



УДК 551.435.1(571.55)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.37.3>

Структурно-морфометрический анализ малого речного бассейна реки Ихе-Ухгунь (бассейн реки Иркут)

О. В. Безгодова

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Осуществлен структурно-морфометрический анализ малых рек на примере бассейна р. Ихе-Ухгунь (левый приток р. Иркут), который расположен в уникальных геолого-геоморфологических условиях западной ветви котловин зоны Байкальского рифта. В основе работы лежат геоморфометрический и структурный морфометрический методы анализа бассейнов низших порядков, а также методика геоинформационного картографирования и моделирования рельефа. С помощью анализа гидрологически корректной цифровой модели рельефа в программной среде ГИС проведено моделирование эрозионной сети тальвегов до 4-го порядка бассейна р. Ихе-Ухгунь. В результате построена карта-схема эрозионной сети бассейна, на основе которой получены морфометрические показатели рек (длина, площадь бассейнов, сумма уклонов, коэффициент асимметрии бассейна и т. д.), а также рассчитаны различные структурные индексы бассейнов 3-го порядка: структуры бифуркации, длин, площадей и уклонов. Выявлены неоднородная структура и асимметричность эрозионной сети бассейна с преобладанием в переносе вещества водотоков 1-го порядка, а также существенные различия в морфометрии водотоков с преобладанием по всем показателям водотоков 1-го порядка. Модальным показателям индексов структуры соответствуют реки Хургуты, Хубыты и Улан-Гол, что свидетельствует об однородности бассейнов.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая зона, геоинформационные системы, малые речные бассейны, морфометрический анализ, структурные индексы, цифровые модели рельефа.

Для цитирования: Безгодова О. В. Структурно-морфометрический анализ малого речного бассейна реки Ихе-Ухгунь (бассейн реки Иркут) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 37. С. 3–16. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.37.3>

Введение

Малые реки, как средние и большие, являются важным звеном флювиальной сети, в которой осуществляется миграция энергии и вещества водными потоками на земной поверхности. По протяженности и количеству малые реки во много раз превосходят показатели средних и больших рек – только на территории России почти 3 млн малых рек, что составляет 99 % от общего количества всех рек с суммарной длиной около 95 % от общей длины речной сети [Ротмистров, 2004]. Малые реки выступают элементарной единицей речной сети и наиболее чувствительны к изменениям компонентов природной среды, поэтому экологическое состояние малых рек служит общим индикатором природных и антропогенных процессов на водосборах.

В формировании начальных элементов речной сети ведущая роль принадлежит геоморфологическим и климатическим особенностям, при этом в настоящее время анализ геометрии рельефа на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР) выходит на первый план в связи с наглядностью, точностью и простотой выполняемых операций [Геоэкологическое районирование территории... , 2017; Ермолаев, Иванов, 2017; Опекунова, Бардаш, 2020]. В ГИС с достаточной точностью создаются модели реальной русловой сети, существующей на местности (особенно точно в областях интенсивного эрозионного расчленения). Цифровое моделирование малых речных бассейнов позволит решить вопросы природопользования изучаемых территорий, оценить степень подверженности бассейнов экзогенным геоморфологическим процессам и антропогенного преобразования.

Малым рекам в настоящий момент все больше уделяется внимания в исследованиях на территории европейской части России [Ротмистров, 2004; Варенов, 2013]. Однако наблюдения и изучение малых рек в пределах Байкальской рифтовой зоны довольно редки [Захаров, Кичигина, 2011; Безгодова, 2019]. Для сохранения экологического баланса малых речных бассейнов, для ведения хозяйственной и рекреационной деятельности актуальным вопросом является цифровое моделирование рельефа эрозионной сети с элементами гидрологического анализа, что затем можно применить для мониторинга водных объектов, исследований перераспределения загрязняющих веществ и грамотного использования речных ресурсов и т. д.

В основе гидрологической оценки лежит геоморфометрический и структурный морфометрический анализ бассейнов низших порядков [Опекунова, Бардаш, 2017; Амосова, Ильичева, 2020; Patton, Baker, 1976; Singh, Thakur, Umesh, 2013; Mahala, 2020]. ЦМР и спутниковые данные крайне эффективны для бассейнов с существенными высотными амплитудами земной поверхности, что позволяет существенно снизить трудоемкость геоморфологического картографирования в целях изучения моделей перераспределения поверхностного стока и элементов бассейновой структуры территории. Геоморфометрический и структурный морфометрический анализ процессов в водосборах с помощью ЦМР широко применяется российскими и зарубежными исследователями [Ермолаев, Иванов, 2017; Опекунова, Бардаш, 2020; Lindsay, 2003; Ryan, Boyd, 2003; Mishra, Dubey, Tiwari, 2011; Morphometric analysis of ... , 2011; Multi-scale modeling ... , 2014].

Целью данной работы ставилось проведение структурно-морфометрического анализа малого речного бассейна на примере р. Ихе-Ухгунь, в основе которого лежит комплексная обработка цифровой модели рельефа. Автором решались следующие задачи: 1) подготовка гидрологически корректной цифровой модели рельефа по спутниковым данным ALOS Digital Surface Model (DSM); 2) автоматизированный расчет и картографирование эрозионной сети бассейна по данным ЦМР; 3) расчет структурных показателей для анализа бассейновой организации речной сети малых рек.

Для бассейна р. Ихе-Ухгунь (левый приток р. Иркут), находящегося в различных ландшафтных и геолого-геоморфологических условиях, струк-

турно-морфометрический анализ с помощью ГИС практически не производился. Поэтому комплексная оценка рельефа и морфометрии на малых реках бассейна позволит повысить степень картографической изученности геоморфологических, структурных и гидрологических параметров. На данную территорию отсутствует ряд геоморфологических и гидрологических карт, например карты-схемы эрозионной сети. Интерес к исследованию данной территории повышается в связи с уникальностью геоморфологических свойств бассейна р. Ихе-Ухгунь, которая заключается в особенностях генетического, морфологического строения и амплитуды высот речного бассейна.

Объект и методы исследования

Бассейн р. Ихе-Ухгунь расположен в пределах Хойтогорьской котловины, которая входит в Тункинскую систему впадин Байкальской рифтовой зоны. Главным водоразделом бассейна является хребет Тункинские Гольцы с максимальной высотой 3134 м (в. Алтан-Мундарга). Протяженность реки Ихе-Ухгунь – 76 км, падение реки – 1207,2 м. Площадь бассейна – 836 км², расход реки – 3,16 м³/с [Автоматизированная ... , 2020]. Средняя и наибольшая ширина бассейна – 15,5 и 23 км соответственно. Основные притоки р. Ихе-Ухгунь – Ихе-Булнай, Улан-Гол, Хургуты, Хаюрта, Хубыты, Малый и Большой Холголдой (левые).

Питание рек бассейна осуществляется за счет атмосферных осадков, а также таяния снега. При этом особенность всех малых речных бассейнов Тункинских Гольцов состоит в том, что максимумы летних осадков в июле-августе способствуют возникновению дождевых паводков, превышающих весеннее половодье. Ледостав на р. Ихе-Ухгунь с притоками приходится на октябрь – начало ноября, ледоход – на конец апреля – начало мая.

В геологическом строении территории бассейна выделяются три части: саянский комплекс верхнепротерозойских интрузий в северной части в пределах Тункинских Гольцов; комплекс неогеновых вулканогенных образований на юге и востоке бассейна в пределах Ниловской перемычки; комплекс четвертичной системы среднелепистоценовый – голоценовый в центральной части Хойтогорьской котловины. Структура Тункинских Гольцов осложнена системой тектонических разломов, к которым чаще всего приурочены долины малых рек. При этом центральная часть исследуемого бассейна представляет собой опущенный участок фундамента, заполненный рыхлыми четвертичными отложениями. Гидрографическая сеть территории подчинена особенностям местной тектоники, что заметно по границам тектонических блоков в Тункинских Гольцах, которые отражаются на форме продольных профилей рек, обуславливая их перегибы на фоне общей вогнутости.

Общая лесистость бассейна Ихе-Ухгунь составляет 53,7 %. Наибольший процент лесного покрова приходится на горную часть бассейна р. Ихе-Ухгунь на склонах Гольцов и Ниловской перемычки до 1800 м, а также на предгорную наклонную равнину. В центральной части бассейна леса антропогенно преобразованы или сведены под хозяйственные нужды – пашню, сенокосы, вырубki, часто встречаются заброшенные участки. В пределах бассейна

р. Ихе-Ухгунь расположены населенные пункты: улус Хойто-Гол и пос. Ниловка с курортом Нилова Пустынь. Горная часть бассейна освоена для рекреационных целей – здесь проходят многочисленные тропы к вершинам Гольцов, а также на Шумацкие минеральные источники (спортивный, лечебно-оздоровительный и экологический туризм).

В исследованиях автором применялись следующие методы: математический, дистанционного зондирования, геоинформационного картографирования, геоморфологический. Анализ данных морфометрии и морфодинамики малых рек проводился с использованием отечественных работ по русловедению Р. С. Чалова [2008], А. В. Чернова [2009] и зарубежных М. Church, R. I. Ferguson [2015], Р. Е. Lisenby, К. А. Fryirs [2015]. К настоящему времени для территории Хойтогорьской котловины исследования физико-географических компонентов практически не проводились, за исключением общих работ по тектонике и сейсмичности Тункинского рифта [Флоренсов, 1960; Щетников, Уфимцев, 2004].

Для построения производных ЦМР автором использовались данные японской спутниковой системы ALOS Global Digital Surface Model (DSM), с горизонтальным разрешением сетки приблизительно 30 м (1 арксекунда), фрагментами размером 1×1 град. Космические снимки имеют вид 32-битного растра, где заданной точке соответствует атрибут пиксела с определенной высотой над уровнем моря. Референц-эллипсоид спутниковых данных – WGS-84.

Подготовка ЦМР выполнялась в программе SAGA GIS (версия 7.8.1); оформление, получение карты эрозионной сети и анализ данных – в программе ArcGIS 10 (ESRI Inc.). Для проведения гидрологического анализа перед началом работы ставилась задача сменить проекционную систему ЦМР с поверхности сферы на прямоугольную плоскость. Для модели присвоена проекционная система координат UTM в SAGA GIS с помощью модуля Coordinate Transformation (Grid), проводилась обрезка растра по границам бассейна р. Ихе-Ухгунь. Завершающим этапом подготовки ЦМР стал процесс удаления «ложных впадин», которые представляют собой пустоты в цифровой модели, полученные из-за ошибок интерполяции, округления и усреднения значений высот. Автором выбран метод последовательного увеличения значений высоты в ячейках впадины до значений, пока не станет возможным сток вниз по склону с тем ограничением, что сток не может вернуться обратно в ячейку впадины [Planchon, Darboux, 2002]. В SAGA GIS данный метод представлен в виде модуля Fill Sinks (Planchon/Darboux, 2002).

Моделирование поверхностей рельефа малого водосборного бассейна, в частности эрозионной сети, имеет экспериментальный характер, так как практический опыт проведения морфометрического и структурного анализа при описании геоморфологических и гидрологических особенностей территории системы Тункинского рифта в пределах Хойтогорьской котловины отсутствует.

Результаты исследований

Для верховий бассейнов малых рек Тункинской системы впадин в периоды повышенной водности (июль – август) характерно повышение порядка речной системы: водотоки 1-го порядка становятся водотоками 2-го и 3-го порядков вследствие появления стока в системе временных водотоков. Здесь прослеживается главная особенность эрозионной сети, а именно ее способность к самоорганизации, где морфометрические показатели являются важной основой функционирования речной системы (связь с динамикой стока и особенностями речной сети) [Симонов, Симонова, 2004].

Моделирование эрозионной сети бассейна р. Ихе-Ухгунь проводилось в программе ArcGIS 10, где для определения порядка тальвегов использовалась методика Стралера (Strahler) – Философова. Суть методики заключается в том, что за долину 1-го порядка принимается долина, в которую не впадает ни одна долина. При слиянии двух долин 1-го порядка образуется долина 2-го порядка, при слиянии долин 2-го порядка образуется долина 3-го порядка и т. д. С помощью гидрологических модулей Flow Direction и Stream Order (Spatial Analyst, Hydrology) на основе подготовленной грид-модели рельефа бассейна построена карта-схема эрозионной сети бассейна р. Ихе-Ухгунь (рис. 1). В результате для бассейна р. Ихе-Ухгунь получены тальвеги до 4-го порядка.

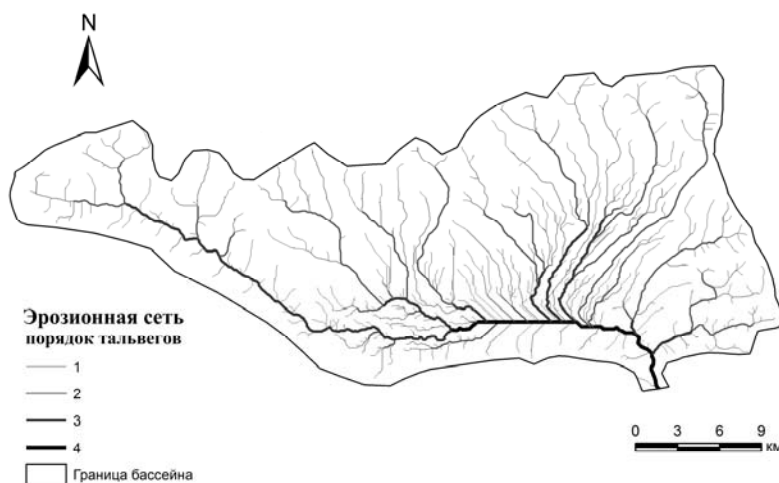


Рис. 1. Карта-схема эрозионной сети бассейна р. Ихе-Ухгунь

На построенной карте-схеме эрозионной сети исследуемого участка отчетливо прослеживается асимметрия бассейна, где количество и общая протяженность левых притоков значительно превышают данные показатели правых. Такая закономерность наблюдается и для других бассейнов малых рек Тункинской системы котловин. Например, для бассейна р. Тунка характерно преобладание левых притоков, для бассейна р. Енгарга – правых. Коэффициент асимметрии бассейна указывает на степень симметричности по-

ложения тальвегов – боковое или центрируемое относительно главной реки, т. е. приуроченность речной сети к одному из водоразделов. Коэффициент определяется по формуле

$$a = 2 \frac{(F_l - F_n)}{F_l + F_n}, \quad (1)$$

где F_l – площадь левобережной части бассейна в км², а F_n – площадь правобережной части бассейна в км². Коэффициент асимметрии бассейна р. Ихе-Ухгунь, рассчитанный по формуле (1), равен 0,79.

Асимметрия бассейна связана с неблагоприятными геолого-геоморфологическими и климатическими условиями для образования эрозионной сети, такими как: малая площадь водоразделов в южной части бассейна, вулканические породы без водоупорных горизонтов в пределах Ниловской перемычки, меньшее поступление атмосферных осадков. Для проведения расчетов суммарной длины эрозионной сети (табл. 1) растровая модель разнопорядковых тальвегов переведена в векторную основу.

Таблица 1

Общая длина тальвегов разных порядков в бассейне р. Ихе-Ухгунь

Порядок тальвегов	Общая длина		Средняя длина, км
	км	%	
1	248,9	50,7	2,1
2	156,5	31,8	2,6
3	66,8	13,6	2,1
4	18,9	3,8	18,9
Итого	491,1		

Из табл. 1 видно, что распределение длин разнопорядковых тальвегов подчиняется обратному экспоненциальному закону. На элементы эрозионной сети 1-го порядка приходится 50 % суммарной длины, а на суммарную длину тальвегов 1–2-го порядков – почти 83 % общей длины. Густота речной сети бассейна р. Ихе-Ухгунь составляет 0,58 км/км². Большая часть водотоков 1-го порядка приурочена к Тункинским Гольцам в северной части бассейна, 2-го порядка – к предгорной наклонной равнине. На правобережной части бассейна более 75 % водотоков имеют временный характер, где в пределах Ниловской перемычки этот показатель достигает 97 %. Это в свою очередь указывает на неустойчивость питания реки и годовые колебания речного стока всего бассейна.

На построенной карте эрозионной сети в центральной части бассейна прослеживаются спрямленные водотоки 1-го и 2-го порядков. Это объясняется наличием на данной территории мелиоративных и спрямляющих каналов, а также небольших уклонов поверхности, в результате чего при применении автоматического картографирования здесь обнаружилась сеть каналов. С учетом сезонности стока и характера ливневых осадков многие из спрямленных участков имеют место, исходя из анализа космических снимков Maxar Technologies за 2020 г.

Построенный на основе векторного слоя и ЦМР продольный профиль р. Ихе-Ухгунь (рис. 2) в верхней и нижней частях имеет ступенчатый вид: в верхнем течении это объясняется прохождением рекой трудных к размыву интрузивных комплексов в пределах Тункинских Гольцов, тогда как в нижнем течении река проложила себе путь из выровненного и опущенного участка фундамента к р. Иркут через Ниловскую перемычку, в результате чего образовалась antecedентная долина с крутыми бортами и отвесными скалами. Река выбрала путь по контакту между продольным и поперечным горстами Ниловской перемычки протяженностью 4,5 км. Русло реки здесь имеет ширину 34–39 м, но при этом узкую пойму – до 10 м. Глубина реки здесь в среднем изменяется от 1,1 до 1,9 м, скорость течения – 0,45 м/с и нарастает до 0,60 м/с по мере сужения долины [Автоматизированная ... , 2020].

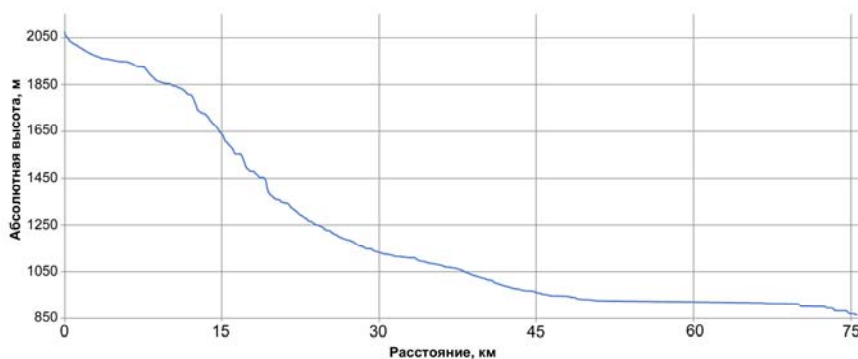


Рис. 2. Продольный профиль р. Ихе-Ухгунь

Для анализа бассейновой организации речной сети малых рек автором выбран методический подход, основанный на морфометрическом анализе речных бассейнов, который детально проработан для геоморфологических исследований в работах Ю. Г. Симонова и Т. Ю. Симоновой [1998, 2004]. В основе метода лежит оценка ряда структурных индексов, выражающих соотношение морфометрических характеристик разнопорядковых водотоков в бассейнах 3-го порядка. Для каждого индекса бассейнов 3-го порядка рассчитываются модальные индексы, которые не зависят от генетической, структурно-тектонической, литологической, ландшафтно-гидрологической составляющих и рассматриваются в качестве эталонных [Опекунова, Бардаш, 2017]. С помощью полученной карты эрозионной сети тальвегов бассейна р. Ихе-Ухгунь в ГИС автором определены следующие структурные индексы (табл. 2): индекс структуры бифуркации (ИСБ), индекс структуры длин (ИСД), индекс структуры площадей (ИСП) и индекс структуры уклонов (ИСУ). Порядок малых речных бассейнов определялся по полученной карте-схеме эрозионной сети (см. рис. 1), все морфометрические показатели водотоков собраны с помощью программы ArcGIS 10. В бассейне р. Ихе-Ухгунь выделено 7 подбассейнов 3-го порядка (см. табл. 2), которые расположены в левобережной части бассейна.

Таблица 2

Структурные индексы подбассейнов 3-го порядка бассейна р. Ихе-Ухгунь

Название водотока 3-го порядка	Индексы структуры				Площадь, км ²
	Бифуркации (ИСБ = 134)	Длин (ИСД = 136)	Площадей (ИСП = 532)	Уклонов (ИСУ = 631)	
Ихе-Булнай	154	541	523	541	73
Улан-Гол	123	541	532	451	46
Хургуты	124	442	631	631	29
Хаюрта	122	622	811	541	62
Хубыты	142	541	631	631	26
Хонголкой	122	541	442	352	25
Малый Хонголкой	123	541	541	343	27

Индекс структуры бифуркации является соотношением количества разнопорядковых водотоков в бассейнах 3-го порядка. По Ю. Г. Симонову [1998], модальный индекс структуры бифуркации равен 134, где 1 – количество водотоков 3-го порядка; 3 – количество водотоков 2-го порядка; 4 – количество водотоков 1-го порядка на каждый водоток 2-го. Как видно из табл. 2, индексы структуры бифуркации подбассейнов 3-го порядка не соответствуют модальному значению ИСБ = 134. Больше всего модальному значению бифуркации соответствует бассейн р. Хургуты, меньше – р. Хонголкой. Так, с западной части бассейна р. Ихе-Ухгунь к восточной части наблюдается общее снижение количества водотоков 1-го и 2-го порядков, что связано с меньшим вертикальным расчленением рельефа (снижением амплитуды абсолютных высот). У подбассейнов с небольшой водосборной площадью (реки Хонголкой, Малый Хонголкой, Хургуты и т. д.) наблюдается простая структура бифуркации.

Соотношение средних длин водотоков разных порядков выражается индексом структуры длин, что в модальном показателе равен 136, где 1 – средние длины водотоков 1-го порядка, равные около 10 %; 3 – длины 2-го порядка, равные 30 %; 6 – длины 3-го порядка – около 60 %. Для подбассейнов 3-го порядка р. Ихе-Ухгунь наблюдается значительное отклонение от модального значения, где чаще всего отмечен ИСД = 541. Такая структура длин связана с развитой сетью водотоков 1-го порядка в гольцовой части бассейна и отсутствием условий для развития водотоков 3-го порядка (не успев выйти в днище Хойтогольской котловины, реки 3-го порядка впадают в р. Ихе-Ухгунь). Наибольшая протяженность водотоков выявлена в подбассейнах рек Ихе-Булнай (60,85 км) и Хубыты (55,78 км), которые в 2 раза превышают этот показатель для других подбассейнов. Здесь наблюдается особенность в структуре водотоков низших порядков, а именно повышенная протяженность при небольшой площади бассейна на выходе из гольцовой части бассейна.

Индекс структуры площадей – соотношение средних площадей разнопорядковых бассейнов, где модальный индекс структуры площадей равен 532 (50 % – площади склонов, занимающие водосборы 1-го порядка; 30 % – площади склонов, опирающиеся на притоки 2-го порядка; 20 % – площади

склонов, опирающиеся на притоки 3-го порядка). Анализ распределения структурного индекса площадей для бассейна р. Ихе-Ухгунь (см. табл. 2) выявил только одно соответствие модальному индексу ИСП = 532 для подбассейна р. Улан-Гол. Также наибольшее соответствие модальному значению показывает бассейн р. Ихе-Булнай (ИСП = 523). Остальные же подбассейны, особенно рек Хургуты, Хаюрта и Хубыты, значительно отклоняются от модального индекса. В большинстве случаев площади бассейнов 3-го порядка меньше модальных значений, что связано с их небольшой протяженностью.

ИСУ – индекс структуры уклонов, выражающий соотношение средних уклонов разнопорядковых водотоков в бассейне в процентах, где сумма средних уклонов в бассейне – 100 %. Модальный ИСУ = 631, где 60 % приходится на уклоны водотоков 1-го порядка, 30 % – на уклоны водотоков 2-го и 10 % – на уклоны 3-го порядка. Для бассейна р. Ихе-Ухгунь индекс структуры уклонов имеет наибольшее совпадение с модальным значением по сравнению с другими индексами (подбассейны рек Хургуты и Хубыты). Для подбассейнов 3-го порядка с большими площадями значения ИСУ отличаются от модального на 10–20 % для водотоков 1-го и 2-го порядков. Значительные отличия в индексе структуры уклонов наблюдаются для бассейнов рек Малый Хонголкой и Хонголкой (343 и 352 соответственно). Здесь повышается роль водотоков 3-го порядка, что нетипично для других структурных индексов. Такое расхождение объясняется равномерным распределением показателей вертикального расчленения в пределах данных бассейнов, где при этом в нижнем течении рек отмечаются восходящие тектонические движения, увеличивающие врез водотоков 3-го порядка, а следовательно, и крутизну прилегающих склонов.

Заключение

Впервые для уникального в геоморфологическом плане бассейна малой реки р. Ихе-Ухгунь на базе ГИС (ArcGIS 10) с использованием автоматизированных процедур выполнены морфометрический анализ и расчеты структурных индексов по гидрологически корректной цифровой модели рельефа ALOS DSM, составлена карта-схема эрозионной сети бассейнов 1–4-го порядков. Асимметричная эрозионная сеть бассейна указывает на большую работу в переносе вещества водотоков 1-го порядка, которые по площади водосборов, протяженности и крутизне прилегающих склонов превосходят водотоки 2-го и 3-го порядков. С помощью структурных индексов и их сравнения с модальными показателями наиболее полно прослеживается взаимосвязь морфометрических характеристик разнопорядковых водотоков внутри подбассейнов 3-го порядка. В целом для бассейна р. Ихе-Ухгунь характерна неоднородная структура соотношения водотоков 1-го, 2-го и 3-го порядков. Наибольшей степенью однородности обладают бассейны рек Хургуты, Хубыты и Улан-Гол, демонстрируя совпадение с модальными значениями только по двум структурным индексам. При этом для бассейна р. Ихе-Ухгунь отсутствует прямая взаимосвязь с площадью водосборных

бассейнов 3-го порядка. Анализ морфометрических характеристик водотоков низших порядков позволяет дополнить комплексные исследования малых речных бассейнов, выявить местные особенности и тенденции развития русловых процессов, дать обоснование развитым экзогенным процессам, ряд которых относится к классу катастрофических и неблагоприятных (сели, обвалы, лавины, речная и овражная эрозия, заболачивание).

Список литературы

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов: Данные наблюдений за водными объектами (их морфометрическими особенностями). 2020. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=422> (дата обращения: 11.09.2020).

Амосова И. Ю., Ильичева Е. А. Пространственное распределение структурно-гидрографических характеристик речных систем бассейна озера Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 34. С. 21–36. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.21>

Безгодова О. В. Природные и антропогенные факторы формирования русел малых рек Тункинской котловины (Республика Бурятия) // Геосферные исследования. 2019. № 4. С. 6–14. <https://doi.org/10.17223/25421379/13/1>

Варенов А. Л. Вертикальные деформации русел малых рек под влиянием антропогенных факторов (бассейн р. Кудьмы) // Геоморфология. 2013. № 1. С. 73–82. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2013-1-73-81>

Геоэкологическое районирование территории Архангельской области с использованием цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий / А. Л. Минеев, Ю. Г. Кутинов, З. Б. Чистова, Е. В. Полякова // Пространство и время. 2017. № 2-3-4(28-29-30). С. 267–288.

Ермолаев О. П., Иванов М. А. Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным SRTM и ASTER GDEM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 98–109.

Захаров В. В., Кичигина Н. В. Роль речного стока в формировании русловых процессов высокогорной области Восточного Саяна (в верховьях рек Иркутка, Китоя, Оки) // Рельеф и экзогенные процессы гор. Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2011. Т. 2. С. 76–79.

Опекунова М. Ю., Бардаш А. В. Геоморфометрический анализ рельефа бассейна реки Ия // VIII Шукинские чтения: рельеф и природопользование. М. : Изд-во геогр. фак-та МГУ, 2020. С. 514–520.

Опекунова М. Ю., Бардаш А. В. Соотношение структурных показателей речных бассейнов Верхнего Приангарья // Вестник Бурятского государственного университета. Серия: Биология, география. 2017. № 4. С. 97–106.

Ротмистров В. Л. Малые реки Ярославского Поволжья. Ярославль : Изд-во ВВО РЭА, 2004. С. 8–9.

Симонов Ю. Г. Морфометрический анализ рельефа. М. ; Смоленск : Изд-во СГУ, 1998. 272 с.

Симонов Ю. Г., Симонова Т. Ю. Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки // Эрозия почв и русловые процессы. М., 2004. Вып. 14. С. 7–32.

Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 610 с.

Чернов А. В. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. М. : Крона, 2009. 684 с.

Флоренсов Н. А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 259 с.

Щетников А. А., Уфимцев Г. Ф. Структура рельефа и новейшая тектоника Тункинского рифта. М.: Научный мир, 2004. 160 с.

Church M., Ferguson R. I. Morphodynamics: Rivers beyond steady state // *Water Resources Research*. 2015. Vol. 51, N 4 P. 1883–1897. <https://doi.org/10.1002/2014WR016862>

Lindsay J. B. A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms // *Water Resources Research*. 2003. Vol. 39. P. 1332–1338.

Lisenby P. E., Fryirs K. A. Catchment- and reach-scale controls on the distribution and expectation of geomorphic channel adjustment // *Water Resources Research*. 2016. Vol. 52, N 5. P. 3408–3427. <https://doi.org/10.1002/2015WR017747>

Mahala A. The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings // *Appl. Water Sci.* 2020. Vol. 10. P. 10–33. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>

Mishra A., Dubey D. P., Tiwari R. N. Morphometric analysis of Tons basin, Rewa District, Madhya Pradesh, based on watershed approach. *Earth Science India*, 2011. Vol. 4, N 3. P. 171–180.

Morphometric analysis of the upper catchment of Kosi River using GIS techniques / H. B. Wakode, D. Dutta, V. R. Desai, K. Baier // *Arabian Journal of Geosciences*. 2011. Vol. 6, N 2. P. 395–408.

Multi-scale modeling of river morphodynamics / M. Nabi, S. Giri, T. Iwasaki, I. Kimura, S. Shimizu // *Conference: River Flow*. 2014. P. 75–83. <https://doi.org/10.1201/b17133-167>

Patton P. C., Baker V. R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls // *Water Resources Research*. 1976. Vol. 12, N 5. P. 941–952.

Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // *Catena*. 2002. Vol. 46, N 2-3. P. 159–176.

Ryan C., Boyd M. CatchmentSIM: a new GIS tool for topographic geo-computation and hydrologic modelling // *Proc. 28th Int. Hydrol. Water Resour. Symp.*, Wollongong, 10–14 Nov. 2003. Barton: Institution of Engineers Australia, 2003. Vol. 1. P. 35–42.

Singh P., Thakur J. K., Umesh U. C. Morphometric analysis of Morar River Basin, Madhya Pradesh, India, using remote sensing and GIS techniques // *Environmental Earth Sciences*. 2013. Vol. 68, N 7. P. 1967–1977. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1884-8>

Structural and Morphometric Analysis of the Ihe-Ukhgun Small River Basin (Irkut River Basin)

O. V. Bezgodova

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the structural and morphometric analysis of a small rivers using the example of the Ihe-Ukhgun river basin (left tributary of the Irkut river), which is based on a complex processing of a digital elevation model (DEM). The author has prepared a hydrologically correct DEM based on the ALOS Digital Surface Model (DSM) satellite data, carried out an automated calculation and mapping of the basin erosion network based on the DEM data, calculated the structural indicators of the third-order basins for analyzing the basin organization of the small rivers network. Structural and morphometric analysis using GIS was practically not used for the Ihe-Ukhgun river basin which is placed in different landscapes, geological and geomorphological conditions. The work is based on geomorphometric and structural morphometric methods as well as the method of geoinformation mapping and relief

modeling for analyzing lower-order basins. Thalweg erosion network modeling up to the fourth order of the river basin Ihe-Uhgun was carried out with using of DEM analysis in the ArcGIS 10 program. The map of the erosional network of the basin was constructed, morphometric indicators of rivers (length, area of basins, sum of slopes, coefficient of basin asymmetry, etc.) were obtained, and then the indices of the basin structure (structure of bifurcation, lengths, areas and slopes) were calculated. As a result, an asymmetric erosion network was revealed, which indicates a great work in the transfer of matter of first-order streams. First-order streams exceed those of the second and third orders streams in terms of catchment area, length and steepness of adjacent slopes. The interrelation of morphometric characteristics of different-order streams within third order sub-basins are most fully traced with the using of structural indices and their comparison with modal indicators. In general, the Ihe-Ukhgun river basin is characterized by a heterogeneous structure of the streams ratio of the first, second and third orders. The basins of the Khurguta, Khubyty and Ulan-Gol rivers have the highest degree of homogeneity. At the same time, for the Ihe-Ukhgun river basin, there is no direct relationship with the area of the third order drainage basins.

Keywords: digital elevation models, geographic information systems, morphometric analysis, small river basins, structural indexes, the Baikal rift zone.

For citation: Bezgodova O.V. Structural and Morphometric Analysis of the Ihe-Ukhgun Small River Basin (Irkut River Basin). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2021, vol. 37, pp. 3-16. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.37.3> (in Russian)

References

Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob"ektov [Automated information system for state monitoring of water objects]. Available at: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=422> (date of access: 11.09.2020) (in Russian)

Amosova I.Y., Ilicheva E.A. Prostranstvennoe raspredelenie strukturno-gidrograficheskikh kharakteristik rechnykh sistem basseina ozera Baikal [Spatial Distribution of Structural and Hydrographic Characteristics of River Systems in the Lake Baikal Basin]. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2020, vol. 34, pp. 21-36. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.21> (in Russian)

Bezgodova O.V. Prirodnye i antropogennye faktory formirovaniya rusel malykh rek Tunkinskoi kotloviny (Respublika Buryatiya) [Natural and anthropogenic factors in formation of small river channels in the Tunka depression (Republic of Buryatia)]. *Geosfernye issledovaniya*, 2019, no. 4, pp. 6-14. <https://doi.org/10.17223/25421379/13/1> (in Russian)

Varenov A.L. Vertikalnye deformatsii rusel malykh rek pod vliyaniem antropogennykh faktorov (bassein r. Kudmy) [Vertical deformations of small river channels under the influence of anthropogenic factors (Kudma river basin)]. *Geomorphology*, 2013, no. 1, pp. 73-82. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2013-1-73-81> (in Russian)

Mineev A.L., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V. Geoekologicheskoe raionirovanie territorii Arkhangel'skoi oblasti s ispol'zovaniem tsifrovyykh modelei rel'efa i GIS-tekhnologii [Geocological zoning of the Arkhangelsk region using digital elevation models and GIS technologies]. *Prostranstvo i Vremya*, 2017, no. 2-3-4(28-29-30), pp. 267-288. (in Russian)

Ermolaev O.P., Ivanov M.A. Geomorfometricheskii analiz basseinovyykh geosistem Privolzhskogo federal'nogo okruga po dannym SRTM i ASTER GDEM [Geomorphometric analysis of basin geosystems in the Volga Federal District according to SRTM and ASTER GDEM data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 2, pp. 98-109. (in Russian)

Zakharov V.V., Kichigina N.V. Rol rechnogo stoka v formirovanii ruslovyykh protsessov vysokogornoi oblasti Vostochnogo Sayana (v verkhov'yakh rek Irkuta, Kitoya, Oki) [The role of river runoff in formation of channel processes in the high-mountainous region of the Eastern

Sayan (in the upper reaches of the Irkut, Kitoi, Oka rivers)]. *Relief i ekzogennye protsessy gor*. Irkutsk, Institute of Geography SB RAS Publ., 2011, vol. 2, pp. 76-79. (in Russian)

Opekunova M.Yu., Bardash A.V. Geomorfometricheskii analiz rel'efa basseina reki Iya [Geomorphometric analysis of the Iya river basin relief]. *VIII Shchukinskiye chteniya: rel'ef i prirodopolzovanie* [VIII Shchukin readings: relief and nature management]. Moscow, Geography faculty of MGU Publ., 2020, pp. 514-520. (in Russian)

Opekunova M.Yu., Bardash A.V. Sootnoshenie strukturnykh pokazatelei rechnykh basseinov Verkhnego Priangar'ya [Ratio of structural indicators of river basins of the Upper Angara region]. *The Bulletin of Buryat State University. Series Biology, Geography*, 2017, no. 4, pp. 97-106. (in Russian)

Rotmistrov V.L. *Malye reki Yaroslavskogo Povolzh'ya* [Small rivers of the Yaroslavl Volga region]. Yaroslavl, VVO REA Publ., 2004, pp. 8-9. (in Russian)

Simonov Yu.G. *Morfometricheskii analiz rel'efa* [Morphometric analysis of relief]. Moscow, Smolensk, Smolensk State University Publ., 1998, 272 p. (in Russian)

Simonov Yu.G., Simonova T.Yu. Rechnoi bassein i basseinovaya organizatsiya geograficheskoi obolochki [River basin and basin organization of the geographic envelope]. *Eroziya pochv i ruslovye protsessy*. Moscow, 2004, no. 14, pp. 7-32. (in Russian)

Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Channel rivers studies: theory, geography, practice. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions for the formation of river channels.]. Moscow, LKI Publ., 2008, vol. 1, 610 p. (in Russian)

Chernov A.V. *Geografiya i geoekologicheskoe sostoyanie rusel i poim rek Severnoi Evrazii* [Geography and geoecological state of riverbeds and floodplains of rivers in Northern Eurasia]. Moscow, Krona Publ., 2009, 684 p. (in Russian)

Florensov N.A. *Mezozoiskie i kainozoiskie vpadiny Pribaikal'ya* [Mesozoic and Cenozoic depressions of the Baikal region]. Moscow, St. Petersburg, AS USSR Publ., 1960, 259 p. (in Russian)

Shchetnikov A.A., Ufimtsev G.F. *Struktura rel'efa i noveishaya tektonika Tunkinskogo rifta* [Relief structure and recent tectonics of the Tunka rift]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2004, 160 p. (in Russian)

Church M., Ferguson R. I. Morphodynamics: Rivers beyond steady state. *Water Resources Research*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 1883-1897. <https://doi.org/10.1002/2014WR016862>

Lindsay J.B. A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms. *Water Resources Research*, 2003, vol. 39, pp. 1332-1338.

Lisenby P.E., Fryirs K.A. Catchment- and reach-scale controls on the distribution and expectation of geomorphic channel adjustment. *Water Resources Research*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 3408-3427. <https://doi.org/10.1002/2015WR017747>

Mahala A. The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings. *Appl Water Sci.*, 2020, vol. 10, pp. 10-33. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>

Mishra A., Dubey D. P., Tiwari R. N. Morphometric analysis of Tons basin, Rewa District, Madhya Pradesh, based on watershed approach. *Earth Science India*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 171-180.

Wakode H.B., Dutta D., Desai V.R., Baier K. Morphometric analysis of the upper catchment of Kosi River using GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 2011, vol. 6, no. 2, pp. 395-408.

Nabi M., Giri S., Iwasaki T., Kimura I., Shimizu S. Multi-scale modeling of river morphodynamics. *Conference: River Flow*, 2014, pp. 75-83. <https://doi.org/10.1201/b17133-167>

Patton P.C., Baker V.R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 1976, vol. 12, no. 5, pp. 941-952.

Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena*, 2002, vol. 46, no. 2-3, pp. 159-176.

Ryan C., Boyd M. CatchmentSIM: a new GIS tool for topographic geo-computation and hydrologic modelling. *Proc. 28th Int. Hydrol. Water Resour. Symp., Wollongong*, 10-14 Nov. 2003. Barton, Institution of Engineers Australia, 2003. vol. 1, pp. 35-42.

Singh P., Thakur J.K., Umesh U.C. Morphometric analysis of Morar River Basin, Madhya Pradesh, India, using remote sensing and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 2013, vol. 68, no.7, pp. 1967-1977. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1884-8>

Безгодова Ольга Витальевна

аспирант

Институт географии им. В. Б. Сочавы

СО РАН

Россия, 664033, г. Иркутск,

ул. Улан-Баторская, 1

e-mail: ola.bezgodova.23@yandex.ru

Bezgodova Olga Vital'evna

Postgraduate

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS

1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,

Russian Federation

e-mail: ola.bezgodova.23@yandex.ru

Код научной специальности: 25.00.25

Статья поступила в редакцию 25.02.2021, принята к публикации 13.07.2021