



УДК 551.435+556.51(282.247.3)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.70>

Расчет морфометрических характеристик рельефа речных бассейнов возвышенных и низменных равнин на основе цифровой модели рельефа

К. А. Кузьмин, М. Е. Буковский, А. В. Воронков*

Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов, Россия

Аннотация. Представлены результаты сравнительного морфометрического анализа рельефа речных бассейнов, проведенного на основе цифровой модели рельефа с помощью геоинформационных приложений QGIS 3 и SAGA GIS 9. Целью работы стало сравнение степени рисков развития эрозии в речных бассейнах возвышенной и низменной равнин. Объектами цифрового моделирования и расчетов стали бассейны рек Польной Воронеж и Чембар. Первый бассейн располагается на Окско-Донской низменной равнине с относительно плоским рельефом, второй – существенно расчленен и расположен в пределах Приволжской возвышенности. Построена гипсометрическая карта и показано распределение площади поверхности бассейнов по абсолютной высоте. Для рек Польной Воронеж, Чембар и их притоков с площадью водосбора более 50 км² произведен расчет наиболее значимых морфометрических показателей: форма и уклон продольного профиля, падение реки, глубина расчленения и средний уклон склонов водосбора. Для бассейна р. Польной Воронеж характерны низкие риски развития эрозионных процессов по причине малых величин глубины расчленения, средних уклонов водотоков и склонов водосборов. В бассейне р. Чембар морфометрические характеристики выражают значительный риск развития эрозионных процессов, особенно на водосборах со средним уклоном склонов более 2°. Исходя из принципов бассейнового природопользования, полученные количественные данные о рельефе могут быть полезны для проведения балансовых расчетов перемещения жидкого и твердого стока внутри водосборов, разработки проектов почво- и водоохраных мероприятий, улучшения структуры землепользования.

Ключевые слова: речной бассейн, цифровая модель рельефа, морфометрический анализ.

Благодарности. Публикация подготовлена при финансовой поддержке гранта Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина для поддержки научных коллективов, Приказ № 490/1 от 02.09.2024.

Для цитирования: Кузьмин К. А., Буковский М. Е., Воронков А. В. Расчет морфометрических характеристик рельефа речных бассейнов возвышенных и низменных равнин на основе цифровой модели рельефа // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 53. С. 70–83. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.70>

Calculation of the Morphometric Characteristics of the River Basin Relief of High and Low Plains Based on a Digital Elevation Model

K. A. Kuzmin, M. E. Bukovskiy, A. V. Voronkov*

Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a comparative morphometric analysis of the river basin relief, conducted on the basis of a digital elevation model (DEM) using the QGIS 3 and SAGA GIS 9 geoinformation applications. The aim of the work was to compare the degree of erosion risks in the river basins of the high and low plains. The objects of digital modeling and calculations were the Polnoy Voronezh and Chembar river basins. The first basin is located on the Oka-Don lowland plain with a relatively flat relief, the second is significantly dissected and is located within the Volga Upland. A hypsometric map was constructed and the distribution of the surface area of the basins by absolute height was shown. For the rivers Polnoy Voronezh, Chembar and their tributaries with a catchment area of more than 50 km², the most significant morphometric variables were calculated: the shape and slope of the longitudinal profile, river fall, the depth of dissection and the average gradient of catchment slopes. The Polnoy Voronezh river basin is characterized by low risks of erosion development due to small values of dissection depth, average slopes of watercourses and catchment slopes. In the Chembar river basin, morphometric variables express a significant risk of erosion development, especially in catchment areas with an average gradient of slopes of more than 2°. Based on the principles of basin nature management, the obtained quantitative data on the relief can be useful for carrying out balance calculations of liquid and solid runoff movement within catchment areas, developing projects for soil and water protection measures, and improving the structure of land use.

Keywords: river basin, digital elevation model, morphometric analysis.

For citation: Kuzmin K.A., Bukovskiy M.E., Voronkov A.V. Calculation of the Morphometric Characteristics of the River Basin Relief of High and Low Plains Based on a Digital Elevation Model. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 53, pp. 70–83. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.70> (in Russian)

Введение

Равнинные ландшафты европейской части России являются основными сельскохозяйственными районами страны. При этом многие речные бассейны здесь распаханы более чем на 70–80 %, что исторически обусловило интенсивную эрозию почв [Maltsev, Yermolaev, 2020]. На хозяйственно освоенных равнинах эрозия является ведущим фактором деградации речной сети и сельскохозяйственных земель [Dynamics ... , 2017].

Целью данной работы стало проведение морфометрического анализа рельефа бассейнов возвышенной и низменной равнин для сравнения степени рисков развития эрозии в данных бассейнах. Сведения о морфометрии рельефа полезны для расчетов водообеспеченности территорий, организации рационального землепользования, разработки комплекса противоэрозионных мероприятий. В частности, в рамках разработки и освоения адаптивно-ландшафтных систем земледелия показатель крутизны склонов следует учитывать при размещении различных сельскохозяйственных угодий и полевых культур в пределах водосбора с целью минимизации смыва почвы и поступления наносов с аккумулярованными загрязняющими веществами в речную сеть.

Обзор литературы

В естественных науках давно установлено существование разных видов территориальной организации компонентов природы и явлений внутри географических оболочек Земли. Познание отдельных компонентов окружающего мира постепенно перерастало в создание концепций о соподчиненности и взаимодействии элементов природы. Еще в середине XIX в. А. Гумбольдт писал, что необходимо комплексное познание природных явлений, которые должны рассматриваться в процессе их эволюционного развития и взаимодействий [Humboldt, 1845]. В дальнейшем представления о структурности природного пространства и постоянном взаимодействии его компонентов развивались и легли в основу современной физической географии, ландшафтоведения, учения о геосистемах [Сочава, 1978; Симонов, Симонова, 2004].

Наряду с ландшафтной, геологической, климатической организациями существует бассейновая организация земного пространства – система стока поверхностных и подземных вод, связанная с перераспределением солнечного тепла и влаги на планете [Симонов, Симонова, 2004].

Бассейн реки, или водосбор, представляет собой полужамкнутую сложную форму рельефа, которая образуется в результате совместного влияния эндогенных и экзогенных факторов. Ключевая особенность бассейна как парадинамической системы заключается в преобладании нисходящих гравитационных потоков вещества (водных масс и твердых частиц). Это, в свою очередь, определяет особое сочетание климатических, морфологических, гидрологических и почвенных условий.

Речной бассейн довольно легко демаркируется от сопредельных бассейнов водораздельными линиями и занимает определенную часть поверхности суши. Практически любой из бассейнов содержит некоторую систему тальвегов – пониженных линейных участков, представляющих собой в общем виде сеть русел рек, балок и оврагов, а также ложбин стока – понижений флювиального происхождения, не имеющих выраженного русла. На систему русел опирается система склонов. Эти два геоморфологических элемента составляют основу бассейновой организации. Поверхностные воды и влекомые вещества склоновым стоком поступают в русла водотоков, формируя постоянный или временный русловой сток, определяя тем самым закономерности физической организации функционирования бассейнов [Симонов, Симонова, 2004].

В речных бассейнах можно наблюдать определенные закономерности в структуре. Американский инженер-строитель и гидролог Р. Хортон [Horton, 1945] первым детально изучил эти закономерности, описав основные принципы структурной организации бассейнов. Р. Хортон делил водотоки на порядки согласно определенному правилу, с помощью которого он мог сравнивать друг с другом внешне непохожие речные бассейны. Первым порядком является водоток, не имеющий собственных притоков. Два водотока первого порядка при слиянии формируют водоток второго порядка. Соответственно водоток третьего порядка будет образован слиянием двух водотоков второго порядка, а водоток четвертого порядка – слиянием двух водотоков третьего

порядка и т. д. Однако, например, после впадения в реку четвертого порядка водотоков более низкого порядка данная река свой порядок не увеличит.

В дальнейшем система кодирования речной сети, предложенная Р. Хортоном, модифицировалась его последователями. А. Стралер [Strahler, 1952] и независимо от него В. П. Философов [Мысливец, Шешнев, 2020] усовершенствовали кодировку порядков, предложив остановиться на дихотомической системе и отказаться от перекодирования русел для выявления системы главных рек. Такой метод повышает объективность выделения порядков и сохраняет открытые Р. Хортоном закономерности бассейновой структуры.

Существуют и другие системы кодировки водотоков [Ржаницын, 1960; Scheidegger, 1961; Shreve, 1966], однако именно система Стралера – Философова получила широкое признание и применяется исследователями из разных областей наук о Земле. Ее строгий математический принцип позволяет четко описать структуру любого бассейна и дает возможность независимым специалистам, проводящим однообразное выделение порядков рек, сопоставлять свои результаты.

Огромный вклад в раскрытие законов функционирования речных бассейнов внес Н. И. Маккавеев своим учением об эрозионно-аккумулятивных процессах [Маккавеев, 2003]. Он показал единство процессов, продуцируемых всеми водными потоками – склоновыми, временными русловыми в овражно-балочной сети и постоянными русловыми в системе рек. Идеи Н. И. Маккавеева сформировали научную школу, получив развитие в трудах многочисленных последователей [Эрозионно-русловые ... , 2017].

Большим сторонником выделения речных бассейнов в особую форму организации географического пространства был Ю. Г. Симонов. Он в полной мере осветил вопросы морфометрического анализа как самостоятельного метода геоморфологического исследования, показал значимость изучения количественных характеристик рельефа [Симонов, 1998]. Под его руководством проделана большая работа по выявлению и математическому описанию закономерностей пространственной структуры речных бассейнов.

Бассейновый подход получил развитие в эколого-оценочных исследованиях и возможность широкого практического применения. В рамках сибирской ландшафтно-гидрологической школы Л. М. Корытный сформулировал бассейновую концепцию природопользования и предложил использовать ее принципы для решения экологических и социально-экономических проблем [Корытный, 2021].

Многие исследователи [Falconer, Lin, Harpin, 2005; Гальцева, Смольянинов, Шмыков, 2012; Спесивый, Лисецкий, 2014; Young, Harshadeep, 2020; Morphometric ... , 2025] видят в бассейновом подходе инструмент управления почвенными и водными ресурсами. К ключевым задачам эколого-географических исследований речных бассейнов на сегодняшний день относятся: оптимизация землепользования на ландшафтной основе, направленная на борьбу с эрозией почв и уменьшение поступления наносов со склонов в русла рек, оценка баланса вещества и деформации поля загрязнений, прогнозирование социально-экономических последствий природопользования.

Одним из системообразующих свойств речного бассейна как сложной геосистемы, несомненно, является рельеф. Геоморфологическому фактору, наряду с климатическими характеристиками, принадлежит главная роль в формировании пространственной организации геокомпонентов речного бассейна [Безгодова, 2021]. От морфометрической структуры зависят поверхностный сток и весь спектр эрозионно-аккумулятивных процессов от водоразделов до речных устьев. Получение количественных данных о структуре и форме поверхности водосборного бассейна является необходимым этапом в исследовании динамических, временных и прочих аспектов функционирования бассейновой системы.

Вопросы морфометрического строения рельефа рассматриваются в работах многих специалистов из области наук о Земле. Эффективным инструментом изучения фактора рельефа являются геоинформационные системы (ГИС), где исследуемый пространственный объект представляется на цифровой модели рельефа (ЦМР). Бурное развитие ГИС и ЦМР в последние десятилетия вывело морфометрические исследования на новый уровень, сделав осуществимыми те задачи пространственного анализа, которые ранее были трудоемкими или вообще невыполнимыми.

Реализующийся с помощью ГИС морфометрический анализ и цифровое моделирование нашли широкое применение в работах различной направленности, где для количественной оценки рельефа и выявления различий у пространственных форм одного или нескольких рангов предложено множество морфометрических характеристик [Симонов, 1998; Hengl, Reuter, 2009; Florinsky, 2017]. При этом разные авторы используют различные наборы морфометрических показателей в зависимости от изучаемого объекта и поставленных задач. Так, в работе над морфометрическим районированием небольшой территории на юго-востоке Нидерландов [Verhagen, Dragut, 2012] рассматривались высота, угол наклона и кривизна земной поверхности. Для ландшафтного районирования вулканического рельефа международным коллективом авторов [Object-oriented ..., 2014] предложено использовать угол наклона, высоту, плотность временной и постоянной гидрографической сети.

Объекты и методы исследования

Модельными объектами для расчетов стали схожие по водосборной площади бассейны рек Польной Воронеж и Чембар, расположенные в одной природной зоне – лесостепи – но в различных геоморфологических условиях. Это типичные бассейны возвышенных и низменных равнин в пределах Восточно-Европейской равнины.

Польной Воронеж – средняя река в пределах Окско-Донской низменности на северо-западе Тамбовской области. Берет начало на границе между Тамбовской и Рязанской областями, при слиянии с р. Лесной Воронеж образует р. Воронеж – левый приток Дона. Бассейн имеет субмеридиональную направленность и ярко выраженную асимметрию, протянувшись с северо-востока на юго-запад. Рельеф плоский и слаборасчлененный, на водосборе имеется множество западин. Гидрографическая сеть лучше развита на левобережье. Площадь водосбора – 2142,7 км². Длина – 187,7 км.

Чембар – средняя река, расположенная на юго-западе Пензенской области в пределах Керенско-Чембарской возвышенности (окраине Приволжской возвышенности). До слияния с притоком Малым Чембаром носит название Большой Чембар. Левый и самый крупный приток р. Вороны (Донской бассейн). Водосбор сильно расчленен и в целом имеет субширотную направленность. Речные долины врезаны на большую глубину и вскрывают грунтовые воды, выходящие в виде многочисленных родников. Длина реки – 120,5 км, площадь водосбора – 2027,6 км².

Структура речных бассейнов была рассмотрена по следующим морфометрическим характеристикам: форма и средний уклон продольного профиля, падение реки, глубина расчленения рельефа, средний уклон склонов водосбора. Также описано распределение площади поверхности бассейнов по высоте. Для решения данных задач были применены методы цифрового моделирования рельефа.

Геоинформационные технологии позволяют оперировать как уже имеющимися в свободном доступе цифровыми данными о рельефе, так и создавать собственные матрицы высот на основе различных источников и методов цифрового моделирования [Буковский, Кузьмин, 2024; Сравнение современных..., 2025]. Для выполнения морфометрического анализа была использована ЦМР, созданная в ГИС-среде путем векторизации рельефа с топографических карт масштаба 1:100 000 и последующей интерполяции векторных данных инструментом *Toro to Raster* [Hutchinson, 1989]. В соответствии с масштабом карты был задан размер пикселя модели, равный 30 м.

Результаты

Для описания распределения поверхности двух модельных бассейнов по абсолютной высоте в программной среде QGIS 3 на основе ЦМР были сформированы гипсометрические карты с шагом ступеней 20 м, что соответствует сечению рельефа на топографической карте масштаба 1:100 000 (рис. 1). Значения представлены в Балтийской системе высот. В табл. 1 представлены гипсометрические показатели бассейнов рек Польной Воронеж и Чембар.

Таблица 1

Гипсометрические показатели бассейнов рек Польной Воронеж и Чембар

Ступени высот, мБС	Польной Воронеж				Чембар			
	Площадь		Наращение площади с высотой		Площадь		Наращение площади с высотой	
	км ²	%	км ²	%	км ²	%	км ²	%
100–120	9,89	0,46	9,89	0,46	–	–	–	–
120–140	330,02	15,40	339,91	15,86	1,60	0,08	1,60	0,08
140–160	901,04	42,05	1240,95	57,92	164,46	8,11	166,06	8,19
160–180	722,14	33,70	1963,09	91,62	259,59	12,80	425,66	20,99
180–200	178,74	8,34	2141,83	99,96	377,77	18,63	803,43	39,62
200–220	0,87	0,04	2142,70	100,00	600,78	29,63	1404,21	69,26
220–240	–	–	–	–	486,33	23,99	1890,54	93,24
240–260	–	–	–	–	130,34	6,43	2020,89	99,67
260–280	–	–	–	–	6,70	0,33	2027,58	100,00
Всего	2142,70	–	–	–	2027,58	–	–	–

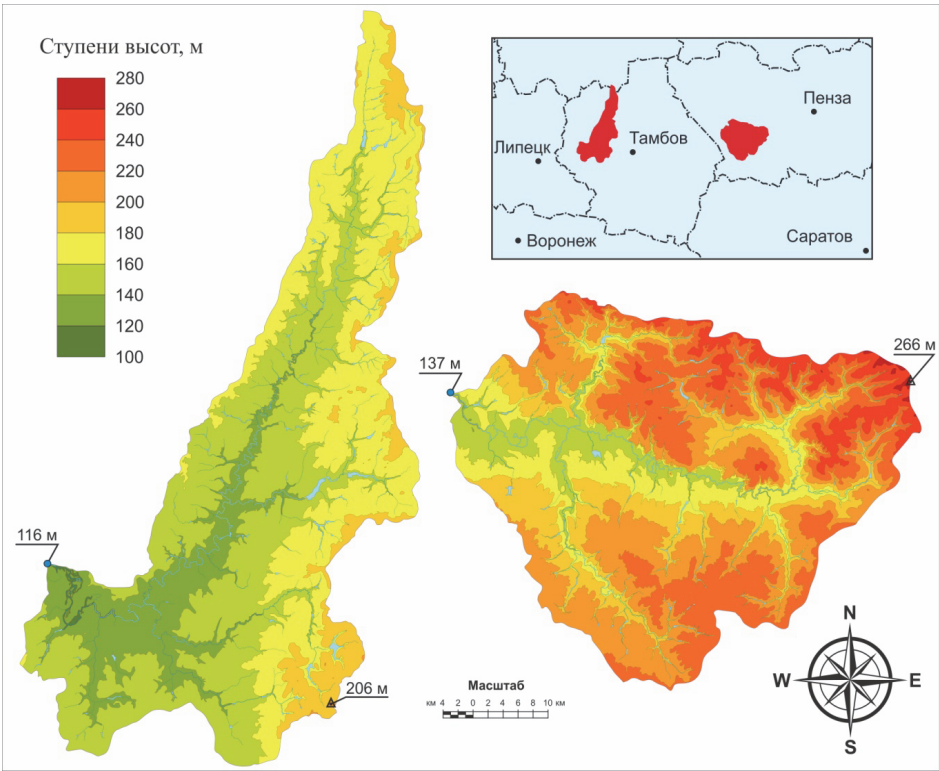


Рис. 1. Гипсометрическая карта бассейнов рек Полной Воронеж (слева) и Чембар (справа)

На рис. 2 представлено распределение поверхностей бассейнов рек Полной Воронеж и Чембар по высотным ступеням.

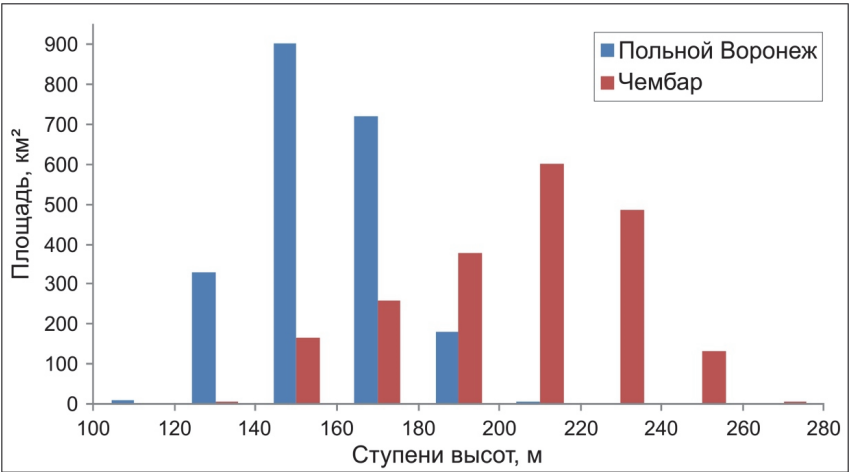


Рис. 2. Гистограмма высотного распределения поверхностей в бассейнах рек Полной Воронеж и Чембар

Рассматриваемые бассейны характеризуются весьма разным распределением водосборных площадей по абсолютной высоте. В бассейне Польного Воронежа три четверти стокоформирующей поверхности сконцентрировано на высотах 140–180 м над у. м., причем в промежутке 140–160 м находится 42 % площади бассейна. В бассейне Чембара не наблюдается такого выраженного ярусного строения, водосборные площади равномерно распределены по большому диапазону высот. Наибольшие доли в 30 и 24 % занимают территории на высотах 200–220 и 220–240 м соответственно. Но также значительны доли в промежутках 160–180 и 180–200 м, в совокупности составив 31 %.

На рис. 3 изображены продольные профили русел рек Польной Воронеж и Чембар, выполненные с помощью графического редактора CorelDRAW 2021 в горизонтальном масштабе 1:500 000 и вертикальном 1:400.

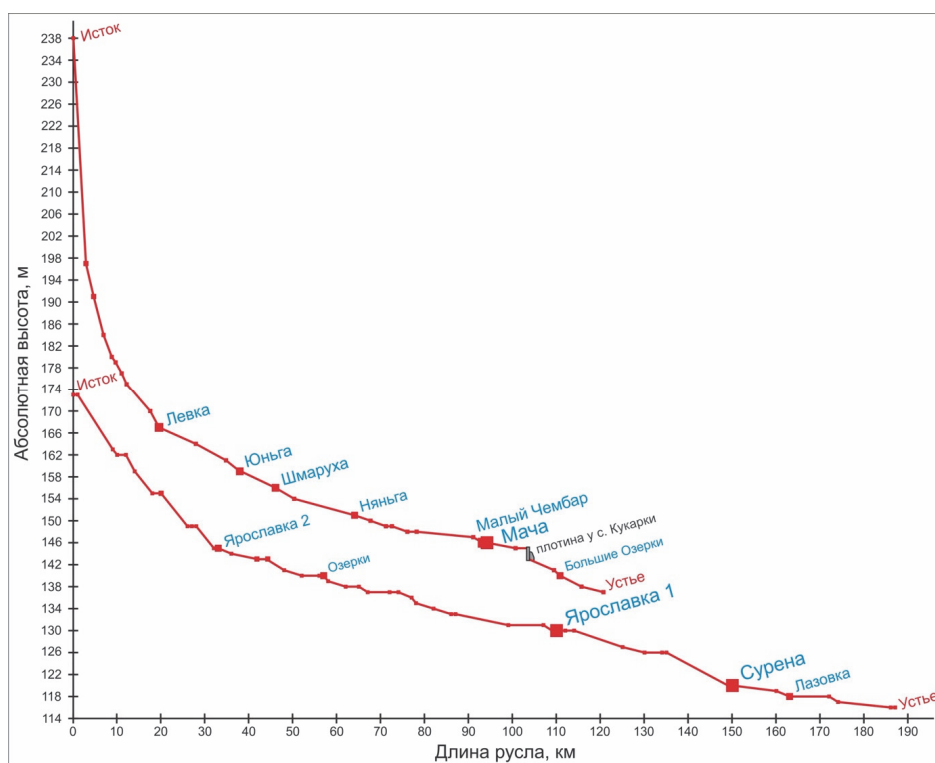


Рис. 3. Продольные профили русел рек Польной Воронеж (снизу) и Чембар (сверху)

В науках о Земле предметом исследований часто выступают небольшие бассейновые системы, представляющие из себя первые несколько порядков по классификации Стралера – Философова, что обосновано динамичностью протекающих в них процессах и высокой скоростью реакции на природные и антропогенные изменения. Стоит обратиться к определению малых рек, к которым Н. И. Алексеевский [Малые ... , 1998] отнес водотоки длиной менее

100 км. С другой стороны, реками как таковыми принято считать водотоки с площадью водосбора не менее 50 км², что примерно соответствует длине русла в 10 км [Михайлов, Добровольский, Добролюбов, 2005]. Поэтому малыми реками можно назвать водотоки с площадью водосбора не менее 50 км² и длиной в промежутке от 10 до 100 км. В масштабах карты 1:100 000 такие водотоки в основном будут иметь третий-четвертый порядок.

В бассейнах рек Польной Воронеж и Чембар нами выделены притоки с площадью водосбора более 50 км². Для каждой реки на основе созданных ЦМР рассчитан комплекс показателей (табл. 2). Определены базовые показатели длины и площади водосбора, наивысшая точка в бассейне, абсолютная высота истока и устья. Получены данные о среднем уклоне русла и среднем уклоне склонов водосбора. Построены продольные профили русел рассматриваемых водотоков, и охарактеризована их форма.

Таблица 2

Результаты морфометрического анализа водотоков и их водосборов с площадью более 50 км² в бассейнах рек Польной Воронеж и Чембар

Водоток	Глубина расчленения водосбора, м	Падение водотока, м	Средний уклон водотока, ‰	Средний уклон склонов водосбора	
				‰	град.
Польной Воронеж	90	57	0,30	12,07	0,7
Ярославка 2	43	35	1,35	10,99	0,6
Озерки	46	38	2,80	8,01	0,5
Ярославка 1	58	40	1,17	10,4	0,6
Малая Ярославка	41	27	1,77	10,02	0,6
Чебоксар	54	44	3,03	10,1	0,6
Без названия у с. Западная Старинка	55	45	2,39	8,22	0,5
Сурена (с Ближней Суреной)	86	64	1,03	12,7	0,7
Дальняя Сурена	76	58	1,73	10,42	0,6
Лазовка	40	30	1,44	8,76	0,5
Чембар (с Бол. Чембаром)	129	101	0,84	26,71	1,5
Левка	94	55	2,19	25,27	1,4
Малая Левка	91	49	3,23	38,06	2,2
Юньга	105	79	2,82	26,93	1,5
Шмаруха	83	66	2,49	23,54	1,3
Няньга	87	46	2,76	19,52	1,1
Малый Чембар	108	61	1,65	39,58	2,3
Теплая	89	31	3,83	35,11	2
Мача	92	72	1,26	19,35	1,1
Большие Озерки	60	47	3,60	13,13	0,8

Малые реки в бассейнах Польного Воронежа и Чембара имеют второй-четвертый порядок по системе Стралера – Философова с преобладанием третьего порядка. Польной Воронеж и Чембар являются реками пятого порядка.

Из рассчитанных показателей можно видеть всю контрастность морфометрической структуры двух исследованных бассейнов. Чембар превосходит Польной Воронеж по среднему уклону русла почти втрое, по среднему уклону склонов водосбора – более чем в два раза.

У притоков Польного Воронежа наименьший средний уклон склонов водосбора составил примерно $0,5^\circ$, а наибольший уклон наблюдается у р. Сурены в юго-восточной части бассейна, где отметки высот достигают 206 м над у. м. В бассейне р. Чембар не отмечено рек со средним уклоном склонов водосбора меньше чем $0,8^\circ$, а у притоков Малая Левка и Малый Чембар этот показатель превышает 2° . Следует отметить, что средний уклон реки при прочих равных условиях зависит от ее протяженности. А диапазон средних уклонов склонов частных водосборов в границе речного бассейна не отражает максимальной и минимальной крутизны его поверхности в целом. Для водосборов первого порядка, например, можно получить более широкий разброс величины среднего уклона склонов, чем при анализе крупных порядков.

Продольные профили двадцати изученных водотоков тяготеют к плавновогнутой форме, что характерно для рек освоенных равнин. Наибольшую крутизну линии профиля можно наблюдать в верхнем течении, а наименьшую – в нижней части. Сильновогнутый продольный профиль р. Чембар характеризует существенную врезанность речной долины. Форма профиля р. Польной Воронеж демонстрирует малые уклоны русла и неглубокий врез долины на территории речного бассейна. В условиях тектонически стабильных аккумулятивных и эрозионно-денудационных равнин главными факторами, формирующими кривизну продольного профиля, являются климатические условия и антропогенная нагрузка.

Заключение

Созданная в ходе выполнения исследования на основе топографических карт масштаба 1:100 000 ЦМР степенью своей детализации отвечает задачам морфометрического анализа водосборов низких порядков, что позволило описать основные морфометрические показатели в бассейнах рек Польной Воронеж и Чембар.

Бассейн р. Польной Воронеж достаточно благополучен в эрозионном отношении, крутизна его склонов невелика, речные долины широкие и неглубокие. В силу малых продольных уклонов рек при их небольшой водности и скорости течения одной из главных геоэкологических проблем здесь является заилиение и зарастание водной растительностью русел, их превращение в систему соединяющихся в периоды паводков озер. Борьба с такими явлениями заключается в расчистке речных русел и проведении сопутствующих мероприятий, контроле режима использования водоохранных зон.

Значительная крутизна склонов и глубокое залегание базисов эрозии в бассейне р. Чембар свидетельствуют о высоком эрозионном потенциале. Следует обратить внимание на водосборы со средним уклоном склонов более 2° , которые можно считать эрозионно-опасными. В каждом частном случае могут оказаться целесообразными проведение специальных почвозащитных мероприятий, отказ от высаживания пропашных культур, перевод части или всей территории малого водосбора в менее эрозионно-опасную категорию угодий, например переориентация с пашни на сенокос или пастбище. Однако принятие конкретных хозяйственных решений подобного рода по-

требует оценки не только морфометрии рельефа, но и факторов увлажненности территории, глубины залегания грунтовых вод, характеристик почвенного покрова, таких как гранулометрический состав почв, режима использования земель.

Список литературы

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>

Буковский М. Е., Кузьмин К. А. Оценка точности общедоступных цифровых моделей рельефа по абсолютной высоте для равнинных территорий лесостепной зоны // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 73–86. <https://doi.org/10.17223/25421379/33/5>

Гальцева Е. В., Смольянинов В. М., Шмыков В. И. Изучение природных условий и антропогенного воздействия на земельные ресурсы при проведении ландшафтно-экологического землеустройства на Правобережье Дона в пределах Воронежской области // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2012. № 2 (33). С. 304–310.

Корытный Л. М. Географический подход к Наукам о Воде // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42, № 3. С. 13–22. <https://doi.org/10.15372/GIPR20210302>

Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М. : Геогр. факультет МГУ, 2003. 355 с.

Малые реки Волжского бассейна / под ред. Н. И. Алексеевского. М. : Изд-во МГУ, 1998. 234 с.

Михайлов В. Н., Добровольский А. Д., Добролюбов С. А. Гидрология. М. : Высшая школа, 2005. 463 с.

Мысливец В. И., Шешнев А. С. Виктор Павлович Философов и его время (к 110-летию со дня рождения) // Геоморфология. 2020. № 1. С. 107–114. <https://doi.org/10.31857/S0435428120010101>

Ржаницын Н. А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л. : Гидрометеиздат, 1960. 238 с.

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. 2004. № 14. С. 7–32.

Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск : Наука, 1978. 320 с.

Спесивый О. В., Лисецкий Ф. Н. Оценка интенсивности и нормирование эрозионных потерь в Центральном-Черноземном районе на основе бассейнового подхода // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. 2014. № 10 (181). С. 125–132.

Сравнение современных свободно распространяемых цифровых моделей рельефа и их применимости для эрозионного моделирования / К. А. Мальцев, С. Н. Талипова, И. И. Магзянов [и др.] // Известия Русского географического общества. 2025. Т. 157, № 1. С. 79–98. <https://doi.org/10.31857/S0869607125010067>

Эрозионно-русловые системы / под ред. Р. С. Чалова, А. Ю. Сидорчука, В. Н. Голосова. М. : ИНФРА-М, 2017. 702 с.

Dynamics of agricultural soil erosion in European Russia / L. F. Litvin, Z. P. Kiryukhina, S. F. Krasnov, N. G. Dobrovolskaya // Eurasian Soil Science. 2017. Vol. 50, N 11. P. 1344–1353. <https://doi.org/10.1134/S1064229317110084>

Falconer R., Lin B., Harpin R. Environmental modelling in river basin management // International Journal of River Basin Management. 2005. Vol. 3, N 3. P. 169–184. <https://doi.org/10.1080/15715124.2005.9635256>

Florinsky I. V. An illustrated introduction to general geomorphometry // Progress in Physical Geography. 2017. Vol. 41, N 6. P. 723–752. <https://doi.org/10.1177/030913331773366>

Hengl T., Reuter H. I. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier, Developments in Soil Science, 2009. Vol. 33. 765 p.

Horton R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology // Geological Society of America Bulletin. 1945. Vol. 56, N 3. 275 p. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:edosat\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:edosat]2.0.co;2)

Humboldt A. von. Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung. Stuttgart: G. Göttschen, 1845. Bd. 6. 175 p.

Hutchinson M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // Journal of Hydrology. 1989. Vol. 106, N 3–4. P. 211–232. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)

Maltsev K., Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // Catena. 2020. Vol. 195. P. 104726. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>

Morphometric analysis for understanding river basin hydrology: a case of Gelda watershed, Tana Sub-Basin, Ethiopia / D. W. Melsse, M. A. Tegegne, Y. A. Mekonnen, Y. T. Bihon // Applied Water Science. 2025. Vol. 15, N 171. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02526-x>

Object-oriented classification of a high-spatial resolution SPOT5 image for mapping geology and landforms of active volcanoes: Semeru case study, Indonesia / Z. Kassouk, J.-C. Thouret, A. Gupta [et al.] // Geomorphology. 2014. Vol. 221. P. 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.022>

Scheidegger A. E. Theoretical geomorphology. Berlin : Springer, 1961. 333 p.

Shreve R. L. Statistical law of stream numbers // The Journal of Geology. 1966. Vol. 74, N 1. P. 17–37. <https://doi.org/10.1086/627137>

Strahler A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography // Geological Society of America Bulletin. 1952. Vol. 63, N 11. P. 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

Verhagen P., Dragut L. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping // Journal of Archaeological Science. 2012. Vol. 39, N 3. P. 698–703. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.11.001>

Young W., Harshadeep N. R. Managing Water Resources in Large River Basins // Water. 2020. Vol. 12, N 12. P. 3486. <https://doi.org/10.3390/w12123486>

References

Bezgodova O.V. Strukturno-morfometricheskii analiz malogo rechnogo basseina reki Ikhe-Ukhgun (bassein reki Irkut) [Structural and Morphometric Analysis of the Ihe-Ukhgun Small River Basin (Irkut River Basin)]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle* [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)

Bukovskiy M.E., Kuzmin K.A. Otsenka tochnosti obshchedostupnykh tsifrovyykh modelei rel'efa po absolyutnoi vysote dlya ravninnykh territorii lesostepnoi zony [Assessment of the accuracy of publicly available digital elevation models by absolute height for plain territories of the forest-steppe zone]. *Geosfernye issledovaniya* [Geosphere Research], 2024, no. 4, pp. 73–86. <https://doi.org/10.17223/25421379/33/5> (in Russian)

Galtseva E.V., Smolyaninov V.M., Shmykov V.I. Izuchenie prirodnnykh uslovii i antropogen-nogo vozdeistviya na zemelnye resursy pri provedenii landshaftno-ekologicheskogo zemleustroistva na Pravoberezh'e Dona v predelakh Voronezhskoi oblasti [Study of natural conditions and anthropogenic impact on land resources during landscape-ecological land management on the Right Bank of the Don within the Voronezh Region]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Agrarian University], 2012, no. 2 (33), pp. 304–310. (in Russian)

Korytny L.M. Geograficheskii podkhod k Naukam o Vode [Geographical Approach to Water Sciences]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2021, vol. 42, no. 3, pp. 13–22. <https://doi.org/10.15372/GIPR20210302> (in Russian)

Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River bed and erosion in its basin]. Moscow, Geography faculty of MSU Publ., 2003, 355 p. (in Russian)

Malye reki volzhskogo basseina [Small rivers of the Volga basin]. Ed. by N.I. Alekseevsky. Moscow, Moscow State University Publ., 1998, 234 p. (in Russian)

Mikhailov V.N., Dobrovolskiy A.D., Dobrolyubov S.A. *Gidrologiya* [Hydrology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005, 463 p. (in Russian)

Myslivets V.I., Sheshnev A.S. Viktor Pavlovich Filosofov i ego vremya (k 110-letiyu so dnya rozhdeniya) [Victor Pavlovich Filosofov and His Time (to the 110th Anniversary)]. *Geomorfologiya* [Geomorphology], 2020, no. 1, pp. 107-114. <https://doi.org/10.31857/S0435428120010101> (in Russian)

Rzhanitsyn N.A. *Morfologicheskie i gidrologicheskie zakonomernosti stroeniya rechnoi seti* [Morphological and hydrological patterns of river network structure]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1960, 238 p. (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 ruslovyie protsessy* [Soil erosion and riverbed processes]. Moscow, 2004, no. 14, pp. 7-32. (in Russian)

Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemakh* [Introduction to the study of geosystems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978, 320 p. (in Russian)

Spesivy O.V., Lisetskii F.N. Otsenka intensivnosti i normirovanie erozionnykh poter' v Tsentralno-Chernozemnom raione na osnove basseinovogo podkhoda [Estimate of the intensity and regulation of erosion soil losses in Central Chernozem region based on the basin approach]. *Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya: Estestvennye nauki* [Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences], 2014, no. 10 (181), pp. 125-132. (in Russian)

Maltsev K.A., Talipova S.N., Magzyanov I.I., Somov A.A., Maltseva T.S. Svrnenie sovremennykh svobodno rasprostranyaemykh tsifrovyykh modelei rel'efa i ikh primenimosti dlya erozionnogo modelirovaniya [Accuracy Analysis of New Freely Available Digital Terrain Models in the European Territory of Russia]. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Proceedings of the Russian Geographical Society], 2025, vol. 157, no. 1, pp. 79-98. <https://doi.org/10.31857/S0869607125010067> (in Russian)

Eroziionno-ruslovyie sistemy [Catchment erosion-fluvial systems] / Ed. by R.S. Chalov, A.Yu. Sidorchuk, V.N. Golosov. Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 702 p. (in Russian)

Litvin L.F., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Dobrovolskaya N.G. Dynamics of agricultural soil erosion in European Russia. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 11, pp. 1344-1353. <https://doi.org/10.1134/S1064229317110084>

Falconer R., Lin B., Harpin R. Environmental modelling in river basin management. *International Journal of River Basin Management*, 2005, vol. 3, no. 3, pp. 169-184. <https://doi.org/10.1080/15715124.2005.9635256>

Florinsky I.V. An illustrated introduction to general geomorphometry. *Progress in Physical Geography*, 2017, vol. 41, no. 6, pp. 723-752. <https://doi.org/10.1177/030913331773366>

Hengl T., Reuter H.I. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. *Elsevier. Developments in Soil Science*, 2009, vol. 33, 765 p.

Horton R.E. Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 1945, vol. 56, no. 3, 275 p. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:edosat\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:edosat]2.0.co;2)

Humboldt A. von. *Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung* [Cosmos: A Sketch of a Physical Description of the Universe]. Stuttgart, G. Gottaschen Publ., 1845, vol. 6, 175 p. (in German)

Hutchinson M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 1989, vol. 106, no. 3-4, pp. 211-232. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)

Maltsev K., Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia. *Catena*, 2020, vol. 195, P. 104726. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>

Melisse D.W., Tegegne M.A., Mekonnen Y.A., Bihon Y.T. Morphometric analysis for understanding river basin hydrology: a case of Gelda watershed, Tana Sub-Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 2025, vol. 15, no. 171. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02526-x>

Kassouk Z., Thouret J.-C., Gupta A., Solikhin A., Liew S.C. Object-oriented classification of a high-spatial resolution SPOT5 image for mapping geology and landforms of active volcanoes: Seme-ru case study, Indonesia. *Geomorphology*, 2014, vol. 221, pp. 18-33. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.022>

Schodegger A.E. Theoretical geomorphology. Berlin, *Springer*, 1961. 333 p.

Shreve R.L. Statistical law of stream numbers. *The Journal of Geology*, 1966, vol. 74, no. 1, pp. 17-37. <https://doi.org/10.1086/627137>

Strahler A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, vol. 63, no. 11, pp. 1117-1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

Verhagen P., Dragut L. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. *Journal of Archaeological Science*, 2012, vol. 39, no. 3, pp. 698-703. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.11.001>

Young W., Harshadeep N.R. Managing Water Resources in Large River Basins. *Water*, 2020, vol. 12, no. 12, P. 3486. <https://doi.org/10.3390/w12123486>

Сведения об авторах

Кузьмин Кирилл Алексеевич

научный сотрудник, лаборатория мониторинга агроклиматического и водно-ресурсного потенциалов территорий Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина
Россия, 392036, г. Тамбов,
ул. Интернациональная, 33
e-mail: ka_kuzmin@mail.ru

Буковский Михаил Евгеньевич

кандидат географических наук, заведующий, лаборатория мониторинга агроклиматического и водно-ресурсного потенциалов территорий Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина
Россия, 392036, г. Тамбов,
ул. Интернациональная, 33
e-mail: mikezzz@mail.ru

Воронков Антон Вячеславович

аспирант, кафедра экологии и природопользования Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина
Россия, 392036, г. Тамбов,
ул. Интернациональная, 33
e-mail: antonvoronkov123123@gmail.com

Information about the authors

Kuzmin Kirill Alekseevich

Research Scientist, Laboratory for Monitoring Agro-Climatic and Water-Resource Potentials of the Territories Derzhavin Tambov State University
33, Internatsionalnaya st., Tambov, 392036, Russian Federation
e-mail: ka_kuzmin@mail.ru

Bukovskiy Mikhail Evgenievich

Candidate of Sciences (Geography), Head, Laboratory for Monitoring Agro-Climatic and Water-Resource Potentials of the Territories Derzhavin Tambov State University
33, Internatsionalnaya st., Tambov, 392036, Russian Federation
e-mail: mikezzz@mail.ru

Voronkov Anton Vyacheslavovich

Postgraduate, Department of Ecology and Nature Management Derzhavin Tambov State University
33, Internatsionalnaya st., Tambov, 392036, Russian Federation
e-mail: antonvoronkov123123@gmail.com

Код научной специальности: 1.6.16, 1.6.20, 1.6.21

Статья поступила в редакцию 14.07.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 12.09.2025

The article was submitted July, 14, 2025; approved after reviewing September, 09, 2025; accepted for publication September, 12, 2025