

## РАЗДЕЛ 4.

### ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

УДК 551.435.1 (571.55)

#### МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАССЕЙНОВ МАЛЫХ РЕК ГОРНО-КОТЛОВИННОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА РЕКИ ИРКУТ

*Безгодова О. В.*

*Институт Географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук,  
Иркутск, Российская Федерация  
E-mail: ola.bezgodova.23@yandex.ru*

Морфометрические показатели являются важной основой для анализа функционирования речной системы. Геоинформационные системы (SAGA GIS, ArcGIS) с использованием автоматизированных процедур позволили выполнить морфометрический анализ по гидрологически корректной цифровой модели рельефа ALOS DSM. Выявлено, что с увеличением площади малого речного бассейна происходит увеличение следующих морфометрических характеристик: амплитуды высот между верхним и нижним течением рек, увеличивается порядок реки, глубина эрозионного вреза, показатель топографического индекса влажности, а также доля склоновых процессов в структуре экзогенных процессов. Субширотная ориентация крупных орографических элементов и котловин влияет на распределение показателей LS-фактора (интенсивность эрозионных процессов) и асимметрии: для бассейнов с преобладанием склонов южной экспозиции LS-фактор и асимметричность выше, чем у склонов северной ориентировки.

**Ключевые слова:** асимметричность, Байкальская рифтовая зона, горизонтальное расчленение, малые речные бассейны, морфометрический анализ, Тункинская система котловин.

#### ВВЕДЕНИЕ

Речным бассейном называют часть суши, с которой поверхностные воды поступают в русло реки [1]. Любая эрозионная форма обладает своим бассейном стока поверхностных вод или водосбором. Водосборы различных рек (водотоков) ограничены друг от друга водоразделами. Рельеф является главной составляющей водосборных бассейнов разного порядка, определяя сток воды и наносов. Для характеристики рельефа бассейнов рек необходимо определение морфометрических показателей, которые до развития геоинформационных технологий получали вручную с помощью топографических карт и землемерной съемки. В настоящее время наиболее простым способом получения необходимых характеристик является анализ цифровых моделей рельефа (ЦМР) с помощью ГИС [2, 3, 4].

Исследования малых рек и их бассейнов вызывают большой интерес из-за их недостаточной изученности и высокой чувствительности к внешним изменениям. Современный вид рельефа малых речных бассейнов изучаемой территории сформировался под влиянием как эндогенных, так и экзогенных процессов, а сами бассейны относятся к сложным денудационным формам рельефа флювиального происхождения [1]. Малые реки горно-котловинной части бассейна р. Иркут расположены в пределах Байкальской рифтовой зоны в условиях активного

рифтогенеза. Малые реки быстро реагируют на изменения в динамике протекания природных факторов, а нарушение целостности компонентов малых речных бассейнов может привести к локальной деградации речной системы. Существует вероятность интенсивного преобразования бассейнов, долин и русел малых рек в горно-котловинной части бассейна р. Иркут из-за различных природных факторов (тектонические, геолого-геоморфологические и климатические). Исследования малых речных бассейнов Южной Сибири, особенно в пределах Тункинской системы котловин, редки [5, 6].

В рамках исследования поставлена цель провести морфометрический анализ территории бассейнов малых рек горно-котловинной части бассейна р. Иркут. Выполнены следующие этапы морфометрического анализа: 1) подготовлена гидрологически корректная цифровая модель рельефа по спутниковым данным ALOS DSM; 2) проведен автоматизированный расчёт и картографирование стандартных морфометрических показателей по данным ЦМР; 3) проанализировано распределение полученных показателей и выделены однородные геоморфологические подрайоны на территории исследования.

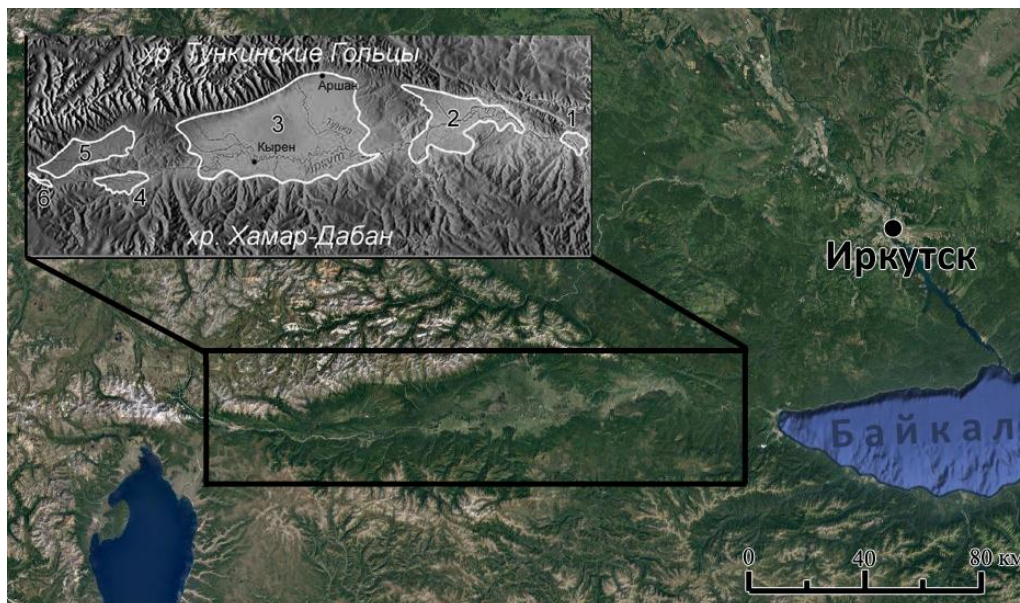
### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Исследование проведено в пределах бассейнов малых рек, находящихся на территории котловин Тункинской системы (Быстринская, Торская, Тункинская, Туранская, Хойтогольская, Мондинская) и их горного обрамления (хребты Хамар-Дабан и Тункинские Гольцы), а также верховья р. Иркут — массив Мунку-Сардык и район Нуху-Дабан (рис. 1). Территория малых речных бассейнов входит в бассейн р. Иркут, расположенный на контакте Алтае-Саянской горной области и Сибирской платформы (Саяно-Байкальская горная провинция) [7]. Площадь изучаемой горно-котловинной части — 8283 км<sup>2</sup>. Рассмотрены малые речные бассейны площадью водосбора от 5 км<sup>2</sup>.

Изучаемая территория имеет сложное геологическое строение, которое обуславливает специфику рельефа междуречий и малых речных долин, определяет разную степень выветривания (устойчивости к разным типам выветривания) и вовлечения горных пород в склоновые процессы и далее в сток речных наносов. Магматические горные породы в пределах верховий и средних течений малых рек района Нуху-Дабан, хребтов Тункинские Гольцы и Хамар-Дабан [8] устойчивы к размыву, но при этом в области развития эндогенной и экзогенной трещиноватости породы легче всего вовлекаются в склоновые и флювиальные процессы. В пределах вулканогенных неогеновых формаций, представленных базальтами, к настоящему времени не наблюдается сильного эрозионного расчленения (за исключением Еловского отрога, который имеет чехол четвертичных отложений) [9]. Осадочные горные породы на территории исследования (днища котловин, массив Мунку-Сардык, хребты Тункинские Гольцы и Хамар-Дабан в высокогорном и среднегорном поясах) относятся к терригенным и карбонатным рыхлым четвертичным отложениям: терригенную часть составляют сланцы, алевролиты, песчаники; карбонатная часть представлена кальцитами, известняками и доломитами [8]. Осадочные породы легче

## МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАССЕЙНОВ МАЛЫХ РЕК ГОРНО-КОТЛОВИННОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА РЕКИ ИРКУТ

подвержены выветриванию и транспортировке экзогенными процессами рельефообразования, в том числе флювиальными процессами.



Котловины: 1 — Быстринская, 2 — Торская, 3 — Тункинская, 4 — Туранская, 5 — Хойтогорльская, 6 — Мондинская.

Рис. 1. Схема расположения Тункинских котловин. Снимок Махара 2021 г.

Климатические условия изучаемых бассейнов малых рек характеризуются высокой пространственной неоднородностью, выраженной в заметном градиенте температур воздуха и осадков между периферией и центральными частями котловин. Наибольшее влияние на рельеф малых речных бассейнов среди климатических факторов оказывают максимум осадков в летний период (до 80% от годовой суммы) и отрицательная среднегодовая температура [10]. Сплошная, прерывистая и островная многолетняя мерзлота в долинах и на междуречьях малых рек [11] оказывают влияние на динамику поверхностного и подземного стока (сдерживают сток), усиливают процессы болотообразования.

*Используемые спутниковые данные, подготовка ЦМР и морфометрические характеристики.* Морфометрический анализ территории исследования проводился на основе комплексной обработки цифровой модели рельефа. Автором использовались данные японской спутниковой системы ALOS Global Digital Surface Model (DSM), ALOS World 3D-30m (AW3D30), горизонтальное разрешение сетки 30 м (1 угловая секунда), фрагменты размером 1 x 1 градус. Снимки представляют собой 32-битную регулярную сетку, где атрибут ячейки соответствует высоте над уровнем моря в данной точке. Данные отнесены к мировой геодезической системе 1984 года – WGS-84.

Подготовка ЦМР и получение ее производных выполнялось в программе SAGA GIS (версия 7.8.1), оформление и анализ данных в программе ArcGIS 10 (ESRI Inc.).

Перед проведением морфометрического анализа для ЦМР задана проекционная система координат UTM для зоны 48N в SAGA GIS с помощью модуля Coordinate Transformation (Grid). Далее проведена обрезка растра по границам изучаемой территории модулем «Clip grid with polygon». Последний этап обработки ЦМР – удаление «ложных впадин», которые представляют собой пустоты в цифровой модели, полученные из-за ошибок интерполяции, округления и усреднения значений высот, используя модуль Fill Sinks [12]. После проведенных процедур ЦМР готова к выполнению морфометрического анализа.

Для построения производных карт в SAGA GIS использовались пакеты модулей «Terrain Analysis»: Terrain Classification, Morphometry (Curvature, Slope, Aspect и т. д.), Channels (Channel Network). При анализе рельефа изучаемой территории большое внимание уделено морфометрическим показателям: абсолютной высоте, экспозиции склонов, крутизне склонов, асимметрии, глубине долин, горизонтальному расчленению рельефа бассейнов, относительному показателю эрозии, топографическому индексу влажности. Перечисленные показатели необходимы для анализа рельефа местности, визуализации и моделирования поверхностей.

*Показатель абсолютной высоты* необходим для разграничения ярусов рельефа. Вместе с крутизной склонов он указывает на интенсивность сноса рыхлого материала, а также на расстояние, преодолеваемое веществом с границ водоразделов до местного базиса эрозии (р. Иркут). *Крутизна склонов* указывает на интенсивность протекания склоновых геоморфологических процессов. От *экспозиции склонов* зависит местный климат и растительность через продолжительность облучения поверхности склонов солнечными лучами (инсоляция), интенсивность развития склоновых процессов.

*Показатель горизонтального расчленения* рассчитывался исходя из длины постоянных тальвегов на единицу площади (км/км<sup>2</sup>), что указывает на интенсивность эрозионного расчленения рельефа бассейна по горизонтали постоянными водотоками. *Глубина долины* (Valley depth) рассчитывается как разница высот между днищем речной долины и высшей точкой водораздела, указывает на глубину эрозионного размыва рельефа бассейна постоянным водотоком. *Коэффициент асимметрии бассейна* дает информацию о развитии водосборного бассейна, характеризует неравномерность распределения площадей правой и левой частей бассейна. Является отношением площадей водосборов наиболее значительных левых притоков к площадям аналогичных правых притоков. Чем ближе показатель к единице, тем более симметричен бассейн.

*Показатель индекса топографической влажности* (Topographic Wetness Index, TWI) — это отношение логарифма дренажной площади бассейна к тангенсу крутизны склона. Данный показатель необходим для анализа значений потенциальной влажности водосбора. Высокие показатели индекса указывают на участки аккумуляции влаги в грунтах и почве, что влияет на развитие ландшафтов, рельефа и микроклимата. *LS-фактор* — относительный показатель эрозии [13]. Показатель считается индикатором способности водного потока вызывать эрозию, что необходимо для оценки эрозионной сети бассейнов и расчетов эрозионного сноса материала в русла малых рек. S-фактор измеряет влияние крутизны склона, а

## МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАССЕЙНОВ МАЛЫХ РЕК ГОРНО-КОТЛОВИННОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА РЕКИ ИРКУТ

L-фактор определяет влияние длины склона. В комбинации LS-фактор описывает влияние рельефа местности на эрозию почвы. Для каждого показателя дано максимальное (Max), минимальное (Min), среднее значение (Mean).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью цифровой модели рельефа ALOS DSM получена карта-схема эрозионной сети тальвегов до 7-го порядка (р. Иркут), проведена группировка бассейнов малых рек по площади на 6 групп: бассейны малых рек, площадью до 10 км<sup>2</sup>, 10–50, 50–100, 100–300, 300–500 и более 500 км<sup>2</sup>.

Далее основные морфометрические показатели территории бассейнов малых рек разделены на три группы:

- 1) показатели абсолютной высоты, крутизны склонов и экспозиции склонов;
- 2) показатели горизонтального расчленения и глубины долины, коэффициент асимметрии бассейнов;
- 3) показатели индекса топографической влажности (TWI) и эрозионного потенциала рельефа (LS-фактор).

*Первая группа морфометрических показателей. Абсолютные высоты* бассейнов малых рек, площадью до 10 км<sup>2</sup>, варьируют от 640 до 2320 м, средняя высота — 1283 м (табл. 1). Общая площадь бассейнов, площадью до 10 км<sup>2</sup> — 936 км<sup>2</sup>. При этом в структуре рельефа преобладают высоты 640–920 м (15,4%). Водотоки, площадью до 10 км<sup>2</sup>, достигают максимум 2-го порядка и приурочены к среднегорному (28,7%) и низкогорному (55,9%) поясу Тункинских Гольцов, Хамар-Дабана, Ниловской, Еловской и Харадабанской перемычек. Амплитуда высот — 1680 м. Заложение непротяженных и небольших по площади бассейнов малых рек связано с участками современного тектонического поднятия, где водотоки эродировали интрузивные и эффузивные (базальты) породы. Бассейны примыкают к местному базису эрозии (р. Иркут) и плотно расположены вдоль линии русла магистральной реки.

Таблица 1.

Статистические параметры бассейнов малых рек горно-котловинной части бассейна р. Иркут

<b>Площадь бассейна до 10км<sup>2</sup></b>				
<b>Характеристика</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Mean</b>	<b>Преобладающий диапазон, показатель/%</b>
Абсолютная высота (Elevation), м	2320	640	1283	780–920/20,4
Крутизна (Slope), град.	64,8	0	13,2	0–5/31,5
Горизонтальное расчленение, км/км <sup>2</sup>	1,57	0,73	1,06	–
Глубина долины (Valley depth), м	869	0	197	0–100/33,1
Коэффициент асимметрии, у.е.	1,4	0,21	0,89	–
Индекс топографической влажности (TWI), коэф., у.е.	21,6	2,9	7,4	4–7/62,2

LS-фактор (LSF), коэф, у.е.	38,7	0	4,4	более 1,5/57,4
<b>10–50 км<sup>2</sup></b>				
Абсолютная высота (Elevation), м	2930	648	1630	648–840/15,8
Крутизна (Slope), град.	62,4	0	12,7	0–5/34,1
Горизонтальное расчленение, км/км <sup>2</sup>	1,07	0,51	0,67	–
Глубина долины (Valley depth), м	809	0	191	0–100/35,5
Коэффициент асимметрии, у.е.	2	0,55	1,16	–
Индекс топографической влажности (TWI), коэф., у.е.	21	3,2	7,5	Более 7/55,4
LS-фактор (LSF), коэф, у.е.	41,4	0	4,3	более 1,5/55,9
<b>50–100 км<sup>2</sup></b>				
Абсолютная высота (Elevation), м	3116	658	1500	850–1010/12,3
Крутизна (Slope), град.	67,4	0	13,7	6–9/23,2
Горизонтальное расчленение, км/км <sup>2</sup>	0,76	0,48	0,61	–
Глубина долины (Valley depth), м	860	0	139	100–200/32,7
Коэффициент асимметрии, у.е.	3	0,34	1,67	–
Индекс топографической влажности (TWI), коэф., у.е.	22,2	2,9	7,4	более 7/55,1
LS-фактор (LSF), коэф, у.е.	52,5	0	4,7	более 1,5/65,9
<b>100–300 км<sup>2</sup></b>				
Абсолютная высота (Elevation), м	3082	649	1505	649–810/12,5
Крутизна (Slope), град.	64,9	0	16,2	0–5/23,2
Горизонтальное расчленение, км/км <sup>2</sup>	0,73	0,46	0,54	–
Глубина долины (Valley depth), м	777	0	216	0–100/29,7
Коэффициент асимметрии, у.е.	1,59	0,37	1,1	–
Продолжение таблицы 1.				
Индекс топографической влажности (TWI), коэф., у.е.	44	0	5,8	более 7/54,1
LS-фактор (LSF), коэф, у.е.	22,5	3,1	7,2	более 1,5/69,4
<b>300–500 км<sup>2</sup></b>				
Абсолютная высота (Elevation), м	3218	649	1539	649–830/16,2
Крутизна (Slope), град.	72,4	0	18,3	0–5 и 10–13/18,2 и 17,2
Горизонтальное расчленение, км/км <sup>2</sup>	0,68	0,44	0,57	–
Глубина долины (Valley depth), м	797	0	276	200–300/20,7
Коэффициент асимметрии, у.е.	3,7	0,022	1,38	–
Индекс топографической влажности (TWI), коэф., у.е.	23,8	2,6	7,3	4–7/49,3
LS-фактор (LSF), коэф, у.е.	80,1	0	6,7	более 1,5/74,9

**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАССЕЙНОВ МАЛЫХ РЕК ГОРНО-  
КОТЛОВИННОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА РЕКИ ИРКУТ**

<b>более 500 км<sup>2</sup></b>				
Абсолютная высота (Elevation), м	3201	704	1506	704–880/21
Крутизна (Slope), град.	68,8	0	17,1	0–5 и более 34/25 и 16,2
Горизонтальное расчленение, км/км <sup>2</sup>	0,63	0,62	0,625	–
Глубина долины (Valley depth), м	882	0	167	300–400/22,6
Коэффициент асимметрии, у.е.	8,8	5,9	7,35	–
Индекс топографической влажности (TWI), коэф., у.е.	23,8	2,5	7,5	4–7/64,7
LS-фактор (LSF), коэф., у.е.	77	0	6,2	более 1,5/67,4

*Примечание: Max, Min, Mean — наибольшее, наименьшее и среднее значение*

*Составлено автором.*

Бассейны малых рек, площадью 10–50 км<sup>2</sup>, занимают высоты 648–840 м (15,8%) (таблица), а также 1980–2170 и 2170–2360 м (по 15% каждый диапазон), что связано с расположением бассейнов в пределах высокогорного (13%), среднегорного (45%) и низкогорного поясов Тункинских Гольцов, района Нуху-Дабан, массива Мунку-Сардык и хр. Хамар-Дабан. Общая площадь бассейнов 10–50 км<sup>2</sup> — 1068 км<sup>2</sup>, тальвеги достигают максимум 3-го порядка. Амплитуда абсолютных высот – 2432 м. Наибольшую плотность бассейны достигают в западной части изучаемой территории (массив Мунку-Сардык, район Нуху-Дабан, западная оконечность Тункинских Гольцов), что связано с горным характером рельефа территории, наличием трудно и легко размываемых пород (комплекс терригенно-карбонатно-вулканогенных отложений), историей развития территории (плейстоценовые оледенения), при этом ограниченная высокими водоразделами территория бассейнов и близкое расстояние к местному базису эрозии (р. Иркут) не дают развиваться протяженной речной сети более высших порядков. К данной группе относятся реки Обо-Горхон, Малая Тайторка, Нижняя Тибельти, Аерхан, Саган-Шулута и др.

Бассейны, площадью 50–100 км<sup>2</sup> (общая – 691 км<sup>2</sup>) приурочены к высотам 658–850 м (13,9%) (таблица) и 850–1010 м (12,3%) в пределах высокогорного, среднегорного (43,7% площадей) и низкогорного поясов Тункинских Гольцов (реки Тумелик, Бурухтуй), района Нуху-Дабан (Толта, Сусер), массива Мунку-Сардык (Белый Иркут), хр. Хамар-Дабан (Туран, Большая Агунка, Улан-Горхон и др.), Еловского отрога (Ахалик, Еловка). Наибольшая концентрация бассейнов отмечена в пределах хр. Хамар-Дабан (8 бассейнов), максимальный порядок рек — 4-й (Сусер, Белый Иркут, Еловка и др.). Амплитуда высот — 2458 м. Бассейны малых рек, площадью 100–300 км<sup>2</sup> отмечены в пределах высот от 1130 м до 2090 м (55,9% площадей) в среднегорном и низкогорном поясе района Нуху-Дабан (Тумелик), Тункинских Гольцов (Илтыкшин, Цаган-Угун) и хр. Хамар-Дабан (Кырен, Халагун, Малая Быстрая и др.). Суммарно занимают площадь 1844 км<sup>2</sup>. Амплитуда абсолютных высот — 2433 м. Большинство бассейнов приурочено к хр. Хамар-Дабан, достигая максимально 4-го порядка.

Реки Большой Зангисан, Харагун, Большая Быстрая и Енгарга относятся к группе рек, с площадью 300–500 км<sup>2</sup>, максимум у р. Енгарга (495 км<sup>2</sup>). Суммарная площадь — 1504 км<sup>2</sup>. Бассейны приурочены к диапазонам высот 660–830 м (16,2%) и примерно в равном соотношении (по 8,5% каждый диапазон) на высотах от 830 до 1850 м (53,3%). Амплитуда высот — 2569 м. Большая часть бассейнов расположена в пределах среднегорного и низкогорного поясов хр. Хамар-Дабан, а также аллювиальной равнины р. Иркут. Бассейн р. Енгарга занимает высокогорный, среднегорный и низкогорный пояса Тункинских Гольцов, предгорную наклонную равнину и озерно-аллювиальную равнину. Максимального порядка достигают реки Харагун и Большая Быстрая — 5-й.

Наибольшую площадь (более 500 км<sup>2</sup>) занимают два крупнейших бассейна малых рек в пределах горно-котловинной части бассейна р. Иркут — Ихе-Ухгунь (836 км<sup>2</sup>) и Тунка (811 км<sup>2</sup>). Общая площадь 1647 км<sup>2</sup>. Занимают высокогорный (9,3%), среднегорный (38,9%), низкогорный пояса Тункинских Гольцов, предгорную наклонную равнину. Среднее течение р. Ихе-Ухгунь приурочено к днищу Хойтогольской котловины (аллювиальная равнина), что обуславливает распространение в структуре высот отметок 865–1150 м, далее в нижнем течении после пересечения Ниловской перемычки русло выходит на аллювиальную равнину р. Иркут. Среднее течение р. Тунка приурочено к озерно-аллювиальной равнине (720–722 м) и в нижнем течении выходит на аллювиальную равнину р. Иркут. По абсолютным высотам для бассейнов, площадью более 500 км<sup>2</sup>, преобладают диапазоны 704–880 м (21%), 880–1055 м (12,9%). Обе реки имеют максимальный порядок — 5-й. Амплитуда высот — 2497 м.

*Крутизна склонов* по классификации О.К. Леонтьева и Г.И. Рычагова [14] в пределах бассейнов, площадью до 10 км<sup>2</sup>, 10–50 км<sup>2</sup>, соответствует категориям от очень пологих (31,5%, 34,1%) до средней крутизны (20,6%, 20%). Среднее значение — 13,2° и 12,7° (таблица). Крутые склоны, благоприятные для развития гравитационных процессов занимают 3,3 и 3,4 % площади. В структуре распределения склонов по крутизне для бассейнов 50–100 км<sup>2</sup> наблюдается преобладание склонов средней крутизны (8–15°) — 33,6%, при этом нарастает площадь крутых склонов (до 14,7%). С увеличением площади бассейнов до 300 км<sup>2</sup> отмечается нарастание доли крутых склонов (15–35°): для бассейнов площадью 100–300 км<sup>2</sup> число крутых склонов достигает 54,1%. Затем это значение снижается для бассейнов 300–500 км<sup>2</sup> — (37,2%), а для бассейнов более 500 км<sup>2</sup> уже составляет 28,5%, при этом наблюдается увеличение доли очень крутых склонов (> 35°) — 16,2 % (максимум среди всех групп). Распространение категории очень крутых склонов приурочено к высокогорному и среднегорному поясу массива Мунку-Сардык, Тункинских Гольцов и Хамар-Дабана, что предполагает развитие гравитационных процессов (осыпи, обвалы, лавины и т. д.), а также создаёт благоприятные условия для перераспределения стока постоянных водотоков.

*Экспозиция склонов.* Что касается анализа площадного распространения экспозиций склонов, то большая их часть в пределах бассейнов, площадью до 10 км<sup>2</sup>, 50–100 км<sup>2</sup>, 100–300 км<sup>2</sup>, обращена на север (10,8%, 11,4%, 9,5%), северо-восток (9,2 %, 10,5%, 9,5%) и северо-северо-запад (9,6 %, 12%, 9,3%), что соответствует общему



## МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАССЕЙНОВ МАЛЫХ РЕК ГОРНО-КОТЛОВИННОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА РЕКИ ИРКУТ

---

уровню наклона земной поверхности от областей активного тектонического поднятия (массив Мунку-Сардык, Хамар-Дабан) в сторону тектонически стабильных участков днищ котловин, района Нуху-Дабан. Преобладание склонов северных экспозиций определяет меньшее поступление солнечной радиации на поверхность, задержку в процессе таяния снега, меньшее испарение влаги, снижение интенсивности склоновых процессов. Для бассейнов, площадью 10–50 км<sup>2</sup>, 300–500 км<sup>2</sup> и более 500 км<sup>2</sup> отмечено преобладание южных и западных экспозиций: юг (8,9%, 10,5%, 12,8%), юго-запад (9%, 10,1%, 11,8%), запад (9%, 10,8%, 13,1%). Такое распределение связано с преобладанием в структуре рельефа бассейнов южного макросклона Тункинских Гольцов, наклоненного в сторону Тункинского сброса, а также общего наклона рифта с запада на восток (от Хубсугульской до Байкальской впадины).

*Вторая группа морфометрических показателей. Показатель горизонтального расчленения* по степени расчленения рельефа бассейнов малых рек линейными формами распределяется от слабой категории (менее 0,5 км/км<sup>2</sup>) до очень сильной (более 1,5 км/км<sup>2</sup>) [15]. Наибольшим горизонтальным расчленением рельефа (максимум показателя) обладают бассейны, площадью до 10 км<sup>2</sup> (таблица, рис.2). Среднее значение горизонтального расчленения бассейнов — 1,06 км/км<sup>2</sup>, что относится к категории сильного расчленения рельефа [15]. Связано это с тем, что зачастую длины водотоков соотносятся с площадью бассейнов, а большое количество водотоков 1-го порядка увеличивает степень расчленения рельефа бассейнов. С увеличением площади бассейнов средний показатель горизонтального расчленения рельефа снижается: от 0,67 км/км<sup>2</sup> (средняя категория) для бассейнов, площадью 10–50 км<sup>2</sup>, до 0,54 км/км<sup>2</sup> для бассейнов 100–300 км<sup>2</sup> и затем нарастает до 0,625 км/км<sup>2</sup> для бассейнов, площадью более 500 км<sup>2</sup>. Нарастание показателя связано с преобладанием в структуре рельефа бассейнов (более 500 км<sup>2</sup>) обширной сети водотоков 1-го и 2-го порядков в пределах Тункинских Гольцов, которые увеличивают значения показателя. Большинство же бассейнов вне зависимости от площади относятся к средней категории горизонтального расчленения рельефа (0,5–1,0 км/км<sup>2</sup>) (рис. 2.).

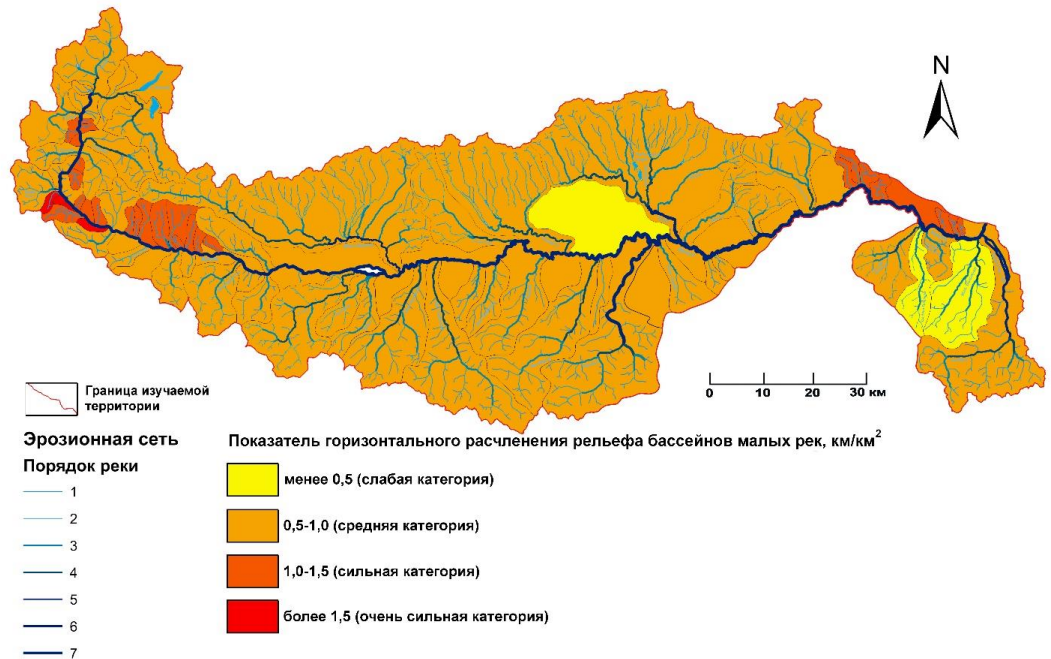


Рис. 2. Распределение показателя горизонтального расчленения рельефа бассейнов малых рек горно-котловинной части бассейна реки Иркут.

Составлено автором.

Как видно из карты-схемы распределения показателя горизонтального расчленения рельефа бассейнов малых рек, бассейны с сильным и очень сильным расчленением рельефа приурочены к южным склонам Тункинских Гольцов (площадью до 10 км<sup>2</sup>), а также к среднегорному поясу массива Мунку-Сардык и района Нуху-Дабан, где за счет большой плотности водотоков 1-го порядка происходит усиление расчлененности рельефа. Бассейны рек Средняя Тибельти и Малая Быстрая относятся к слабой категории расчленения рельефа, так как в нижних течениях рек в пределах низкогорного пояса хр. Хамар-Дабан плотность и протяженность эрозионной сети снижается, реки практически не принимают новых притоков, бассейны почти полностью покрыты лесной растительностью.

Расчеты показателя *глубины долины (Valley depth)* по площадям бассейнов показали, что наибольшей глубины долины достигают для бассейнов малых рек, площадью более 500 км<sup>2</sup>, при этом для данной категории площади по диапазонам глубин распределяются почти равномерно: 0–100 м (22,5%), 100–200 (21,9%), 200–300 (21,4%), 300–400 (22,6%), более 400 м (11,6%). Для бассейнов, площадью до 10 км<sup>2</sup>, 10–50 км<sup>2</sup>, 50–100 км<sup>2</sup>, преобладают глубины долин 0–100 м (33,1%, 35,5%, 36,7%). С увеличением площади бассейнов наблюдается более равномерное распределение глубин высот по диапазонам, для бассейнов, площадью 100–300 км<sup>2</sup>, отмечено увеличение процентного распределения диапазона глубин 100–200 м (24,5%). У бассейнов 300–500 км<sup>2</sup> преобладают долины, глубиной более 400 м (21,2%), здесь же отмечена наибольшая средняя глубина долины — 276 м. Наиболее

## МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАССЕЙНОВ МАЛЫХ РЕК ГОРНО-КОТЛОВИННОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА РЕКИ ИРКУТ

глубокие долины приурочены к Тункинским Гольцам (бассейны рек Ихе-Ухгунь, Енгарга, Тунка), а также к хр. Хамар-Дабан (реки Большой Зангисан, Харагун), что указывает на области с повышенным вертикальным расчленением рельефа, а также маркирует участки активных склоновых процессов.

Анализ *коэффициента асимметрии* бассейнов малых рек показал (рис. 3.), что степень асимметрии бассейнов нарастает с увеличением их площади и порядка реки, достигая наибольшего значения для бассейнов рек Ихе-Ухгунь и Тунка (коэффициенты асимметрии 5,9 и 8,8), у которых полностью отсутствуют правые притоки и правобережная часть бассейна практически не развита, у р. Енгарга отсутствуют левые притоки и не развита левобережная часть бассейна. Большинство бассейнов малых рек имеют субмеридиональную ориентацию (Большая Быстрая, Большой Зангисан, Саган-Шулута и др.), меньшая часть – субширотную (Бажир, Тумелик, Белый Иркут и др.). Для первой группы бассейнов асимметрия связана с порядковой структурой водотоков (чем больше порядок реки, тем сильнее вертикальное расчленение и больше крутизна склонов, т.е. больше показатель асимметрии), для второй группы – асимметрия по экспозиционному фактору (южные склоны принимают больше солнечной радиации, в результате чего сильнее проявляются водно-эрозионные процессы при снеготаянии).

Для бассейнов малых рек хр. Хамар-Дабан, площадью более 50 км<sup>2</sup>, чаще отмечена асимметричность левобережья (реки Халагун, Средняя Тибельти, Большой Зангисан и др.). Также изменения в структуру речной сети вносит разница в климатических характеристиках (главный фактор – количество атмосферных осадков) между Тункинскими Гольцами и хр. Хамар-Дабан, обуславливая климатическую асимметрию: Гольцы получают большее количество осадков, что благоприятно для развития эрозионной сети низших порядков. Наиболее симметричные бассейны малых рек характерны для водотоков 1-го–3-го порядков в среднегорном и низкогорном поясе Тункинских Гольцов, массива Мунку-Сардык, Хамар-Дабана, Ниловского и Еловского отрога.

*Третья группа морфометрических показателей.* Для бассейнов малых рек, площадью до 10 км<sup>2</sup>, показатели индекса топографической влажности (TWI) тяготеют к средним значениям (4–7) [16] – 62,2%, при этом с увеличением площади бассейна показатель TWI нарастает (преобладают высокие показатели – более 7), а к бассейнам, площадью более 500 км<sup>2</sup>, этот показатель снова снижается до средних значений (64,7%). Такое распределение индекса топографической влажности связано с преобладанием в структуре рельефа бассейнов (площадью более 500 км<sup>2</sup>) выровненных днищ котловин и пологих склонов, в пределах которых эрозионная сеть не получает широкого развития. Средние показатели для бассейнов до 10 км<sup>2</sup> связаны с неразвитостью протяженной эрозионной сети бассейнов. В целом, наиболее увлажненные участки (наибольшие показатели TWI) приурочены к пониженным участкам долин, к руслам постоянных водотоков, а также к конусам выноса рек 2–3-го порядка (Тункинские Гольцы). Высокие показатели TWI указывают на хорошо развитую эрозионную сеть, а также отмечают участки с развитием временных водотоков, где отмечены флювиальные и склоновые водно-эрозионные процессы. 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 (высокогорный пояс массива Мунку-Сардык, Тункинских Гольцов, хр. Хамар-Дабан). Наибольший средний показатель индекса топографической влажности отмечен для бассейнов малых рек, площадью 10–50 и более 500 км<sup>2</sup> (7,5).

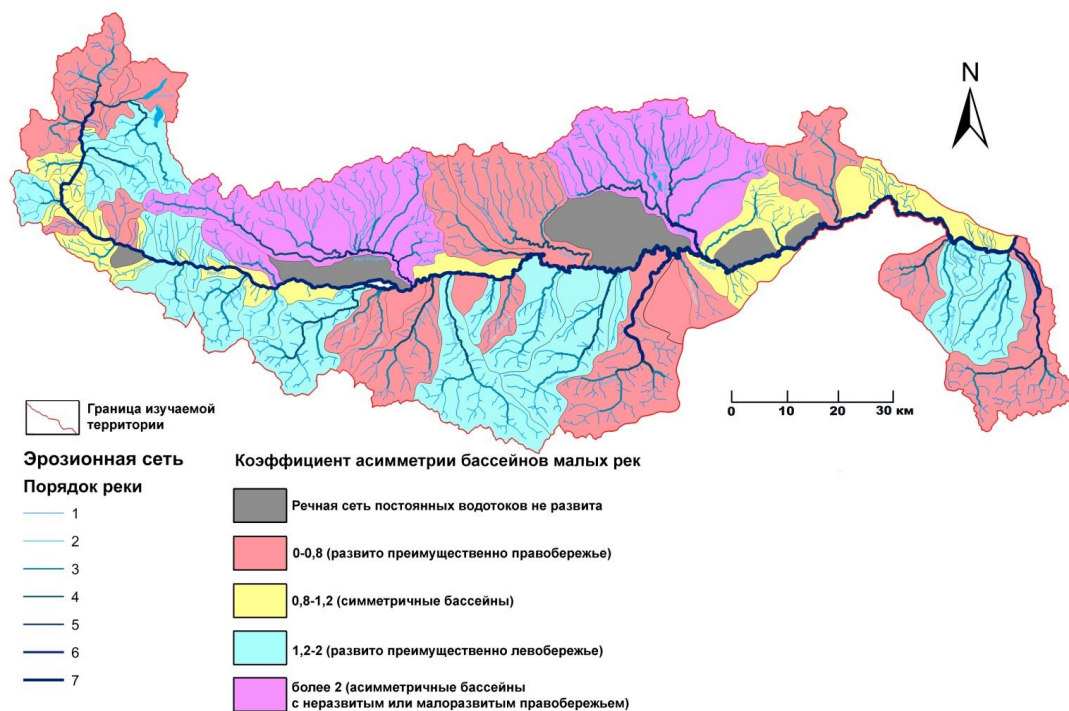


Рис. 3. Распределение коэффициента асимметрии бассейнов малых рек горно-котловинной части бассейна реки Иркут.

Составлено автором.

Для исследуемых бассейнов отмечено общее снижение распределения высоких показателей (более 1,5) [16] LS-фактора с увеличением площади бассейнов: показатель изменяется от 44% до 25%. Наибольший средний показатель LS-фактора отмечен для бассейнов, площадью 100–300 км<sup>2</sup> — 7,2. Максимумы показателя приурочены к наиболее крутым склонам горного обрамления, особенно в пределах высокогорного и среднегорного пояса (крутые незадернованные склоны бортов долин). Низкие показатели эрозионного потенциала рельефа выявлены в бассейнах, большая часть водосбора которых расположена в пределах днищ котловин, выровненных участков района Нуху-Дабан (Ильчирская котловина), что связано с небольшими уклонами земной поверхности. Высокие показатели LS-фактора указывают на источники сноса рыхлого материала в пониженные участки долин малых рек.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением площади бассейнов наблюдается увеличение амплитуды высот между верхними и нижними течениями рек, при этом нарастает порядок рек, увеличивается эрозионное расчленение. Преобладание северной ориентации склонов у бассейнов малых рек, площадью 10 км<sup>2</sup>, 50–100 км<sup>2</sup>, 100–300 км<sup>2</sup>, соотносится со снижением показателей LS-фактора (интенсивность эрозионных процессов), при этом у бассейнов с преобладанием южных экспозиций эрозионный потенциал рельефа нарастает. С увеличением площади бассейнов нарастает доля среднегорного и высокогорного поясов в структуре рельефа бассейнов, а также нарастает доля очень крутых склонов, но из-за участков днищ котловин в структуре сохраняется преобладание пологих склонов (0–5°).

Большинство бассейнов малых рек характеризуются средними показателями горизонтального расчленения рельефа, при этом с увеличением площади бассейнов отмечено общее снижение показателя (от очень сильного расчленения к слабому). Глубина речных долин также нарастает с увеличением площади бассейнов, а распределение значений по площадям имеет равное соотношение. Общая широтная ориентация территории бассейнов малых рек горно-котловинной части бассейна р. Иркут определяет развитие асимметричных бассейнов для южного макросклона Тункинских Гольцов, тогда как в пределах северного макросклона хр. Хамар-Дабан развиты более симметричные бассейны. Таким образом, тектонический фактор влияет на развитие асимметрии бассейнов малых рек незначительно, ведущая роль в формировании асимметрии принадлежит порядковой структуре водотоков, количеству атмосферных осадков и субширотной ориентации (на склонах южной экспозиции эрозионное расчленение выше).

Показатели топографического индекса влажности (TWI) и эрозионного потенциала рельефа (LS-фактор) также зависят от площади бассейнов: показатели TWI с увеличением площади возрастают (чем больше бассейн, тем большее количество стока аккумулирует), показатель LS-фактора наоборот, снижается, что связано с преобладанием в структуре рельефа бассейнов, площадью более 500 км<sup>2</sup>, выровненных участков днищ котловин.

## Список литературы

1. 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.
2. Zende A.M., Nagarajan R., Atal K.R. Prioritization of sub-watersheds in semiarid region, Western Maharashtra, India using Geographical Information System. American Journ. of Engineering Research (AJER). 2012. vol. 2. no. 10. pp. 128–135.
3. Ермолаев О. П., Иванов М. А. Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным STRM и ASTER GDEM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 98–109.
4. 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. Applied Water Science. 2017. vol. 7. no 1. pp. 217–232.

5. Опекунова М. Ю., Бардаш А.В., Тухта С.А. Структурный анализ речных бассейнов Верхнего Приангарья (на примере бассейна реки Оёк) // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 156–163. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(156-163)
6. 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>
7. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М.: Наука, 1974. 359 с.
8. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000 Серия Восточно-Саянская. Лист М-47-VI. Объяснительная записка / Составитель В. П. Арсентьев; ред. Н.А. Флоренсов. М.: Недра, 1969. 74 с.
9. Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С. и др. Геохронология и геодинамика позднего кайнозоя (Южная Сибирь Южная и Восточная Азия). Новосибирск, Наука, Сибирское отделение, 2000. 288 с.
10. Василенко О.В., Воропай Н.Н. Особенности формирования климата котловин юго-западного Прибайкалья // Известия РАН. Серия географическая. 2015. № 2. С. 104–111.
11. Лешиков Ф.Н. Мерзлые породы Приангарья и Прибайкалья. Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 145 с.
12. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models, in Catena, no. 46(2–3). 2002. pp. 159–176.
13. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. 2015. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. Geosciences. 5(2): pp. 117–126. DOI: 10.3390/geosciences5020117
14. Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М.: Высшая школа, 1979. 287 с.
15. Спиридонов А.И. Геоморфологическое картографирование / А.И. Спиридонов. М.: Недра, 1974. 184 с.
16. Cushman S.A. Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency / S.A. Cushman, K. McGarigal, M.C. Neel // Ecological Indicators. 2008. Vol. 8. pp. 691–703

## **MORPHOMETRIC ANALYSIS OF SMALL RIVERS BASINS OF THE MOUNTAIN AND DEPRESSION PART OF THE IRKUT RIVER BASIN**

*Bezgodova O.V.*

*Institute of Geography named after. V.B. Sochava, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation  
E-mail: ola.bezgodova.23@yandex.ru*

Morphometric indicators are an important basis for analyzing the functioning of a river system (connection with runoff dynamics and characteristics of the river network), where the main feature of the erosion network is its ability to self-organize. Geographic information systems (SAGA GIS, ArcGIS) using automated procedures made it possible to perform morphometric analysis using the hydrologically correct digital elevation model ALOS. The main patterns of relief development were identified based on the calculation and analysis of statistical parameters. The morphometric features of the relief of small river basins (absolute height, steepness and exposure of slopes) create conditions for differentiating the relative indicator of erosion, the topographic wetness index, horizontal dissection and asymmetry of basins, as well as a set of altitudinal zones and differentiation of leading relief-forming processes. The higher the slope steepness and the higher the absolute height, the more intense the exogenous geomorphological processes (mainly slope processes) and the higher the LS-factor. On gentle slopes in the lower relief zones, with the development of cryogenic processes, the erosion index reaches a minimum, while the topographic wetness index has maximum values.

It was revealed that with an increase in the area of a small river basin, the following morphometric characteristics increase: the amplitude of heights between the upper and lower reaches of the rivers, the order of the river increases, the depth of the erosional incision, the topographic wetness index,

as well as the share of slope processes in the structure of exogenous processes. The sublatitudinal orientation of large orographic elements and basins influences the distribution of LS-factor (intensity of erosion processes) and asymmetry indicators: for basins with predominant slopes of southern exposure, the LS-factor and asymmetry are higher than for northern slopes.

Markings of absolute heights of basins of different areas most often applies towards the range of 648–850 m (20,2%), least of all to heights of more than 2650 m (0,07%), which is associated with the predominance of flat and concave surfaces of the basin bottoms in the relief area (lacustrine-alluvial and alluvial plains). The study area is dominated by gentle slopes of 0–5° (bottoms of basins), followed by slopes with a steepness of 18–21° (foothill sloping plain, slopes of the Hamar-Daban ridge). The area distribution of the slope exposure indicator has the greatest values for the southern and northern directions.

The indicator of horizontal relief dissection has average values (0,5–0,1) for most small river basins; basins with an area of up to 10 km<sup>2</sup> are characterized by the greatest dissection, while as the basin area increases, this indicator decreases. River valleys are distinguished by deep bottoms, especially within the Tunkinsky Goltsy, Hamar-Daban and Munku-Sardyk. 22,1% of river basins of different areas have a depth of 100–200 m, 20,6% have a depth of 200–300 m and 21,9% have a depth of 300–400 m. Areas with a large difference in height between the bottom of the valleys and the watershed boundary are characterized by active development slope and fluvial processes.

Most values of the topographic wetness index (TWI) for the area of the territory tend to average values (4–7) 66,8% (slopes of the Tunkinskie Goltsy and Hamar-Daban ridges, Munku-Sardyk), high index values are confined to the bottoms of river valleys, foothill sloping plain, lacustrine-alluvial plain (Tunka Basin), which indicates areas of moisture accumulation. The LS-factor values are often in the high category (72,9%), which indicates the high potential of water flows to cause erosion.

**Keywords:** asymmetry, Baikal rift zone, horizontal dissection, morphometric analysis, small river basins, Tunka basin system.

### References

1. Simonov Yu.G., Simonova T.Yu. Rechnoj bassejn i bassejnovaya organizaciya geograficheskoj obolochki (River basin and basin organization of the geographical envelope) // Eroziya pochv i ruslovyje process, Moscow, 2004, Issue. 14, pp. 7–32. (In Russian).
2. Zende A.M., Nagarajan R., Atal K.R. Prioritization of sub-watersheds in semiarid region, Western Maharashtra, India using Geographical Information System. American Journal. of Engineering Research (AJER), 2012, vol. 2, no. 10, pp. 128–135.
3. Ermolaev O. P., Ivanov M. A. Geomorfometricheskij analiz bassejnovyh geosistem Privolzhskogo federal'nogo okruga po dannym STRM i ASTER GDEM (Geomorphometric analysis of basin geosystems of the Volga Federal District according to STRM and ASTER GDEM data) // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2017, T. 14, No. 2, pp. 98–109. (In Russian).
4. 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. Applied Water Science, 2017, vol. 7, no 1, pp. 217–232.
5. Opekunova M.Yu., Bardash A.V., Tukhta S.A. Strukturnyj analiz rechnyh bassejnov Verhnego Priangar'ya (na primere bassejna reki Oyok) (Structural analysis of river basins of the Upper Angara region (using the example of the Oyok River basin)) // Geografiya i prirodnye resursy, 2018, No. 3, pp. 156–163. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(156-163) (In Russian).
6. Bezgodova O. V. Strukturno-morfometricheskij analiz malogo rechnogo bassejna reki Ihe-Uhgun' (bassejn reki Irkut) (Structural and morphometric analysis of the small river basin of the Ihe-Uhgun River (Irkut River basin)) // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle, 2021, T. 37, pp. 3–16. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.37.3> (In Russian).
7. Nagor'ya Pribajkal'ya i Zabajkal'ya (Highlands of the Baikal region and Transbaikalia). Moscow: Nauka (Publ.), 1974, 359 p. (In Russian).

8. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000. Seriya Vostochno-Sayanskaya (Geological map of the USSR, scale 1:200000 East Sayan Series). Sheet M-47-VI. Explanatory note / Compiled by V. P. Arsentiev; ed. N.A. Florensov. Moscow: Nedra (Publ.), 1969, 74 p. (In Russian).
9. Rasskazov S.B., Logachev N.A., Brandt I.S. and others. Geohronologiya i geodinamika pozdnego kajnozoya (Yuzhnaya Sibir', Yuzhnaya i Vostochnaya Aziya) (Geochronology and geodynamics of the late Cenozoic (Southern Siberia, Southern and Eastern Asia)). Novosibirsk: Nauka (Publ.), 2000, 288 p. (In Russian).
10. Vasilenko O.V., Voropai N.N. Osobennosti formirovaniya klimata kotlovin yugo-zapadnogo Pribajkal'ya (Features of the formation of the climate of the basins of the southwestern Baikal region) // Izvestiya RAN. Geographical series, 2015, No. 2, pp. 104–111. (In Russian).
11. Leshchikov F.N. Merzlye porody Priangar'ya i Pribajkal'ya (Frozen rocks of the Angara and Baikal regions). Nauka (Publ.), 1978, 145 p. (In Russian).
12. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models, in Catena, no. 46(2–3), 2002, pp. 159–176.
13. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. 2015. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. Geosciences, 5(2), pp. 117–126. DOI: 10.3390/geosciences5020117
14. Leontyev O.K., Rychagov G.I. Obshchaya geomorfologiya (General geomorphology), Moscow: Vysshaya shkola (Publ.), 1979, 287 p. (In Russian).
15. Spiridonov A.I. Geomorfologicheskoe kartografirovaniye (Geomorphological mapping), Moscow: Nedra (Publ.), 1974, 184 p. (In Russian).
16. Cushman S.A. Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency / S.A. Cushman, K. McGarigal, M.C. Neel // Ecological Indicators, 2008, Vol. 8, pp. 691–703.

*Поступила в редакцию 19.10.2023 г.*