дабан**

Название водотока 3-го порядка	Индексы структуры				Площадь, км ²
	Бифуркации (ИСБ=134)	Длин (ИСД=136)	Площадей (ИСП=532)	Уклонов (ИСУ=631)	
Тункинские Гольцы (Хойтогольская котловина)					
Подбассейны 3-го порядка бассейна р. Ихе-Ухгунь					
1. р. Ихе-Булнай	154	541	523	541	73
2. р. Улан-Гол	123	541	532	451	46
3. р. Хургуты	124	442	631	631	29
4. р. Хаюрта	122	622	811	541	62
5. р. Хубыты	142	541	631	631	26
6. р. Хонголкой	122	541	442	352	25
7. р. Малый Хонголкой	123	541	541	343	27
Тункинские Гольцы (Тункинская котловина)					
Подбассейны 3-го порядка бассейна р. Енгарга					
1. р. Илтыкшин	162	532	631	442	166
2. р. Хэр	123	352	451	631	105
3. р. Елоты-Харагун	122	352	451	451	97
4. р. Елота	122	451	451	541	24
5. р. Енгарга (до устья р. Елота)	142	721	811	721	103
Подбассейны 3-го порядка бассейна р. Тунка					
1. р. Тунка (до устья р. Барун-Хандагай)	143	541	721	541	114
2. р. Зун-Хандагай	123	613	514	433	43
3. р. Кынгарга	154	433	532	532	231
4. р. Хобок	122	532	631	811	60
Подбассейны 3-го порядка хребта Хамар-Дабан					
1. р. Аерхан	144	253	343	334	31
2. р. Обо-Горхон	124	262	541	433	20
3. р. Большой Хара-Гол	143	244	433	244	122
4. р. Халагун	134	442	235	334	229
5. р. Туран	122	424	415	244	53
6. р. Малый Зангисан	123	442	514	343	190
7. р. Большой Зангисан (до устья р. Хахюрта)	174	343	514	334	302
8. р. Кырен	173	343	532	244	115
9. р. Харибяты (до устья р. Хохюр-Гол)	144	334	424	433	235
10. р. Харагун (до устья р. Бильчир)	153	442	631	334	383
11. р. Верхняя Тибельти (до устья р. Аран-Тологой)	122	415	415	433	90
12. р. Средняя Тибельти	142	424	523	352	102
13. р. Малая Быстрая (до устья р. Тултуй)	143	433	325	334	165
14. р. Большая Быстрая (до устья р. Рассоха)	132	352	442	334	324

Расчет индекса структуры бифуркации (ИСБ) показал (табл. 2), что только один подбассейн 3-го порядка соответствует модальному значению 134 (р. Халагун), тогда как остальные подбассейны отклоняются от данного показателя (значительнее всего у рек Илтыкшин, Большой Зангисан, Кынгарга). Незначительные отклонения показателя отмечаются для подбассейнов рек хребта Хамар-Дабан, тогда как малые реки Тункинских Гольцов имеют более сложную структуру, что связано с системой тектонических трещин (простираение водотоков часто коррелирует с направлением крупных линейных элементов [19]), определяющих густоту и протяженность водотоков 1-го и 2-го порядков. Густая сеть тальвегов данных порядков указывает на значительное расчленение бассейнов в среднем и верхнем звеньях речной сети. Подбассейны 3-го порядка хребта Хамар-Дабан расчленены сильнее, в среднем звене. Чем выше степень расчлененности рельефа бассейна, тем с большей скоростью дренируется водосбор и отводится поверхностный сток.

Для бассейнов малых рек Тункинских Гольцов наибольшее отклонение от модального показателя ИСБ выявлено у рек Ихе-Булнай, Хубуты, Илтыкшин и Кынгарга, которые объединяет повышенная протяженность рек 1-го и 2-го порядка в пределах горного обрамления и предгорной наклонной равнины. Смена порядка рек в данных бассейнах происходит на высотах 1200–1600 м. Для рек Хамар-Дабана заметное отклонение у рек Большой Зангисан и Кырен вызвано приуроченностью водотоков 2-го порядка к оперяющим трещинам линейных элементов, где смена порядков происходит на высотах 1400–1800 м.

Индекс структуры длин (ИСД) для изучаемых подбассейнов полностью отклоняется от модального значения 136, значительнее всего у бассейнов рек Тунка и Ихе-Ухгунь (максимальное отклонение у рек Хаюрта, Зун-Хандагай). Малые реки Хамар-Дабана ближе всего к модальному значению (р. Большой Хара-Гол). Здесь наибольшую длину имеют водотоки среднего и нижнего звена, тогда как у Тункинских Гольцов тальвеги 1-го порядка во многом превосходят по длине тальвеги 2-го и 3-го порядков, в результате чего значения ИСД имеют обратный от модального вид. Это связано с тем, что общее количество и протяженность водотоков 1-го порядка Тункинских Гольцов превосходят другие порядки из-за особенностей геолого-геоморфологического и тектонического строения территории (Гольцы испытывают более активные тектонические поднятия, которые обуславливают более глубокий врез водотоков 1-го порядка). Длины водотоков 3-го порядка в структуре бассейнов незначительны, ближе всего к модальному показателю для подбассейнов Хамар-Дабана (реки Верхняя Тибельти, Средняя Тибельти и т. д.). У всех бассейнов малых рек наблюдается упрощение структуры с повышением порядка водотока.

При анализе индекса структуры площадей (ИСП) (табл. 2) выявлено три бассейна, соответствующих модальному значению – в бассейне р. Ихе-Ухгунь (р. Улан-Гол), р. Тунка (р. Кынгарга) и в пределах хребта Хамар-Дабан (р. Кырен). У остального большинства бассейнов на верховья приходится от 50 до 80 % площади (максимум у рек Енгарга, Тунка и Хаюрта), что обуславливает большую геоморфологическую нагрузку верховьев, чем у подбассейнов с площадью менее 50 %. Площадь бассейнов тальвегов 3-го порядка меньше из-за их небольшой протяженности для Тункинских Гольцов, тогда как для малых рек хребта Хамар-Дабан наблюдается повышенное значение площадей склонов водотоков 3-го порядка (до 50 %). Зачастую площади склонов водотоков 1-го и 3-го порядков здесь имеют примерно равное соотношение, что указывает на значительную геоморфологическую нагрузку водотоков на рельеф в нижнем и верхнем звене речной сети. Повышенный показатель структуры площадей для 3-го порядка обуславливает равномерное распределение наносов в главном русле.

Показатель ИСП удобно использовать при сравнении двух бассейнов. Так, у р. Тунка с ИСП=721 видно, что верховья больше совершают геоморфологическую нагрузку на рельеф, чем у бассейна р. Малая Быстрая с ИСП=325, где эта роль принадлежит водотокам 3-го порядка. При этом пополнение наносами русла р. Малая Быстрая происходит за счет склонов нижнего звена, а у р. Тунка – верхнего. В нормальном (модальном) бассейне это питание распределено вдоль главного русла равномерно [18].

Индекс структуры уклонов для подбассейнов Тункинских Гольцов находит наибольшее совпадение с модальным индексом ИСУ=631, особенно для бассейна р. Ихе-Ухгунь (реки Хургуты, Хубуты со значением 631), чуть меньше у бассейна р. Енгарга (совпадение с индексом у р. Хэр), и затем бассейн р. Тунка. При сравнении с другими индексами здесь наблюдается повышение роли водотоков 3-го порядка в структуре бассейнов из-за расчлененного рельефа в нижнем звене речной сети. Тектонические особенности бассейна р. Ихе-Ухгунь, прилегающего к Тункинским Гольцам, а именно современное поднятие блоков земной коры, увеличивает врез водотоков 3-го порядка и общую крутизну

склонов. Водотоки 3-го порядка бассейнов рек Тунка и Енгарга протекают по участкам современного опускания блоков фундамента, поэтому роль уклонов в геоморфологической нагрузке водотоков 3-го порядка здесь не велика.

Для подбассейнов хребта Хамар-Дабан индекс находит совпадение только со значением для рек 2-го порядка, тогда как для 1-го и 3-го значительно отклоняется. В целом значения ИСУ для подбассейнов имеет равномерное распределение, что связано с платообразным рельефом хребта, наличием денудационных уровней, которые эродированы экзогенными процессами рельефообразования в процессе современного тектонического поднятия хребта вдоль линии простираения [19].

Сравнение левых (Тункинские Гольцы) и правых (Хамар-Дабан) притоков р. Иркут показало существенные различия в природных факторах развития речной сети. Бассейны малых рек Тункинских Гольцов ассиметричны, имеют заболоченные русла с озерными комплексами (реки Тунка, Енгарга), где основную геоморфологическую нагрузку выполняют водотоки 1-го порядка. Тектоническое строение определяет направление речного стока, климатические особенности создают условия для периодов повышенной водности, когда наблюдается повышение порядка речной сети из-за наличия системы временных водотоков (талвеги 1-го порядка становятся тальвегами 2-го). При этом геолого-геоморфологические особенности и разница в базисе эрозии создают условия для неравномерного расположения подбассейнов 3-го порядка для всех трех бассейнов Тункинских Гольцов: в бассейне р. Ихе-Ухгунь подбассейны 3-го порядка сосредоточены в нижней части, в бассейне р. Енгарга в средней и нижней части, в бассейне р. Тунка в средней части. Смена порядков рек происходит на более низких геоморфологических уровнях, чем у малых рек Хамар-Дабана (разница на 200–300 м).

Большая инфильтрационная способность отложений предгорной наклонной равнины увеличивает водосборную площадь через подземный сток, а блоки опускания фундамента способствуют накоплению наносов и стока воды. На склонах южной экспозиции таяние снежного покрова происходит быстрее, а повышенная инсоляция способствует развитию незалесенных участков с комплексом осыпных и обвальных процессов. Физическое выветривание подготавливает обломочный материал для сноса в долины и русла 1-го и 2-го порядков, что в совокупности с климатическими особенностями становится причиной возникновения катастрофических явлений – селевых потоков.

Бассейны малых рек хребта Хамар-Дабан чаще всего симметричны, протяженные, хорошо дренируют водосборы в верхнем и нижнем звене речной сети. Периоды повышенной водности менее выражены, направление стока ориентировано к общему базису эрозии (р. Иркут), система временных водотоков менее развита. Средние и нижние звенья речной сети залесены, с выположенных и задернованных склонов происходит меньший снос рыхлого материала. Хребет Хамар-Дабан сильно расчленен горизонтально, в результате чего эрозионная сеть водотоков здесь имеет больший порядок даже вне периодов повышенной водности в теплый период.

Заключение

Впервые для котловин Тункинской системы проведен сравнительный анализ морфометрических и структурных показателей бассейнов малых рек с помощью цифровой модели рельефа ALOS в программной среде ГИС. Основные численные характеристики геометрии рельефа и структур подбассейнов 3-го порядка для рек, берущих начало с хребтов Тункинские Гольцы и Хамар-Дабан, указывают на закономерности распределения потоков вещества и особенности бассейновой организации территории. Для бассейнов малых рек Тункинских Гольцов выявлена ассиметричная речная сеть, где ведущую роль в переносе вещества играют водотоки 1-го порядка, которые в периоды повышенной водности увеличивают свой порядок благодаря развитой системе временных водотоков. Это подтверждается индексами уклонов и площадей изучаемой территории. На неоднородность структуры бассейнов указывают индексы бифуркации и длин, численное распределение которых связано с повышенной вертикальной расчлененностью верхних звеньев речной сети и системой тектонических разломов в пределах Тункинских Гольцов (Тункинский сброс). Наиболее однородным (с близкими к модалным показателям значениями) является бассейн р. Тунка. Геометрия рельефа бассейнов определяет направление и объем поверхностного стока, ориентированного в сторону пониженных частей котловин, где вместе с климатическими особенностями создаются условия для развития катастрофических явлений (селей) в долинах малых рек. Это создает угрозу для наиболее освоенных частей Тункинской системы котловин (населенные пункты Аршан, Тагархай, Хойто-Гол, Монды).

Речная сеть бассейнов малых рек хребта Хамар-Дабан имеет симметричный вид, в геоморфологической нагрузке на рельеф преобладают водотоки 1-го и 3-го порядка. Водотоки данных порядков имеют равное соотношение длин, площадей и уклонов. Бассейны малых рек характеризуются повышенным горизонтальным расчленением с неоднородной структурой для бассейнов 2-го порядка. Бассейны рек Кырен и Халагун обладают наибольшей степенью однородности, тогда как остальные имеют приближенные значения или значительно отклоняются в показателях. Индексы уклонов и длин указывают на повышенную протяженность водотоков 2-го порядка, в пределах которых наблюдается усиленный снос материала в русла малых рек. Сравнительный структурно-морфометрический анализ малых речных бассейнов котловин Тункинской системы необходим для дальнейшего анализа распределения бассейнов по потенциальной способности к накоплению-выносу вещества, геоморфологической работы и выявления парагенетических связей бассейнов 3-го порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опекунова, М. Ю. Структурный анализ речных бассейнов Верхнего Приангарья (на примере бассейна реки Оёк) / М. Ю. Опекунова, А. В. Бардаш, С. А. Тухта // География и природные ресурсы. – 2018. – № 3. – С. 156–163. – DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(156-163)
2. Quantitative morphotectonics of the Pliocene to Quaternary Auletta basin, southern Italy / D. Gioia, M. Schiattarella, M. Mattei, G. Nico // *Geomorphology*. – 2011. – №3–4. – P.326–343. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.009>
3. Asode, A. N. Quantitative morphometric analysis in the hard rock Hirehalla sub-basin, Bellary and Davanagere Districts, Karnataka, India using RS and GIS / A. N. Asode, A. Sreenivasa, T. K. Lakkundi // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2016. – Vol. 9, № 381. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2414-x>
4. Sassolas-Serrayet, T. The shape of watersheds / T. Sassolas-Serrayet, R. Cattin, M. Ferry // *Nature Communications*. – 2018. – Vol. 9, № 3791. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-0>
5. Безгодова, О. В. Применение морфометрического анализа для бассейнов малых рек котловин Байкальской рифтовой зоны / О. В. Безгодова // *Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле*. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 290–300. – DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-3-290-300
6. Безгодова, О. В. Цифровое моделирование морфометрии малых рек бассейна р. Иркут / О. В. Безгодова // XIV Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: тезисы докладов российской конференции с международным участием. – Томск: Изд-во ФГБУН ИМКЭС РАН. 2021. – С. 171–174.
7. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья / отв. ред. чл.-кор. АН СССР Н. А. Флоренсов. – М.: Наука, 1974. – 359 с.
8. Выркин, В. Б. Общность и различия некоторых черт природы Тункинской ветви котловин / В. Б. Выркин, В. А. Кузьмин, В. А. Снытко // *География и природные ресурсы*. – 1991. – № 4. – С. 61–68.
9. Агроклиматические ресурсы юга Восточной Сибири / под ред. В. А. Картушина. – Иркутск: Вост.- Сиб. кн. изд-во, 1969. – 100 с.
10. Варенов, А. Л. Вертикальные деформации русел малых рек под влиянием антропогенных факторов (бассейн р. Кудьмы) / А. Л. Варенов // *Геоморфология*. – 2013. – №1. – С. 73–82. – doi:10.15356/0435-4281-2013-1-73-81
11. Чалов, Р. С. Русловые процессы (русловедение): учебное пособие / Р. С. Чалов. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 565 с.
12. Gregory, K.J. The Human Role in Changing River Channels / K.J. Gregory // *Geomorphology*. – 2006. – № 79 (3). – P. 172–191. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.018>.
13. Development of a meandering channel caused by the planform shape of the river bank / T. Nagata, Y. Watanabe, H. Yasuda, A. Lto // *Earth Surface Dynamics*. – 2014. – 2(1). – P. 255–270. – URL: <https://doi.org/10.5194/esurf-2-255-2014>
14. Муракаев, Р. Р. Структура временных и постоянных водотоков в речных бассейнах центра ЕТР, Западной Сибири и Западного Тянь-Шаня: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Р. Р. Муракаев. – Москва, 2012. – 27 с.
15. Крюков, К. К. Структура малых и средних речных бассейнов Волгоградского правобережья и их антропогенное преобразование: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / К. К. Крюков – Москва, 2014. – 24 с.
16. A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India / P.K. Rai, K. Mohan, S. Mishra, A. Ahmad, V.N. Mishra // *Applied Water Science*. – 2017. – Vol. 7, №1. – P.217–232.
17. Zende, A.M. Prioritization of sub-watersheds in semiarid region, Western Maharashtra, India using Geographical Information System / A.M. Zende, R. Nagarajan, K.R. Atal // *American Journ. of Engineering Research (AJER)*. – 2012. – Vol. 2, №10. – P.128–135.
18. Симонов, Ю. Г. Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки / Ю. Г. Симонов, Т. Ю. Симонова // *Эрозия почв и русловые процессы*. – 2004. – Вып. 14. – С. 7–34.
19. Уфимцев, Г. Ф. Новейшая геодинамика Тункинского рифта (Прибайкалье) / Г. Ф. Уфимцев, А. А. Щетников, И. А. Филинов // *Литосфера*. – 2006. – № 2. – С. 95–102.

20. Planchon, O. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models / O. Planchon, F. Darboux // *Catena*. – 2002. – 46(2–3). – P.159–176.
21. Леонтьев, О. К. Общая геоморфология / О. К. Леонтьев, Г. И. Рычагов. – М.: Высш. шк., 1979. – 287 с.

Поступила в редакцию 17.02.2022

Безгодова Ольга Витальевна, аспирант 2 года обучения Лаборатории геоморфологии
ФГБУН «Институт Географии СО РАН»
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1
E-mail: ola.bezgodova.23@yandex.ru

O.V. Bezgodova

STRUCTURAL AND MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE SMALL RIVERS BASINS IN THE TUNKA SYSTEM

DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-1-31-41

The article provides a comparative analysis of the structural and morphometric features of the small river basins of the Tunka system on the example of the Ihe-Uhgun, Engarga, Tunka rivers (left tributaries of the Irkut river, Tunkinsky Golcy Ridge) and the rivers of the northern macroslope of the Khamar-Daban ridge (right tributaries of the Irkut river). Structural indices were obtained on the basis of the ALOS digital surface model (DSM) using GIS and compared with modal indicators to characterize the structural and morphometric features of the basins. The analysis of the indices distribution showed the greatest dissection of the Tunkinsky Golcy basins in the upper links of the erosion network. It was revealed that the basins of the third order, located within the Khamar-Daban ridge, are characterized by the greatest homogeneity of structural indices, and the basins of the depression bottoms have the greatest diversity in the distribution of structural indices. The leading role in the transformation of the relief and the transfer of matter for the small rivers of the Tunkinsky Golcy is played by watercourses of the 1st order; for small rivers of Khamar-Daban - 1st and 3rd orders.

Keywords: digital elevation model, morphometric analysis, small rivers basins, structural indices, Tunka system basins.

REFERENCES

1. Opekunova M.Yu., Bardash A.V., Tukhta S.A. [Structural analysis of the river basins of the Upper Angara region (on the example of the Oyok river basin)], in *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2018, no. 3, pp. 156–163. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(156-163) (in Russ.).
2. Gioia D, Schiattarella M, Mattei M, Nico G. Quantitative morphotectonics of the Pliocene to Quaternary Auletta basin, southern Italy, in *Geomorphology*, 2011, vol. no. 3–4, pp. 326–343, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.009>
3. Asode A.N., Sreenivasa A, Lakkundi T.K. Quantitative morphometric analysis in the hard rock Hirehalla sub-basin, Bellary and Davanagere Districts, Karnataka, India using RS and GIS, in *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, vol. 9, no. 381, <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2414-x>
4. Sassolas-Serrayet T., Cattin, R., Ferry M. The shape of watersheds, in *Nature Communications*, 2018, vol. 9, no. 3791, <https://doi.org/10.1038/s41467-0>
5. Bezgodova O.V. [Application of morphometric analysis for small river basins of the Baikal rift zone basins], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biol. Nauki o Zemle [Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences]*, 2021, vol. 31, no. 3, pp. 290–300. DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-3-290-300 (in Russ.).
6. Bezgodova O.V. [Digital modeling of small rivers morphometry in the Irkut river basin], in *Mater. Vseross. konf. s mezhd. uch. "XIV Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoring"*, Tomsk, IMCES RAS, 2021, pp. 171–174 (in Russ.).
7. *Nagor'ya Pribaykal'ya i Zabaykal'ya [Highlands of the Baikalia and Transbaikalia]*, Florensov N. A. (ed), Moscow: Nauka Publ., 1974, 359 p. (in Russ.).
8. Vyrkin V.B., Kuz'min V.A., Snytko V.A. Obshchnost' i razlichiya nekotorykh chert prirody Tunkinskoy vetvi kotlovina [Generality and differences of some features of the nature of the Tunka depressions branch], in *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 1991, no. 4, pp. 61–68 (in Russ.).
9. Kartushin V.A. *Agroklimaticheskie resursy juga Vostochnoj Sibiri [Agroclimatic resources of the south of Eastern Siberia]*, Irkutsk: Vost.–Sib. kn. izd-vo, 1969, 100 p. (in Russ.).
10. Varenov A.L. [Vertical deformations of small river channels (Kudma river basin) under anthropogenic impact], in *Geomorfologiya*, 2013, no. 1, pp. 73–82. doi:10.15356/0435-4281-2013-1-73-81(in Russ.).

11. Chalov R.S. Ruslovyje processy (ruslovedenie) [Channel processes (channel science)], Moscow: INFRA-M Publ., 2016, 565 p. (in Russ.).
12. Gregory K.J. The Human Role in Changing River Channels, in *Geomorphology*, 2006, no.79(3), pp. 172–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.018>.
13. Nagata T., Watanabe Y., Yasuda H., Lto A. Development of a meandering channel caused by the planform shape of the river bank, in *Earth Surface Dynamics*, 2014, no.2, pp. 255–270. <https://doi.org/10.5194/esurf-2-255-2014>.
14. Murakaev R.R. *Struktura vremennyh i postojannyh vodotokov v rechnyh bassejnah centra ETR, Zapadnoj Sibiri i Zapadnogo Tjan'-Shanja* [The structure of temporary and permanent watercourses in the river basins of the center of the EPR, Western Siberia and the Western Tien Sha], Abstract of diss. Cand. Geogr. sci., Moscow, 2012, 27 p. (in Russ.).
15. Kryukov K.K. *Struktura malyh i srednih rechnyh bassejnov Volgogradskogo pravoberezh'ja i ih antropogennoe preobrazovanie* [The structure of small and medium river basins of the Volgograd right bank and their anthropogenic transformation], Abstract of diss. Cand. Geogr. sci., Moscow, 2014, 24 p. (in Russ.).
16. Rai P.K., Mohan K., Mishra S., Ahmad A., Mishra V.N. A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India, in *Applied Water Science*, 2017, vol. 7, no 1, pp. 217–232.
17. Zende A.M., Nagarajan R., Atal K.R. Prioritization of sub-watersheds in semiarid region, Western Maharashtra, India using Geographical Information System, in *American Journ. of Engineering Research (AJER)*, 2012, vol. 2, no. 10, pp. 128–135.
18. Simonov Yu.G., Simonova T.Yu. Rechnoj bassejn i bassejnovaja organizacija geograficheskoj obolochki [River basin and basin organization of the geographic envelope], in *Eroziya pochv i ruslovyje protsessy*, Moscow, 2004, vol. 14, pp. 7–34 (in Russ.).
19. Ufimtsev G.F., Shchetnikov A.A., Filinov I.A. [Recent geodynamics of the Tunka rift (Pribaikalye)], in *Lithosphaera*, 2006, no. 2, pp. 95–102 (in Russ.).
20. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models, in *Catena*, 2002, no. 46(2–3), pp. 159–176.
21. Leont'ev O.K., Rychagov G.I. *Obshchaya geomorfologiya* [General geomorphology], Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1979, 287 p. (in Russ.).

Received 17.02.2022

Bezgodova O.V., Postgraduate student of Laboratory of Geomorphology
Institute of Geography SB RAS
Ulan-Batorskaya st., 1, Irkutsk, Russia, 664033
E-mail: ola.bezgodova.23@yandex.ru