

## Физико-географические исследования

УДК 551.4(045)

*О.В. Безгодова*

### ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ БАССЕЙНОВ МАЛЫХ РЕК КОТЛОВИН БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Рассмотрено применение морфометрического анализа для изучения особенностей формирования и развития малых речных бассейнов западной ветви котловин Байкальской рифтовой зоны (на примере бассейна р. Ихе-Ухгунь). На основе переработанной и гидрологически корректной цифровой модели рельефа ALOS DSM получены различные морфометрические карты территории бассейна, создана крупномасштабная карта «геоморфонов» бассейна р. Ихе-Ухгунь. Собраны статистические данные морфометрических и гидрологических показателей, выявлены закономерности их распределения по площади бассейна, что в результате позволило сделать выводы о факторах и закономерностях развития речной сети и определить набор представленных на территории бассейна р. Ихе-Ухгунь экзогенных процессов рельефообразования. Основные факторы развития малых речных бассейнов: высокие базовые уровни, сложная тектоническая структура территории, крутые склоны и южная экспозиция склонов и др. Выявлено, что геометрия рельефа бассейна определяет направление и объем поверхностного стока, а также интенсивность экзогенных геоморфологических процессов.

*Ключевые слова:* бассейны малых рек, геоинформационное картографирование, геоморфоны, данные дистанционного зондирования, морфометрический анализ, Хойтогольская котловина, цифровая модель рельефа.

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-3-290-300

Природная среда, частью которой являются малые реки, всё больше трансформируется под воздействием хозяйственной деятельности человека (орошение, осушение, вырубки леса, распашка, выпас скота и т.д.). Малые реки наиболее чувствительны к изменениям компонентов природной среды: процесс их загрязнения протекает быстрее, а скорость самоочищения недостаточна для восстановления естественного состояния. Таким образом, экологическое состояние малых рек является общим индикатором природных и антропогенных процессов на водосборах. Со стороны природных процессов содержательная сторона процедуры морфометрического анализа заключается в изучении многообразных географических явлений, зависящих от высотной поясности, включая факторы рельефообразования и непосредственно сам рельеф.

Наблюдения и исследования малых рек в горах Южной Сибири довольно редки [1-3]. Поэтому актуальным вопросом для сохранения экологического баланса природных территорий и для ведения хозяйственной деятельности является цифровое моделирование рельефа морфометрии бассейна малых рек с элементами гидрологического анализа, который позволяет провести исследование перераспределения загрязняющих веществ, мониторинг и интегрированное управление водными ресурсами и т.д.

Весь геоморфометрический и структурный морфометрический анализ основан на исследовании бассейнов первых порядков [4; 5]. Данной работой автор хочет показать целесообразность применяемой методики в рамках изучения малых рек с дальнейшей экстраполяцией на соседние бассейновые структуры рассматриваемой территории (бассейн р. Иркут). Морфометрический анализ является хорошей основой для дальнейшего подробного физико-географического исследования территории, особенно в районах с существенными высотными амплитудами земной поверхности. Морфометрическое моделирование процессов в водосборах с помощью анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) широко применяется российскими и зарубежными исследователями [6-10].

В настоящей работе поставлена цель проведения морфометрического анализа бассейна малой реки на основе комплексной обработки ЦМР, что создает предпосылки для дальнейшего многостороннего географического анализа бассейновой системы. Автором решались следующие задачи:

- 1) подготовка гидрологически корректной цифровой модели рельефа по спутниковым данным ALOS Digital Surface Model (DSM);
- 2) проведение разносторонней оценки земной поверхности, в том числе в целях геоморфологического и гидрологического анализа;
- 3) автоматизированный расчет и картографирование стандартных морфометрических показателей по данным ЦМР.

Бассейн р. Ихе-Ухгунь (левый приток р. Иркут), выступающий в качестве объекта исследования, характеризуется низкой картографической изученностью геоморфологических и гидрологических параметров. На данную территорию отсутствует ряд морфометрических и комплексных карт, например, элементов рельефа, уклонов, экспозиции и т.д. Интерес к исследованию данной территории повышается в связи с особенностями геоморфологического, морфологического строения и амплитуды высот речного бассейна для котловин Байкальской рифтовой зоны.

**Объект и методы исследований**

Бассейн р. Ихе-Ухгунь занимает южный макросклон хр. Тункинские Гольцы и всю площадь Хойтогольской впадины. С юга и востока бассейн ограничен Ниловской перемычкой (рис. 1). Площадь бассейна – 836 км<sup>2</sup>. Главной рекой бассейна является Ихе-Ухгунь, протяженностью 76 км, падение реки 1207,2 м. Средняя и наибольшая ширина бассейна – 15,5 и 23 км. Река характеризуется асимметричностью долины – правые притоки практически отсутствуют, что связано с преобладанием на площадках водосборов, осложняющих положительных форм рельефа, откуда возникают локальные различия в геолого-геоморфологических и климатических условиях. Основные притоки р. Ихе-Ухгунь слева – Ихе-Булнай, Улан-Гол, Убурт-Хонголкой, Хаюрта, Хубыты, Малый и Большой Хонголкой. Все они по своим характеристикам относятся к категории малых рек (длина до 100 км, площадь бассейна до 2000 км<sup>2</sup> [11]). Питание рек бассейна дождевое и снеговое. Летние (июль-август) дождевые паводки превышают весеннее половодье. Ихе-Ухгунь с притоками замерзает в октябре – начале ноября, ледоход приходится на конец апреля – начало мая.

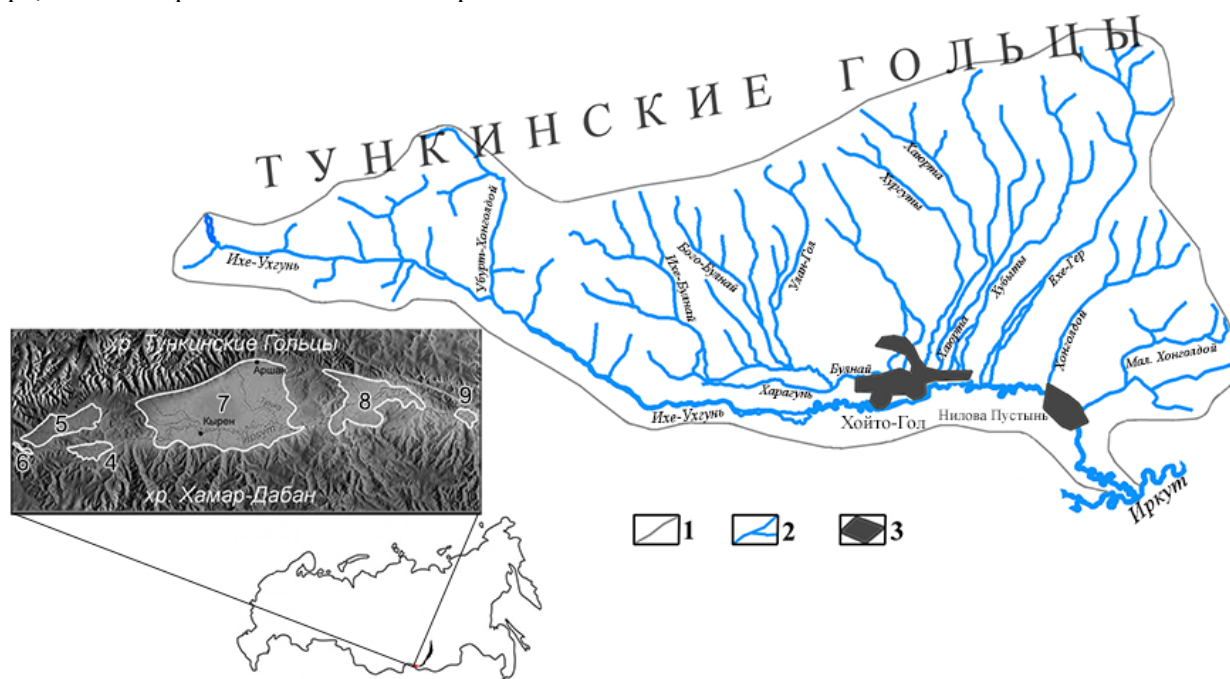


Рис. 1. Схема бассейна р. Ихе-Ухгунь:

1 – граница бассейна, 2 – реки, 3 – населённые пункты; Котловины Тункинской системы: 4 – Туранская, 5 – Хойтогольская, 6 – Мондинская, 7 – Тункинская, 8 – Торская, 9 – Быстринская

По геолого-геоморфологическим условиям изучаемый бассейн можно разделить на три части: саянский комплекс верхнепротерозойских интрузий в северной части в пределах Тункинских Гольцов, комплекс четвертичной системы среднеплейстоценовый-голоценовый в центральной части Хойтогольской котловины, комплекс неогеновых вулканогенных образований на юге и востоке бассейна в пределах Ниловской перемычки. Речные долины бассейна часто приурочены к тектоническим разломам, а центральная часть исследуемой территории представляет собой опущенный участок фундамента, заполненный рыхлыми четвертичными отложениями. Границы тектонических блоков в Тункинских Гольцах отражаются на форме продольных профилей рек, обуславливая их перегибы на фоне общей вогнутости, то есть гидрографическая сеть подчинена особенностям тектоники территории.

Общая лесистость бассейна Ихе-Ухгунь составляет 53,7 %. Наиболее залесена долина в верховьях р. Ихе-Ухгунь на склонах Гольцов до 1800 м, а также предгорная наклонная равнина и склоны Ниловской перемычки. В остальной части территории леса сведены под сельскохозяйственные земли (пашни, сенокосы), вырубки, многие земли заброшены. На реке Ихе-Ухгунь расположены населённые пункты: улус Хойто-Гол и посёлок Ниловка с курортом Нилова Пустынь. Бассейн является местом притяжения для туристов, направляющихся на Шумацкие минеральные источники.

При исследовании применялись следующие методы: математический, описательный, полевой, картографический, геоморфологический, методы дистанционного зондирования и геоинформационного картографирования. Анализ данных проводился с использованием работ по русловедению Р.С. Чалова [12], А.В. Чернова [13]. Исследования физико-географических компонентов территории Хойтогорьской котловины практически не проводились, за исключением общих работ по тектонике и сейсмичности Тункинского рифта [14; 15].

*Используемые спутниковые данные.* Для построения производных ЦМР автором использовались данные японской спутниковой системы ALOS Global Digital Surface Model (DSM), ALOS World 3D-30m (AW3D30). С мая 2016 г. в свободном доступе распространяются данные AW3D30 с горизонтальным разрешением сетки приблизительно 30 метров (1 угловая секунда) фрагментами размером 1 x 1 градус. Снимки представляют собой 32-битную регулярную сетку, где атрибут ячейки соответствует высоте над уровнем моря в данной точке. Атрибут ячейки также может принимать значение – 32767, что соответствует значению «no data». Данные отнесены к мировой геодезической системе 1984 г. – WGS-84. В качестве источников высотных данных помимо ALOS DSM рассматривались ЦМР The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) с разрешением 90 м и Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER GDEM, 30 м) (табл. 1). Сравнив общие параметры вышеперечисленных ЦМР, автором выбрана ALOS DSM.

Таблица 1

### Сравнение основных параметров ЦМР

ЦМР	Размер фрагмента	Расстояние между ячейками	Вертикальная точность (StDev)*	Горизонтальная точность (StDev)*
ALOS DSM	1°×1°	1 угловая секунда (прибл. 30 м)	5 м	5 м
SRTM	1°×1°	3 угловых секунд (прибл. 90 м)	9 м	9 м
ASTERGDEM	1°×1°	1 угловая секунда (прибл. 30 м)	13 м	13 м

*Примечание.* StDev – стандартное отклонение.

Данная ЦМР является цифровой моделью поверхности, включающей поверхность лесного покрова, зданий и сооружений, что сказывается на точности модели и ее производных. Оценка точности различных цифровых моделей поверхности показала [16], что ALOS DSM имеет хорошую точность для различных типов земного покрова по сравнению с другими свободно доступными ЦМР; точность снижается только в лесах и над высотными зданиями. Тем не менее использование ALOS DSM в целях проведения морфометрического анализа является целесообразным.

Подготовка ЦМР и получение её производных выполнялось в программе SAGA GIS (версия 7.8.1), оформление и анализ данных в программе ArcGIS 10 (ESRI Inc.). В SAGA GIS использовались пакеты модулей «Terrain Analysis», в частности Terrain Classification, Morphometry (Curvature, Slope, Aspect и т.д.) и Channels (Channel Network, Valley Depth и т.д.). Дополнительно перед проведением морфометрического анализа ставилась задача перевода ЦМР в проекционную систему координат UTM, чтобы расчёт происходил на плоскости, а не на поверхности сферы (что более ресурсозатратно). В SAGA GIS с помощью модуля Coordinate Transformation (Grid) ЦМР задана проекционная система координат UTM для зоны 48N. Для снижения времени обработки ЦМР и отсечения «лишних» данных в программе SAGA GIS проводилась обрезка растра по границам бассейна р. Ихе-Ухгунь (модуль «Clip grid with polygon»).

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 [17]. В SAGA GIS данный метод представлен в виде модуля Fill Sinks (Planchon/Darboux, 2002). После перечисленных выше процедур цифровая модель рельефа (рис. 2) готова к проведению морфометрического анализа.

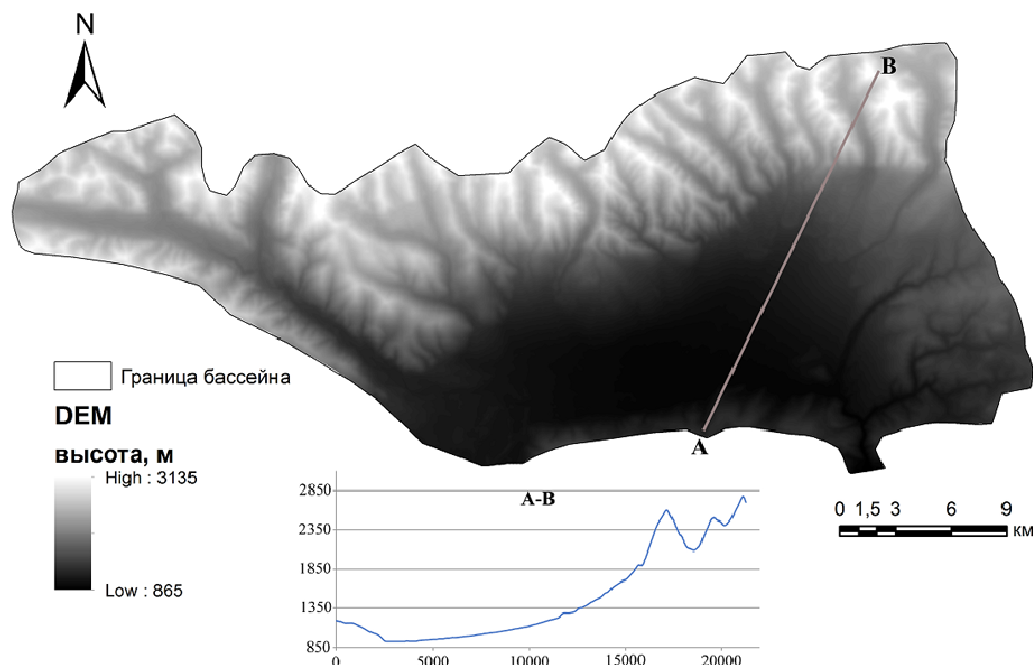


Рис.2. Цифровая модель рельефа (DEM) бассейна р. Ихе-Ухгунь

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

### Результаты и их обсуждение

При анализе рельефа бассейна р. Ихе-Ухгунь большое внимание уделено морфометрическим показателям, с помощью которых возможно построение базовых карт исследуемой территории:

1) плановой и профильной кривизны, 2) показателей топографического индекса влажности и индекса потенциала плоскостной эрозии, 3) «геоморфонов», 4) крутизны и экспозиции земной поверхности и т. д. Несмотря на то, что бассейны малых рек имеют небольшую площадь, наличие контрастных физико-географических условий на территории бассейна позволяет рассмотреть его как ключевой участок с дальнейшим применением методики на аналогичные бассейновые структуры. Для полноценного анализа основных элементов структуры водосборного бассейна р. Ихе-Ухгунь определены основные морфометрические и гидрологические показатели, а также их закономерности распределения по площади бассейна (Convexity, aspect, slope, LS-Factor, Topographic Wetness Index, Channel Network Base Level и т.д.).

Абсолютные высоты бассейна по данным ЦМР варьируют от 865 до 3135 м, средняя высота – 1750 м, стандартное отклонение – 609 м. Анализ распределения высот (рис. 3) по площади исследуемого участка показал, что высоты 865–1100 м занимают 22 % площади бассейна Ихе-Ухгунь, тогда как наименьшие площади у диапазона высот 2800–3135 (2,36 %). Базовые уровни малых водотоков речной сети распределены по уровням 865–1100 (19,2 %), 1100–1200 (14,5 %), 1200–1400 (8,9 %), 1400–1600 (9,2 %), 1600–1800 (7,2 %), 1800–2000 (6,3 %), 2000–2150 (8,8 %), 2150–2300 (11,9 %), 2300–2500 (13,2 %), 2500–2650 (0,8 %). Базовые уровни речной сети бассейна Ихе-Ухгунь больше всего тяготеют к абсолютным высотам 865–1100 м, к которым приурочено днище котловины и предгорная наклонная равнина.

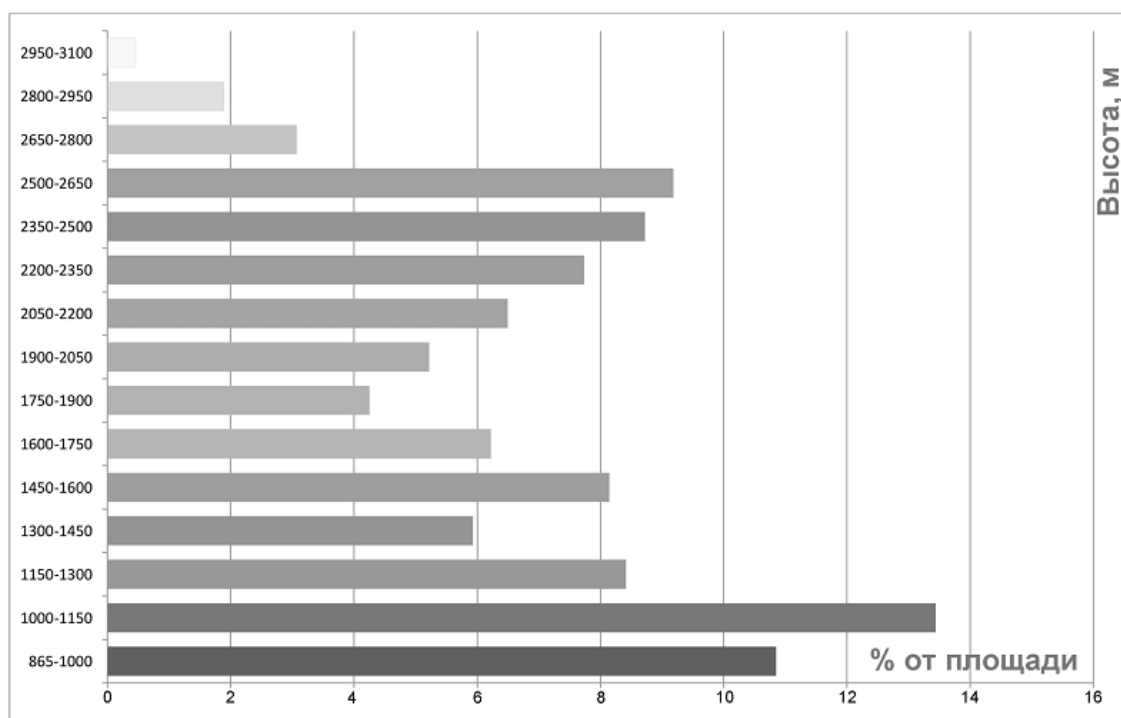


Рис. 3. Распределение высот по площади исследуемого участка

В пределах бассейна Ихе-Ухгунь наибольшую площадь занимают склоны с крутизной 0–5° (19,4 %) и 5–9° (15,9 %), что по классификации склонов О.К. Леонтьева и Г.И. Рычагова [18] соответствует категориям от очень пологих до средней крутизны. Среднее значение по бассейну – 17,3° (табл. 2). Тем не менее 1/10 изучаемой территории занимают очень крутые склоны (>35°), которые приурочены к Тункинским Гольцам, что предполагает широкое распространение гравитационных процессов (осыпи, обвалы, лавины и т. д.), а также благоприятные условия для перераспределения стока временных и постоянных водотоков.

Таблица 2

## Статистические параметры бассейна р. Ихе-Ухгунь

Характеристика	Max.	Min.	Mean	StDev
Абсолютная высота (Elevation), м	3135	865	1708,2	596,9
Крутизна (Slope), град.	62	0	17,3	12,8
Экспозиция склонов (Aspect), град.	360	0	171,1	83,5
Плановая кривизна (Plan curvature), коэф., у.е.	0,012	-0,009	0,0001	0,0014
Профильная кривизна (Profile curvature), коэф., у.е.	0,012	-0,011	-0,0001	0,0014
Индекс топографической влажности (TWI), коэф., у.е.	23,3	3,5	7,92	2,85
LS-фактор (LSF), коэф., у.е.	34,74	0,00006	6,59	5,26
Базовые уровни речной сети (Channel network base level), м	2699,9	865	1606,1	513,2

*Примечание.* Max, Min, Mean – соответственно наибольшее, наименьшее и среднее значение, StDev – стандартное отклонение.

Что касается анализа площадного распространения экспозиций склонов, то большая часть склонов обращена на юг (15,3 %), запад-юго-запад (11 %) и юго-восток (10,7 %), что соответствует общему уровню наклона земной поверхности в области сброса Гольцов в сторону опущенного блока фундамента (днище котловины). Преобладание склонов южной экспозиции означает большее поступление солнечной радиации на поверхность, более интенсивное таяние снега, испарение влаги, остепнение ландшафтов и усиление интенсивности гравитационных, эрозионных и флювиальных процессов.

С помощью расчёта коэффициентов плановой и профильной кривизны (plan curvature, profile curvature) определены основные участки с выпуклой и вогнутой поверхностью, что облегчает анализ перераспределения вещества по поверхности рельефа. Для каждой ячейки раstra присваивалось значение в промежутке от -0,011 до 0,012, где отрицательное значение для плановой кривизны указывает на вогнутую поверхность, значение 0 – на плоскую поверхность, положительное значение – поверхность выпуклая. Значения для характеристики профильной кривизны имеют аналогичный вид, так как в SAGA GIS в основе расчёта лежит алгоритм Zevenbergen-Thorne [19], где предусматривается умножение значения ячейки на -2. После этого выпуклые участки будут характеризоваться положительными значениями, а вогнутые – отрицательными, нулевые значения будут отвечать плоским в профиле поверхностям. Для профильной и плановой кривизны единицами измерения являются 1/м, которые для удобства интерпретации умножаются на 100, то есть вертикальная кривизна характеризует изменение уклона поверхности на 100 м вдоль его основного направления.

Несмотря на то, что средние значения кривизны по результатам расчётов (табл. 2) оказались близкими к нулю (из-за значительной площади днища котловины), характер земной поверхности бассейна р. Ихе-Ухгунь в целом имеет вогнутый профиль, что положительно сказывается на развитии эрозионной сети бассейна. Зоны конвергенции потока (вогнутые участки аккумуляции вещества) приурочены к обширным площадям в центре Хойтогольской котловины, а также к днищам долин постоянных водотоков; зоны дивергенции (выпуклые участки рассеивания вещества) – склоны Гольцов и Ниловской перемычки. Высокие базовые уровни, выпуклый профиль рельефа, наличие крутых склонов в совокупности с климатическими особенностями территории способствуют развитию сети постоянных и временных водотоков, а также увеличивают количество рыхлого материала, выносимого с горных территорий в днище котловины.

Показатель TWI – является отношением логарифма дренажной площади бассейна к тангенсу крутизны склона. Полученные значения отображают потенциальную влажность водосбора, где высокие показатели индекса соответствуют аккумуляции влаги в грунтах и почве, что влияет на развитие ландшафтов, рельефа и микроклимата в целом. Для территории бассейна Ихе-Ухгунь средний показатель индекса топографической влажности равен 7,92 (табл. 2), что относится к категории высоких значений. В целом распределение показателя TWI по площади занимаемого участка: низкий (до 4,6) – 16,4 %, средний (4,8–7,6) – 45,8 %, высокий (более 7,6) – 37,6 %. Наиболее увлажнённые участки приурочены к понижению в днище Хойтогольской котловины, к руслам временных и постоянных водотоков, а также к шлейфу ледниковых отложений в пределах предгорной наклонной равнины. В местах распространения положительных форм рельефа показатель TWI имеет низкие значения, здесь участки характеризуются низкой влажностью почв и грунтов, а также большой глубиной залегания грунтовых вод (склоны Тункинских Гольцов, вершинные поверхности, Ниловская перемычка, островные возвышения в пределах днища котловины). Высокие показатели TWI указывают на хорошо развитую эрозионную сеть, а также отмечают участки с развитием временных водотоков, где развиваются флювиальные и эрозионно-склоновые процессы.

LS-фактор – относительный показатель эрозии, учитывающий уклон поверхности и площадь водосборного бассейна. Показатель считается индикатором способности водного потока вызывать эрозию, что немаловажно для сельскохозяйственных участков близ сёл Хойто-Гол и Нилова Пустынь, для оценки эрозионной сети бассейна, землепользования, охраны водных объектов и земель. Для исследуемого участка средний показатель LS-фактора равен 6,59 (высокая категория [20]). Более 75,3 % территории бассейна относится к высоким показателям LS-фактора (более 1,5), где максимумы приурочены к наиболее крутым склонам Тункинских Гольцов. Низкие показатели эрозионного потенциала рельефа выявлены в днище котловины, в долинах постоянных водотоков и на склонах Ниловской перемычки, что связано с небольшими уклонами земной поверхности и залесённостью. Высокие показатели LS-фактора указывают на источники сноса рыхлого материала в пониженные участки котловины. На высоких морфологических уровнях данные участки являются источником селевого материала по бортам долин постоянных водотоков. На незадернованных склонах и в пределах сельскохозяйственных участков (на пашне и вырубках) развивается линейная и плоскостная эрозия.

Наглядным примером классификации рельефа земной поверхности по данным ЦМР является новейшая методика «геоморфонов», разработанная Д. Ясиевицем и Т. Степински [21]. Метод состоит в распознавании элементарных форм, которые идентифицируются целостно по характеру локального рельефа в выделы, называемые «геоморфонами» (геоморфологические фонотипы). На основе ЦМР для территории бассейна р. Ихе-Ухгунь построена карта геоморфонов (рис. 4), которая упростила описа-

ние геоморфологических особенностей изучаемого участка благодаря простоте построения. Выделено 10 классов «геоморфонов» (табл. 3): вершина (peak), хребет (ridge), уступ (shoulder), отрог (spur), склон (slope), ложбина (hollow), подножие (footslope), долина (valley), впадина (depression). Наибольшую площадь занимают геоморфоны: склон (35,9 %), ложбина (22,4 %), долина (15,8 %) и отрог (12,4 %). Наименьшую – хребет (6,8 %), впадина (5,1 %), вершина (0,8 %), подножие (0,7 %) и уступ (0,1 %).

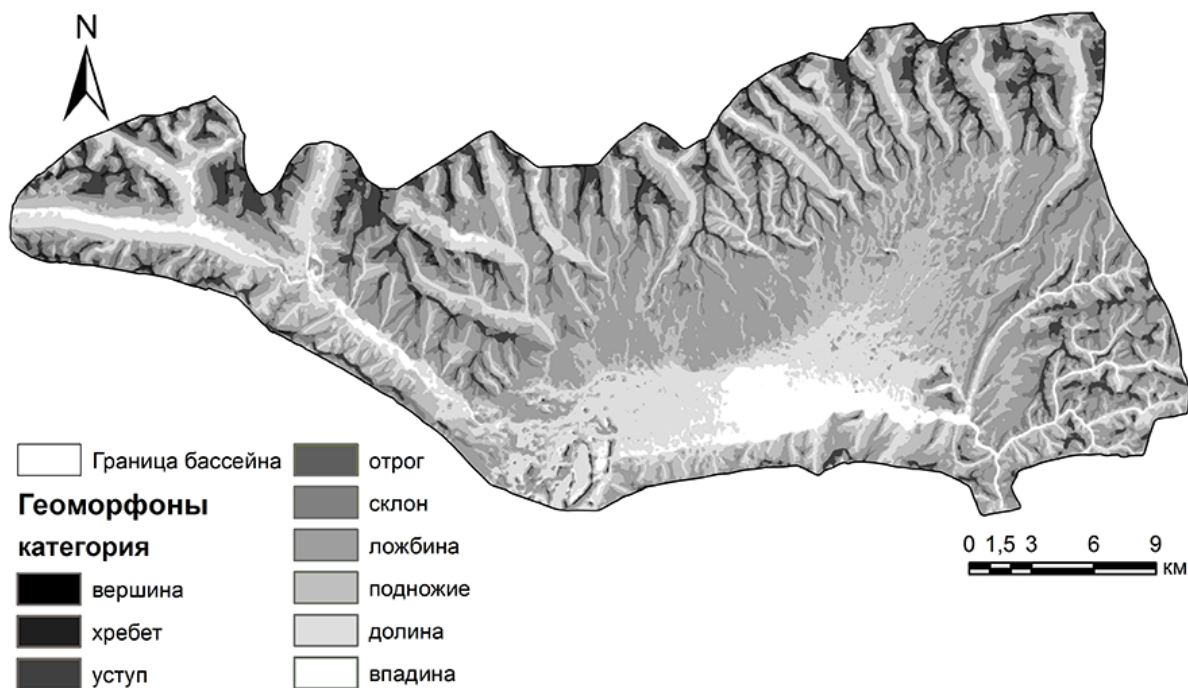


Рис. 4. Геоморфоны бассейна р. Ихе-Ухгунь

Из такого распределения поверхностей можно сделать вывод о том, что наибольшая доля среди экзогенных процессов рельефообразования на территории бассейна р. Ихе-Ухгунь принадлежит гравитационно-склоновым, флювиальным, криогенно-склоновым, криогенным и эрозионно-склоновым процессам. Природные комплексы подвергаются нарушению со стороны селевых процессов на склонах Гольцов, заболачивания в пониженных участках днища котловины, речной эрозии и дефлюкции на крутых склонах. Антропогенные комплексы нарушаются со стороны процессов заболачивания в центральной части котловины (для решения этой проблемы притоки р. Ихе-Ухгунь (реки Улан-Гол, Ихе-Булнай) были спрямлены, в долинах дополнительно построены мелиоративные осушительные каналы).

Итак, анализ вышеперечисленных характеристик позволил выявить основные факторы развития эрозионной (речной) сети, где особо важная роль среди морфометрических показателей принадлежит высоте, крутизне и экспозиции склонов (влияние на перераспределение атмосферных осадков и их превращение в речной сток). Геометрия рельефа бассейна определяет направление и объем поверхностного стока. Значительную часть бассейна р. Ихе-Ухгунь занимают водораздельные пространства, где происходит накопление снежного покрова на склонах Гольцов и затенённых участках Ниловской перемычки. Весной этот покров тает позже по сравнению с пониженной частью в центре котловины, где снеговой покров чаще выдувается ветром или испаряется. Большое количество атмосферных осадков в горной части бассейна способствует их накоплению в элементарных водотоках и просачиванию их в подземные горизонты при выходе на шлейф ледниковых отложений, что препятствует быстрому стеканию осадков после выпадения, увеличивает водосборную площадь водотоков 1-го порядка. 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 второго-третьего порядков вследствие появления стока в системе временных водотоков. Здесь прослеживается главная особенность эрозионной сети, а именно её способность к самоорганизации, где морфометрические показатели являются важной основой функционирования речной системы (связь с динамикой стока и особенностями речной сети) [22].

Таблица 3

**Соотношение выделенных «геоморфонов» и типов рельефа бассейна р. Ихе-Ухгунь**

Геоморфон	Форма рельефа или тип рельефа, соответствующий этому геоморфону	Экзогенный геоморфологический процесс	Процент от общей площади участка
<b>Высокогорный пояс</b>			
Вершина (peak)	Остроконечные вершины, выработанные ледниково-экзарационными процессами	Гравитационно-склоновый, криогенный (криогенное выветривание), ледниково-экзарационный	0,8
Хребет (ridge)	Узкие сглаженные водоразделы между эрозионными долинами. Участки плоских поверхностей базальтового плато	Гравитационно-склоновый, криогенно-склоновый, криогенный (криогенное выветривание)	6,8
<b>Среднегорный пояс</b>			
Уступ (shoulder)	Резкие крутосклонные части вершин и эрозионных долин	Криогенно-склоновый	0,1
отрог (spur)	Небольшие и узкие эрозионные останцы между эрозионными долинами	Криогенно-склоновый	12,4
<b>Низкогорный пояс</b>			
Подножие (footslope)	Слабонаклонные участки предгорной наклонной равнины	Эрозионно-склоновый, криогенный	0,7
<b>Днище котловины</b>			
Ложбина (hollow)	Слабонаклонные поверхности преимущественного транзита вещества	Эрозионно-склоновый, криогенный	22,5
Впадина (depression)	Пониженные поверхности преимущественной аккумуляции вещества	Биогенный (заболачивание), криогенный	5,1
<b>Сквозные системы</b>			
Долина (valley)	Долины постоянных и временных водотоков	Флювиальный (речная эрозия, селевые процессы)	15,8
Склон (slope)	Склоны от очень крутых до пологих (осыпные, обвальные, дефлюкционные, делювиальные)	Эрозионно-склоновый, гравитационно-склоновый, криогенно-склоновый	35,9

**Заключение**

Впервые для бассейна малой реки р. Ихе-Ухгунь, отличающегося яркими физико-географическими особенностями и уникальностью в геоморфологическом плане, на базе ГИС (SAGA GIS, ArcGIS) с использованием автоматизированных процедур выполнены морфометрический анализ и расчёты по гидрологически корректной ЦМР (ALOS DSM), составлена карта геоморфонов. Расчёт статистических параметров позволил выявить основные закономерности развития рельефа, установить набор развитых экзогенных процессов рельефообразования. В результате рассмотренный малый бассейн по степени и интенсивности преобразования природных и антропогенных компонентов не уступает бассейнам средних и крупных рек Байкальской рифтовой зоны, что повышает его региональную значимость в формировании морфометрических особенностей территории котловин. Заложённая геоморфологическая основа для оценки рельефа в морфометрических показателях с помощью цифрового моделирования в дальнейшем позволяет расширить комплексные исследования (гидрологические, геоморфологические, тектонические и т.д.) бассейна до регионального уровня.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

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



2. 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.
3. Опекунова М.Ю., Бардаш А.В. Применение геоморфометрического анализа для малых речных бассейнов Селенгинского среднегорья (на примере бассейна р. Тарбагатайки) // Геодезия и картография. 2019. Т. 80, № 6. С. 30-38. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-948-6-30-38.
4. Бондарев В.П. Бассейновый анализ водосборов первых порядков // Эколого-географические исследования в речных бассейнах. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. пед. ун-та, 2001. С. 9–12.
5. Матвеев Н. П. Малые реки // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер. Естественные науки. 2008. № 2. С. 18–31.
6. Иванов М.А., Ермолаев О.П. 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.
7. Опекунова М.Ю., Бардаш А.В. Геоморфометрический анализ рельефа бассейна реки Ия // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всерос. конф. с межд. участием. М.: Изд-во Географ. фак-та МГУ, 2020. С. 514–520.
8. Погорелов А.В., Думит Ж.А., Куркина Е.В. О расчете некоторых морфометрических показателей земной поверхности в бассейне р. Кубани по данным спутниковых снимков // Вестн. Северо-Кавказского гос. техн. ун-та. 2008. №4 (17). С. 10–16.
9. Lindsay J.V. A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms // Water Resources Research. 2003. Vol. 39. P. 1332–1338.
10. Nabi M., Giri S., Iwasaki T., Kimura I., Shimizu S. Multi-scale modelling of river morphodynamics // *River Flow*. 2014. P. 75–83. DOI: 10.1201/b17133-167.
11. Ротмистров В.Л. Малые реки Ярославского Поволжья. Ярославль: Издание ВВО РЭА, 2004. С. 8–9.
12. Чалов Р.С. Руслведение: теория, география, практика. Т.1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 610 с.
13. Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. М.: Крона, 2009. 684 с.
14. Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 259 с.
15. Щетников А.А., Уфимцев Г.Ф. Структура рельефа и новейшая тектоника Тункинского рифта. М.: Научный мир, 2004. 160 с.
16. Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy assessment of different digital surface models // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2018. 7 (3). P. 114. DOI: 10.3390/ijgi7030114.
17. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // *Catena*. 2002. 46(2-3). P. 159–176.
18. Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М.: Высш. шк., 1979. 287 с.
19. Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative analysis of land surface topography // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1987. 12(1). P. 47–56.
20. Cushman S.A., McGarigal K., Neel M. C. Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency // *Ecological Indicators*. 2008. Vol. 8. P. 691–703.
21. Jasiewicz J., Stepinski T. F. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms // *Geomorphology*. 2013. № 182. P. 147–156.
22. Хомяков П.М., Иванов В.Д., Искандерян Р.А., Конищев В.Н., Кривобок И.Г., Пегов С.А., Смолин В.С., Смолина С.Г., Терентьев Г.Ю. Геоэкологическое моделирование для целей управления природопользованием в условиях изменения природной среды и климата / под ред. П.М. Хомякова. М., 2002. 400 с.

Поступила в редакцию 13.09.2021

Безгодова Ольга Витальевна, аспирант 2 года 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**

**APPLICATION OF MORPHOMETRIC ANALYSIS FOR SMALL RIVER BASINS OF THE BAIKAL RIFT ZONE BASINS**

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-3-290-300

The article discusses the use of morphometric analysis to study the features of formation and development of small river basins in the western branch of the Baikal rift zone basins (by example of the Ihe-Uhgun river basin). The author has prepared a hydrologically correct digital elevation model based on satellite data ALOS Digital Surface Model (DSM). A comprehensive assessment of the earth's surface was carried out, including for the purposes of geomorphological and hydrological analysis, as well as an automated calculation and mapping of standard morphometric indicators based on DEM data. The work is based on general physiographic research methods, the method of morphometric analysis of the relief using GIS, the method of geoinformation mapping. Statistical data of morphometric and hydrological indicators were collected using SAGA GIS, patterns of their distribution over the basin area were revealed, which, as a result, made it possible to draw conclusions about the factors and patterns of the river network development and determine the set of presented exogenous processes of relief formation in the Ihe-Uhgun river basin territory. The main factors in the small river basins development are: high base levels, complex tectonic structure of the territory, steep slopes and southern orientation of the slope exposure, etc. It was revealed that the geometry of the basin relief determines the direction and volume of surface runoff, as well as the intensity of exogenous geomorphological processes.

**Keywords:** digital elevation model, geomorphons, GIS-based mapping, morphometric analysis, remote sensing data, small rivers basins, Khoiyotogol depression.

REFERENCES

1. Bezgodova O.V. [Natural and anthropogenic factors of small riverbeds formation of the Tunka depression (Republic of Buryatia)], in *Geosfernye issledovaniya [Geosphere research]*, 2019, no. 4, pp. 6–14. DOI: 10.17223/25421379/13/1 (in Russ.).
2. Zaharov V.V., Kichigina N.V. *Rol' rechnogo stoka v formirovaniy ruslovykh protsessov vysokogornoy 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, Kitoy, Oka rivers)], in *Rel'ef i ekzogennye protsessy gor*, Irkutsk: IG SB RAS Publ., 2011, vol. 2, pp. 76–79. (in Russ.).
3. Opekunova M.Yu., Bardash A.V. [Application of geomorphometric analysis for small river basins in the Selenga middle mountains (on the example of Tarbagatayka river basin)], in *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]*, 2019, vol. 80, no. 6, pp. 30–38. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-948-6-30-38. (in Russ.).
4. Bondarev V.P. *Basseynovyy analiz vodosborov pervykh por'yadkov* [Basin analysis of first-order watersheds], in *Ekologo-geograficheskie issledovaniya v rechnykh basseynakh*, Voronezh: Voronezh. Gos. Pedagogich. Univ., 2001, pp. 9–12 (in Russ.).
5. Matveev N.P. *Malye reki* [Small rivers], in *Vestn. Mosk. Gos. oblastnogo. Univ. Ser. Estestvennye nauki*, 2008, no. 2, pp. 18–31 (in Russ.).
6. Ivanov M.A., Yermolaev O.P. [Geomorphometric analysis of river basins of the Volga Federal District using SRTM and ASTER GDEM data], in *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 2, pp. 98–109 (in Russ.).
7. Opekunova M.Yu., Bardash A.V. *Geomorfometricheskyy analiz rel'efa basseyna reki Iya* [Geomorphometric analysis of the relief of the Iya river basin], in *Mater. Vseross. konf. s mezhd. uch. "VIII Shchukinskie chteniya: relief and nature"*, Moscow: Geograf. fak-t MGU, 2020, pp. 514–520 (in Russ.).
8. Pogorelov A.V., Dumit Zh.A., Kurkina E.V. O raschete nekotorykh morfometricheskikh pokazateley zemnoy poverkhnosti v basseyne r. Kubani po dannym sputnikovykh snimkov [On the calculation of some morphometric indicators of the earth's surface in the basin of the river. Kuban according to satellite images], in *Vestn. Severo-Kavkaz. Gos. Tekhn. Univ.*, 2008, no. 4 (17), pp. 10–16 (in Russ.).
9. Lindsay J. B. A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms, in *Water Resources Research*, 2003, vol. 39, pp. 1332–1338.
10. Nabi M., Giri S., Iwasaki T., Kimura I., Shimizu S. Multi-scale modelling of river morphodynamics, in *River Flow*, 2014, pp. 75–83. DOI: 10.1201/b17133-167.
11. Rotmistrov V.L. *Malye reki Yaroslavskogo Povolzh'ya* [Small rivers of the Yaroslavl Volga region], Yaroslavl: VVO REA Publ., 2004, pp. 8–9 (in Russ.).
12. Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T.1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Ruslovedenie: theory, geography, practice. Vol.1. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions for the formation of river channels], Moscow: LKI Publ., 2008, 610 p. (in Russ.).

13. Chernov A.V. *Geografiya i geoekologicheskoe sostoyanie rusel i poym rek Severnoy Evrazii* [Geography and geocological state of riverbeds and floodplains of rivers in Northern Eurasia], Moscow: Krona Publ., 2009, 684 p. (in Russ.).
14. Florensov N.A. *Mezozoyskie i kaynozoyiskie vpadiny Pribaykal'ya* [Mesozoic and Cenozoic depressions of the Baikal region], Moscow–Leningrad: AS USSR Publ., 1960, 259 p. (in Russ.).
15. Shchetnikov A.A., Ufimtsev G.F. *Struktura rel'efa i noveyshaya tektonika Tunkinskogo rifta* [Relief structure and recent tectonics of the Tunka rift], Moscow: Nauchnyy mir Publ., 2004, 160 p. (in Russ.).
16. Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy assessment of different digital surface models, in *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7 (3), p. 114. DOI: 10.3390/ijgi7030114.
17. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models, in *Catena*, 2002, 46 (2-3), pp. 159–176.
18. Leont'ev O.K., Rychagov G.I. *Obshchaya geomorfologiya* [General geomorphology], Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1979, 287 p. (in Russ.).
19. Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative analysis of land surface topography, in *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, 12(1), pp. 47–56.
20. Cushman S.A., McGarigal K., Neel M. C. Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency, in *Ecological Indicators*, 2008, Vol. 8, pp. 691–703.
21. Jasiewicz J., Stepinski T. F. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms, in *Geomorphology*, 2013, no. 182, pp. 147–156.
22. Khomyakov P.M., Ivanov V.D., Iskanderyan R.A., Konishchev V.N., Krivobok I.G., Pegov S.A., Smolin V.S., Smolina S.G., Terent'ev G.Yu. *Geoekologicheskoe modelirovanie dlya tseley upravleniya prirodopol'zovaniem v usloviyakh izmeneniya prirodnoy sredy i klimata* [Geoecological modeling for the purposes of environmental management in the context of changes in the natural environment and climate], Khomyakov P.M. (ed), Moscow, 2002, 400 p. (in Russ.).

Received 13.09.2021

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