УДК 528.7 *ISSN 1609-0683*
DOI: https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/2/84-92

Морфометрический анализ водосборов малых рек города Калуги на базе цифровой модели рельефа

М. В. Захарова ✉

Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского,
Российская Федерация
(248023, г. Калуга, ул. Степана Разина, 26)

Аннотация. *Цель* – определить морфометрические характеристики водосборов малых рек города Калуги на базе цифровой модели рельефа FABDEM в QGIS.

Материалы и методы. Топографической основой для оценки морфометрических характеристик изучаемых рек выступила FABDEM. Их определение выполнено с использованием таких алгоритмов QGIS, как гидрологическое моделирование и морфометрический анализ.

Результаты и обсуждение. В статье изучена структура гидрографической сети и геометрия водосборов, параметры которых описываются основными морфометрическими характеристиками водотоков (длина, уклон) и водосборов (площадь, высота и уклон склонов). Определены дополнительные морфометрические характеристики (извилистость, густота речной сети, средняя ширина водосбора и координаты его центра), построены продольные профили рек. Выполнено сравнение относительно стабильных характеристик (площадь, средняя высота, средний уклон), установленных по данным литературных источников с измеренными по цифровой модели рельефа FABDEM. Установлено, что величины расхождения их определения по цифровой модели рельефа в основном превышают 2 %.

Выводы. Достоинством использования описанного способа является автоматизированный расчёт морфометрических характеристик. Недостаток связан с недостаточной точностью полученных результатов вследствие несоответствия по пространственному разрешению и по высоте. Однако, данный способ можно использовать для оперативного получения оценочной информации о морфометрических характеристиках исследуемых водосборов и для общего представления о рельефе местности.

Ключевые слова: малые реки, водосборы, морфометрические характеристики, цифровая модель рельефа FABDEM, инструменты анализа QGIS.

Для цитирования: Захарова М. В. Морфометрический анализ водосборов малых рек города Калуги на базе цифровой модели рельефа // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология,* 2026, № 2, с. 84-92. DOI: https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/2/84-92

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования определяется необходимостью обновления морфометрических характеристик водотоков и их водосборов, поскольку с течением времени поверхность речных водосборов претерпевает изменения под воздействием водно-эрозионных и русловых процессов особенно в условиях урбанизированной среды. В связи с этим изменяются значения морфометрических характеристик водотоков и их водосборов, полученных ранее по топографическим и другим тематическим картам.

Хорошо известно, что многие гидрологические исследования и расчёты производятся с учётом основных гидрографических особенностей водотоков и их водосборных бассейнов. Эти особенности отражают многочисленные морфометрические и морфологические характеристики водотоков, водоёмов и их водосборов, определение которых входит в задачи гидрологической картометрии.

Например, при выполнении инженерно-гидрологических расчётов (для определения характеристик стока расчётной обеспеченности особенно неизученных в гидрологическом отношении водосборов, оценки режима стока рек и объёмов воды в озерах и водохранилищах) и решении многих водохозяйственных задач (для мониторинга водных объектов за состоянием дна, берегов, определения водоохранных зон, зон затопления, оценки современного состояния гидрографической сети с учётом её антропогенных изменений и др.) необходимо иметь сведения о морфометрических и морфологических особенностях водных объектов суши.

Определить морфометрические характеристики можно или по результатам непосредственных полевых измерений, или картометрическим способом. При этом, основным является картометрический способ, который базируется на использовании традиционных «бумажных» топографических карт и планов местности, и является достаточно трудоёмким, если выполняется «вручную».

© Захарова М. В., 2026
✉ Захарова Марина Владимировна, e-mail: ZakharovaMV@tksu.ru
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Естественно, что с развитием цифровых технологий, появлением инструментов географических информационных систем и цифровых наборов картографических данных, становится возможным упростить процесс, во многом автоматизировав его, что обосновывает привлекательность данного способа расчёта морфометрических характеристик. Однако, точность получаемых характеристик и распространённость данного способа будет определяться точностью и доступностью используемой цифровой картографической модели рельефа.

В СТО ГГИ 52.08.48-2020[1] указано, что ошибка определения морфометрических характеристик на базе наиболее популярных свободно распространяемых наборов геоданных цифровых моделей поверхности/цифровых моделей рельефа (GTOPO30, SRTM, MERIT DEM, ASTER GDEM, ALOS AW3D) составляет порядка 2 %, что не соответствует принятой в России точности картометрических работ.

В России имеется и развивается федеральный фонд пространственных данных, содержащий пространственные метаданные и материалы, полученные в результате выполнения геодезических и картографических работ, а также Единая электронная картографическая основа (ЕЭКО), включающая цифровые карты различных масштабов в государственных и местных системах координат, объединённых в базу данных, обладающих требуемой точностью, однако за использование данных материалов взимается плата[2], что ограничивает их использование, особенно физическими лицами.

Поэтому использование свободных и бесплатных глобальных цифровых моделей рельефа остаётся по-прежнему востребованным в практической деятельности и научных исследованиях, в том числе для определения, обновления или уточнения морфометрических характеристик. Одной из последних подобных моделей рельефа стала модель FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM), имеющая 30 м пространственное разрешение, в которой удалены артефакты в виде искусственных сооружений и растительности. По заявлению авторов [13] использование метода машинного обучения позволило снизать среднюю абсолютную вертикальную погрешность в населённых пунктах с 1,61 м до 1,12 м, а в лесных массивах – с 5,15 м до 2,88 м.

Таким образом, актуальность подобных исследований обосновывается, с одной стороны, повышением требований к составу и точности определения основных морфометрических характеристик водотоков и их водосборов в связи с изменением данных характеристик под воздействием различных природных и антропогенных факторов особенно в условиях городской среды, с другой –постепенным усовершенствованием технических характеристик цифровых моделей рельефа и бурным развитием ГИС-технологий.

Цель настоящего исследования состоит в определении морфометрических характеристик водосборов малых рек, устья которых расположены на территории муниципального образования «город Калуга» с использованием глобальной цифровой модели поверхности FABDEM.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Город Калуга расположен на возвышенных берегах рек Оки, Яченки, Киёвки, Терепца, Калужки. Особенный интерес вызывает определение морфометрических характеристик малых рек – притоков р. Оки, к которым относятся Яченка (и её приток р. Терепец), Киёвка и Калужка, устья которых расположены в городской черте, водосборы подвергаются интенсивным водохозяйственным преобразованиям в связи с урбанизацией, вызывающей изменения различных элементов гидрографической сети. Так, например, в Калуге, в 1979 г. в 100 м выше устья р. Яченки были построены гидротехнические сооружения, с помощью которых образовано Яченское водохранилище. Кроме того, особенности овражно-эрозионного рельефа города активно используются в настоящее время для развития городской водоотводящей системы, сброс поверхностных вод с которой осуществляется в перечисленные выше водотоки и водоёмы. Схематическое изображение местоположения водосборов исследуемых рек показано на рисунке 1.

В соответствии с рекомендациями Р 52.08.874-2018[3] для решения разнообразных гидрологических задач можно определять следующий полный перечень морфометрических характеристик (табл. 1).

Следует отметить, что с точки зрения относительной стабильности перечисленные выше морфометрические характеристики подразделяются на две основные группы: стабильные и динамичные. К относительно стабильным морфометрическим характеристикам относятся: площадь водосбора, средняя высота водосбора, средний уклон склонов водосбора, площадь бессточных впадин. Все остальные характеристики считаются динамичными.

Общий подход к моделированию поверхности водосборов и гидрографической сети исследуемых рек на базе QGIS сводится к последовательному выполнению ряда операций: гидрологической коррекции цифровой модели рельефа (Fill Depressions); расчёту направлений стока (D8 Pointer); расчёту водосборной площади (D8 Flow Accum); определению границ водосборов (Watershed); созданию модели водотоков на основе водосборной площади (Extract Streams, Stream Link Identifier, Strahler Stream Order, Rasters streams to vector); создание покрытия частных водосборов (Subbasins) [5, 12].

[1] *Выбор цифровой картографической основы для определения гидрографических характеристик: Стандарт организации СТО ГГИ 52.08.48-2020 / ФГБУ «ГГИ»*. Санкт-Петербург: ООО «Победа», 2020. 79 с.

[2] *Центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных*. – URL: https://cgkipd.ru/ (дата обращения: 31.07.2025). – Текст: электронный.

[3] *Определение гидрографических характеристик картографическим способом: Рекомендации Р 52.08.874-2018 / ФГБУ «ГГИ»*. Санкт-Петербург: ООО «Победа», 2018. 172 с.

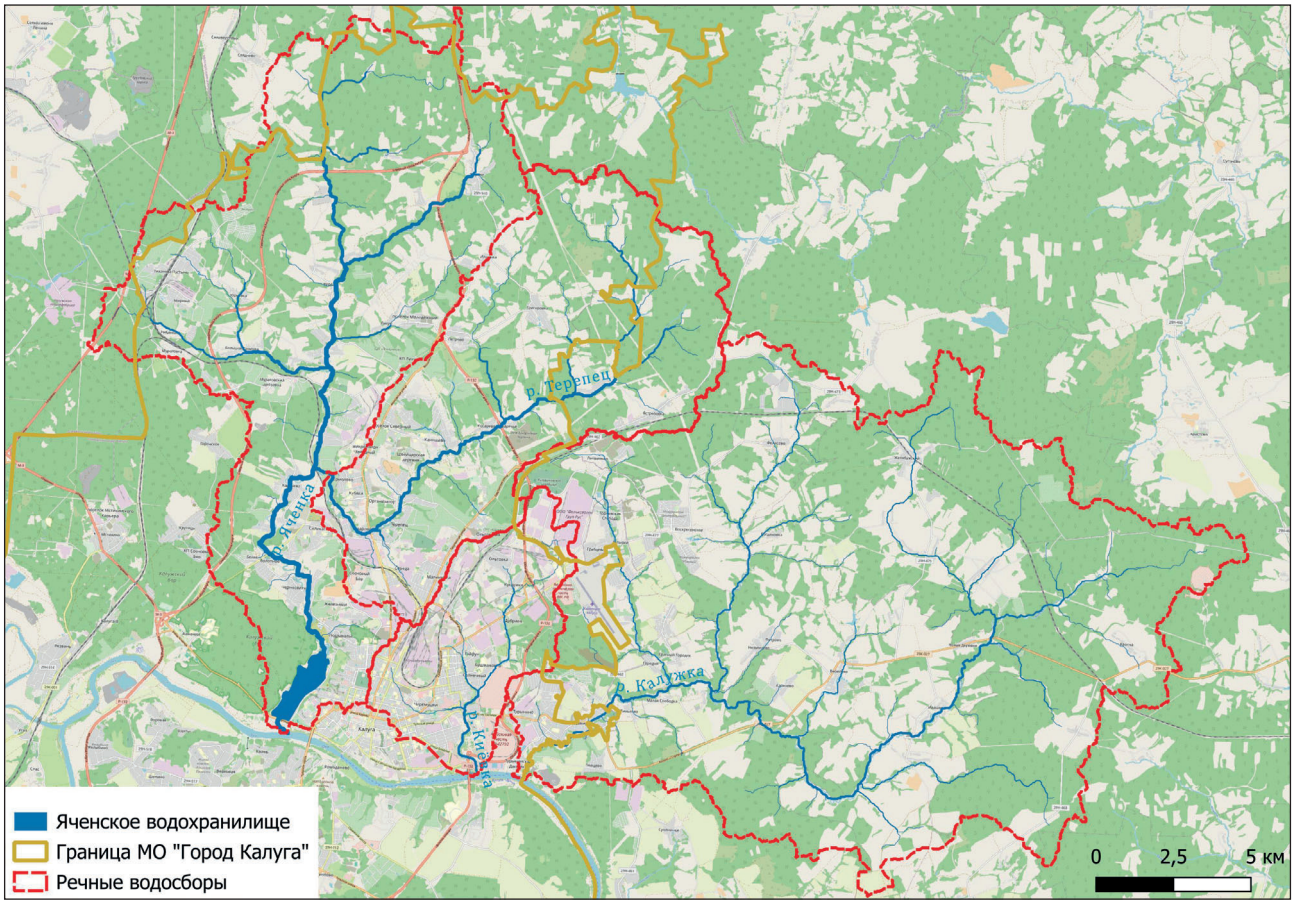

Рис. 1. Схематическое изображение водосборов
[*Fig. 1.* Schematic representation of watersheds]

Таблица 1

Обобщённый перечень определяемых морфометрических характеристик
[*Table 1.* Generalized list of defined morphometric characteristics]

№	Морфометрические характеристики / Morphometric characteristics	
	водотоков / watercourses	водосборов / watersheds
1	гидрографическая длина L	площадь водосбора F
2	средневзвешенный уклон $I_р$	средняя высота $\overline{H}$
3	извилистость $K_{изв}$	координаты центра (φ, λ)
4	продольный профиль	средняя ширина водосбора $\overline{B}$
5	поперечные профили	площадь бессточных областей $f_{бес}$
6	длина участков канализированных рек	Для водосборов малых и средних рек (площадью менее 200 км^2) и временных водотоков дополнительно определяют: - средний уклон склонов водосбора $\overline{I}_{скл}$ - густота речной сети ρ - тип ручейковой сети

Непосредственно морфометрический анализ выполняется как с помощью стандартных возможностей QGIS, так и с помощью специализированных, таких как модуль «Geomorphometry», а также с привлечением средств стандартных пакетов обработки данных по известным формулам, приведённым в гидрологической литературе [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки точности и сравнения морфометрических характеристик, полученных традиционным картометрическим способом по топографической карте и измеренных по цифровой модели рельефа с помощью инструментов анализа QGIS был выполнен предварительный сбор информации об имеющихся морфометрических характеристиках. Необходимо отметить, что для нахождения данных о морфометрических характеристиках исследуемых рек и их водосборов пришлось комбинировать информацию из разных специализированных изданий. Как известно, одним из наиболее полных и старинных источников информации о водных ресурсах суши, являются материалы Государственного

водного кадастра, издаваемые сначала в виде монографии «Ресурсы поверхностных вод СССР» и её серий «Гидрологическая изученность», «Основные гидрологические характеристики», потом как «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод» [8], но сведений об изучаемых реках, кроме реки Яченки, в них не имеется. В Государственном водном реестре[4] приводятся данные лишь о водосборной площади и длине изучаемых водотоков, полностью отсутствуют сведения о реке Киёвке. Некоторая неполная информация о морфометрических характеристиках содержится в Атласе малых рек Калужской области [1]. Отрывочная информация о морфометрических характеристиках малых водотоков, протекающих в г. Калуге и его окрестностях приводится также в материалах [9]. Ещё одним неофициальным источником данных о морфометрических характеристиках послужили технические отчёты по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий разнообразных проектных организаций. Вся имеющаяся информация о морфометрических характеристиках, сведённая воедино, представлена в таблице 2.

Таким образом, из материалов таблицы 2 можно сделать вывод о крайне обрывочной информации о морфометрических характеристиках малых рек, протекающих по территории муниципального образования «город Калуга», что свидетельствует об их слабой изученности и определяет необходимость их определения, выполненное, как упоминалось выше, на базе цифровой модели рельефа FABDEM с помощью инструментов морфометрического анализа геоинформационной системы QGIS.

Особенности применение разных модулей и инструментов геоинформационных систем для выполнения гидрологического моделирования и морфометрического анализа хорошо изучены и достаточно подробно показаны в ряде научных работ [2, 4-7, 10, 11].

В таблице 3 представлены расчётные морфометрические характеристики изучаемых рек и их водосборов, определённые с помощью цифровой модели рельефа.

Использование тайлов цифровой модели рельефа FABDEM после выполнения процедур кадрирования и перепроецирования позволило выполнить гидрологическое моделирование и сформировать гидрографическую сеть, выделив порядки по системе Стралера (модификация системы Хортона), а также определить границы изучаемых водосборов. Исходное пространственное разрешение используемой цифровой модели местности позволяет выделить 4 порядка речной сети у водосборов рек Яченка и Калужка, и 3 порядка – у водосборов рек Терепец и Киёвка (см. рис. 1), измерить гидрографическую длину изучаемых рек и рассчитать площадь их водосборов (см. табл. 3).

Согласно результатам, представленным на рисунке 2, и данным зональной статистики в пределах выделенных водосборов абсолютные высоты поверхности колеблются от 115 до 253 м, при этом в пределах водосбора р. Яченки – от 117 до 253 м, в пределах водосбора р. Терепец – от 141 до 253 м, в пределах водосбора р. Киёвки – от 115 до 242 м, в пределах водосбора р. Калужки – от 115 до 247 м. Средние высоты водосборов изучаемых рек представлены в таблице 3.

На рисунке 3 показано распределение уклонов склонов по поверхности исследуемых речных водосборов, среднее значение уклонов склонов изменяется от 1,87 до 2,37° (см. табл. 3). Следует отметить, что водосборы рек Яченки и Калужки и Терепца характеризуются наибольшими величинами колебаний уклонов склонов и изменяются в диапазоне от 0 до 20°. При этом площадь распространения наибольших уклонов склонов (9-20°) составляет 2,98 км^2 (или 1,25% от площади водосбора) на водосборе реки Яченки, 1,85 км^2

Таблица 2

Морфометрические характеристики исследуемых рек и их водосборов
[*Table 2.* Morphometric characteristics of the studied rivers and their watersheds]

№	Река / River	L, км	$I_р$, °	$K_{изв}$	$\bar{H}$, м	F, км^2	$\bar{I}_{скл}$, °	ρ, км/км^2
1	Яченка	31	0,10	–	180	238	2,63	0,37
2	Терепец	22	–	1,09	–	90,8	–	1,14-1,20
3	Киёвка	6	–	1,10	–	28,3	–	–
4	Калужка	31	–	–	–	252	–	–

Таблица 3

Расчётные морфометрические характеристики исследуемых рек и их водосборов
[*Table 3.* Calculated morphometric characteristics of the studied rivers and their watersheds]

№	Река / River	L, км	$I_р$, °	$K_{изв}$	F, км^2	$\bar{H}$, м	$\bar{B}$, км	$\bar{I}_{скл}$, °	ρ, км/км^2
1	Яченка	33	0,16	1,22	240	204	8,89	2,37	0,65
2	Терепец	23	0,21	1,21	94,9	209	4,99	2,37	0,68
3	Киёвка	11	0,46	1,10	32,4	191	3,24	1,87	0,65
4	Калужка	36	0,17	1,24	257	206	8,86	1,87	0,68

[4] *Росводресурсы*. – URL: https://gis.favr.ru/opendata (дата обращения: 31.07.2025). – Текст: электронный.

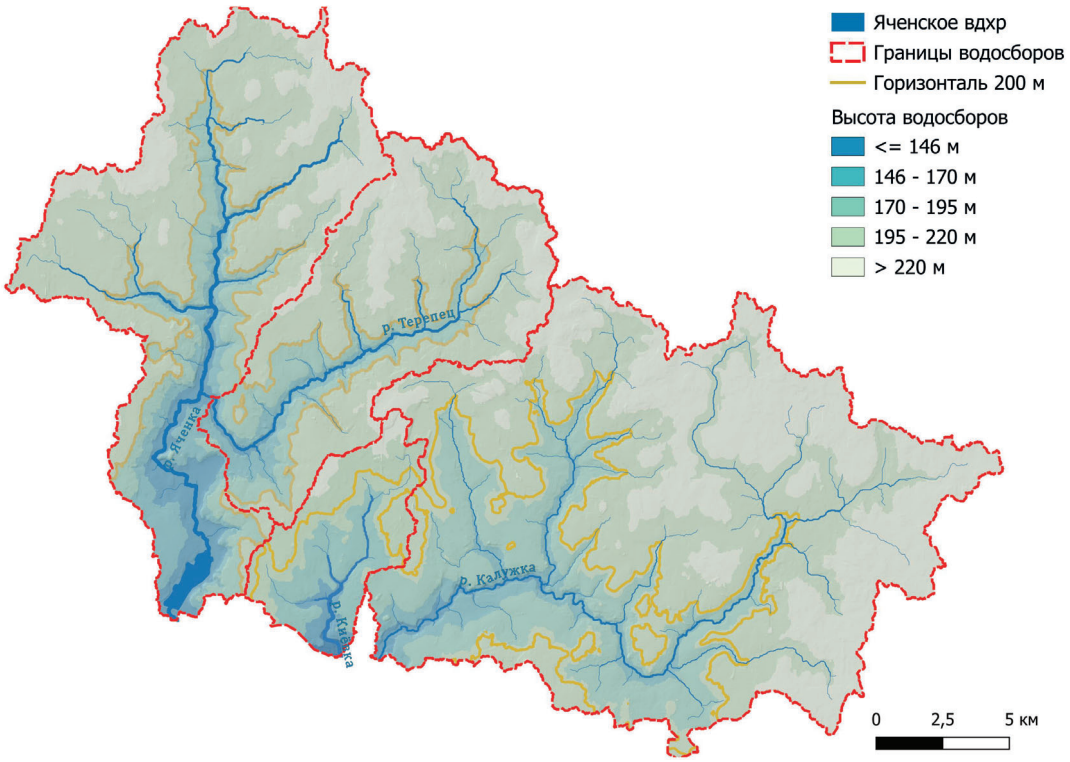

Рис. 2. Распределение высот по поверхности речных водосборов
[Fig. 2. Distribution of heights over the surface of river watersheds]

(или 0,7 % от площади водосбора) на водосборе реки Калужки соответственно. Площадь наибольших уклонов склонов на водосборе реки Терепец равна 0,83 км^2 (0,9 % от площади водосбора). На водосборе реки Кивки значения уклонов склонов изменяются в пределах от 0 до 16°, наибольшие уклоны, значения которых колеблются в диапазоне 8-16° и занимают 0,19 км^2, что составляет 0,6 % от площади водосбора.

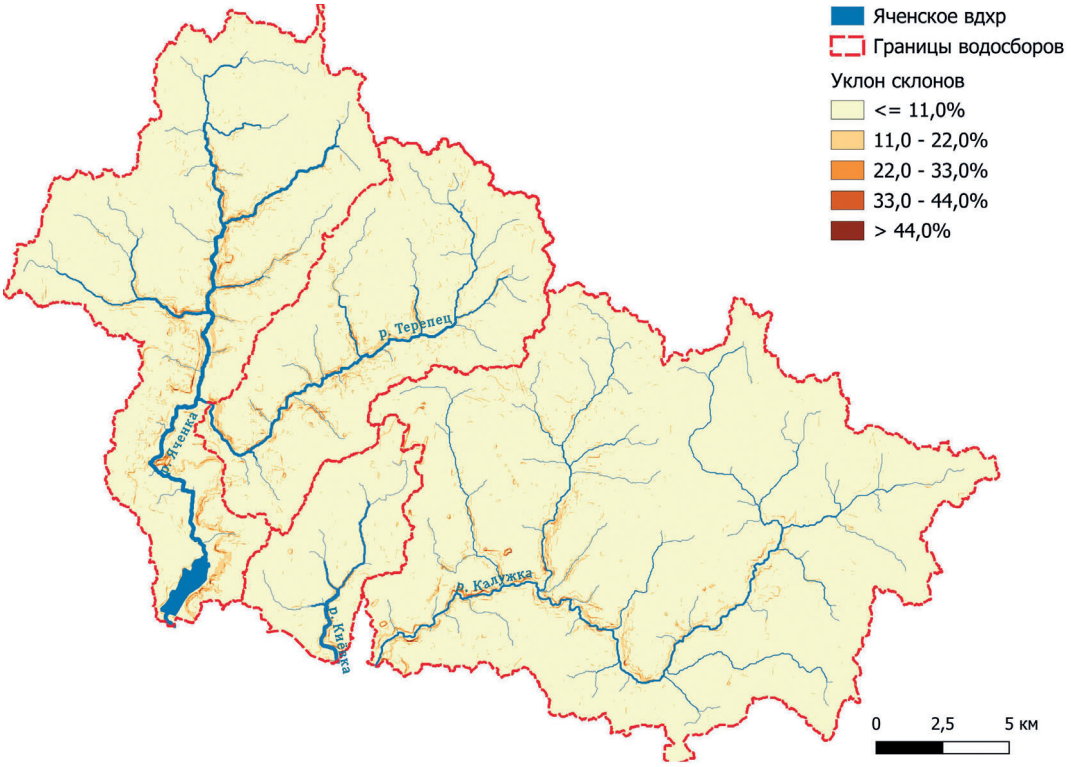

Рис. 3. Распределение уклонов склонов по поверхности речных водосборов
[*Fig. 3.* Distribution of slope slopes over the surface of river watersheds]

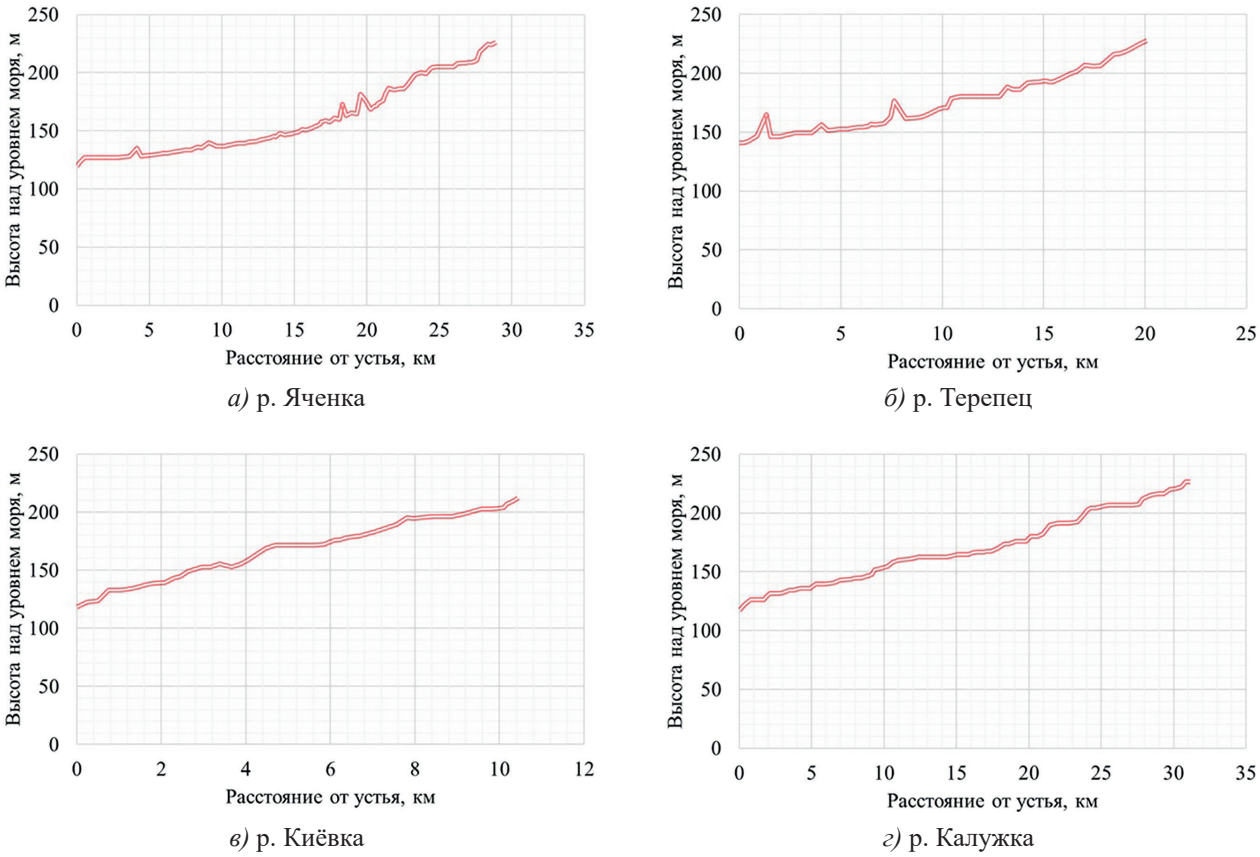

Рис. 4. Продольный профиль реки
[*Fig. 4.* Longitudinal profile of the river]

Используя возможности, предоставляемые геоинформационной системой QGIS, получилось установить ещё одну очень важную расчётную характеристику водотоков, такую как, средневзвешенный уклон реки, значения которого изменяются от 0,16 до 0,46° (см. табл. 3), а также построить графики продольных профилей рек (рис. 4).

Координаты центра тяжести водосборов изучаемых рек определялись приближённым способом, для этого их формы типизировались в виде треугольника у р. Яченка, круга у р. Калужка, прямоугольника у рек Терепец и Киёвка. Получены следующие координаты центров тяжести водосбора реки Яченки – широта $\varphi = 54{,}63662°$ с.ш.; долгота $\lambda = 36{,}2712°$ в.д.; реки Терепец – широта $\varphi = 54{,}6053°$ с.ш.; долгота $\lambda = 36{,}3283°$ в.д.; р. Киёвки – широта $\varphi = 54{,}5402°$ с.ш.; долгота $\lambda = 36{,}3181°$ в.д.; р. Калужки – широта $\varphi = 54{,}5521°$ с.ш.; долгота $\lambda = 36{,}5024°$ в.д.

Помимо собственно установления морфометрических характеристик, большой интерес вызывает точность их определения. Однако, поскольку надёжных способов оценки точности морфометрических характеристик пока не существует, можно использовать способ сравнения с теми данными (см. табл. 2), которые относятся к относительно стабильным и измерены непосредственно по топографическим картам.

Результаты такого сравнения показывают, что расхождения в определении средней высоты водосбора и уклона водосбора р. Яченки составляет 13 % и 10 % соответственно. В определении площади водосбора для рек Яченки и Калужки цифровая модель рельефа FABDEM показала неплохую точность по сравнению с топографической картой, величина расхождения оказалась на уровне 2 %. Однако, величина расхождения в определении площади увеличивается с уменьшением площади исследуемого водосбора и доходит до 14 % для реки Киёвки. Если попытаться провести сравнение гидрографической длины водотока, то окажется, что полученные расхождения варьируют от 6 % (р. Яченка) до 83 % (р. Киёвка). Однако, неизвестно в какой степени полученные расхождения определяются именно точностью цифровой модели рельефа, а не изменением данного параметра в связи с хозяйственными преобразованиями водосбора. Стоит подчеркнуть, что результаты, полученные с помощью цифровой модели рельефа, зачастую оказываются завышенными по сравнению с определёнными традиционным картометрическим способом. Также, можно считать, что полученные результаты свидетельствуют о более низкой точности используемой цифровой модели рельефа для определения морфометрических характеристик по сравнению с топографической картой.

Известно, что пространственное разрешение и погрешность определения высот являются одним из главных параметров, которые определяет точность цифровой модели рельефа напрямую и все определения по ней – косвенно. Можно предположить, что слишком

большой размер пикселя цифровой топографической основы (растра) и недостаточная точность в определении высот стали причиной потери наиболее мелких элементов речной системы, что оказало влияние на точность расчёта всех морфометрических характеристик. Очевидно, что в данном исследовании наиболее существенно данный недостаток проявился при формировании гидрографической сети самого малого из исследуемых водосборов – р. Киёвка. Данное обстоятельство повлияло на точность установление длины, площади водосбора данной реки, а также его густоты речной сети.

В заключении необходимо отметить, что при отсутствии актуальных топографических карт или свежих данных геодезических съёмок цифровые модели рельефа являются единственно возможным оперативным вариантом для получения оценочной информации о морфометрических характеристика водосборов неизученных рек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были установлены морфометрические характеристики водосборов малых рек города Калуги на базе цифровой модели рельефа FABDEM и QGIS, а также выполнено их сравнение с параметрами, найденными в литературных источниках, которые рассчитаны традиционным картометрическим способом по топографической карте.

Можно отметить некоторые преимущества и недостатки, описываемого способа определения морфометрических характеристик: 1) несомненным достоинством использования цифровых моделей рельефа и алгоритмов геопространственного анализа QGIS является точное автоматизированное выделение границ водосборов, определение их площади и уклонов, длины реки и её притоков, которое значительно ускоряет обработку больших объёмов данных, повышает объективность результата вследствие минимизации человеческого фактора; 2) однако, точность определения морфометрических характеристик, полученных данным способом, всё ещё остаётся недостаточной, что определяет основной его недостаток. Так, фиксируются погрешности свыше 2 % в определении относительно стабильных морфометрических характеристик (площадь, высота и уклон водосбора) особенно для мельчайших водосборов, что свидетельствует о недостаточной точности используемой цифровой модели рельефа по пространственному разрешению и по высоте, по сравнению с топографической картой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атлас малых рек Калужской области. Том 2. Окский бассейновый округ* / И. В. Маньшина, Ю. Ф. Косаковский, В. Е. Иванова и др. Калуга: Издательство ООО фирма «Экоаналитика», 2022. 450 с.

2. Безгодова О. В. Морфометрический анализ бассейнов малых рек горно-Котловинной части бассейна реки Иркут // *Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*, 2024, т. 10 (76), № 1, с. 99-114.

3. Догановский А. М. *Гидрология суши (общий курс): учебник*. Санкт-Петербург: РГГМУ, 2012. 523 с.

4. Захарова М. В. Гидрологическое моделирование водосборной площади реки Яченки на основе цифровой модели поверхности в среде QGIS // *Использование и охрана природных ресурсов в России*, 2024, № 4 (180), с. 62-66.

5. Кошель С. М. Современные методы расчета распределения поверхностного стока по цифровым моделям рельефа // *Геоморфологи: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. Выпуск 6*, 2016. с. 24-34.

6. Максимович К. Ю. Морфометрический анализ местности на основе ГИС для задач экологического мониторинга // *Journal of Agriculture and Environment*, 2022, № 1 (21), с. 1-8.

7. Мальцев К. А. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов // *Геоморфология*, 2014, № 1, с. 45-53.

8. *Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги* / под ред. Георгиевского В. Ю. Ливны: Издатель Мухаметов Г. В., 2015. 129 с.

9. Столярский А. В. Формирование поверхностного стока Яченского водохранилища // *Состояние, использование и охрана водных ресурсов: сборник материалов*. Калуга: Издательство ООО фирма «Экоаналитика», 2016. с. 17-19.

10. Табунщик В. А. Морфометрические характеристики бассейнов рек северо-западного склона Крымских гор (на примере бассейнов рек Западный Булганак, Альма, Кача, Бельбек, Чёрная) // *Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*, 2021, т. 7 (73), № 3, с. 267-278.

11. Чупикова С. А. Морфометрические особенности структуры речных бассейнов Ойна-Харальского рудного узла (Тува) // *Геосферные исследования*, 2020, № 2, с. 90-100.

12. Энтин А. Л. Согласование цифровых моделей рельефа и гидрографической сети для определения границ бассейнов // *Геодезия и картография*, 2019, т. 80, № 1, с. 94-101.

13. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed / Hawker L., Uhe P., Paulo L., et al. // *Environmental Research Letters*, 2022, vol. 17, no 2, 024016.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 05.08.2025
Принята к публикации: 20.05.2026

UDC 528.7 *ISSN 1609-0683*
DOI: https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/2/84-92

Morphometric Analysis of Small River Catchments in the City of Kaluga Based on a Digital Cartographic Framework

M.V. Zakharova✉

Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovski, Russian Federation
(26, Stepan Razin Str.., Kaluga, 248023)

Abstract. *The purpose* is to determine the morphometric characteristics of the watersheds of small rivers in Kaluga based on the digital elevation model FABDEM in QGIS.

Materials and methods. Topographic basis for the assessment of the morphometric characteristics of the studied rivers was FABDEM. Their determination was performed using such QGIS algorithms as hydrological modeling and morphometric analysis.

Results and discussion. Structure of the hydrographic network and geometry of watersheds, the parameters of which are described by the main morphometric characteristics of watercourses (length, river slope) and watersheds (area, height and slope of slopes) were studied in this article. Additional morphometric characteristics (meandering, density of the river network, average width of the watersheds area and coordinates of its center) are determined, and longitudinal profiles of the rivers are constructed. Relatively stable characteristics (area, average height, average slope), established according to literary sources with those measured using the FABDEM digital elevation model, has been compared. It has been found that the differences in their definition based on the digital elevation model generally exceed 2%.

Conclusion. Advantage of using the described method is the automated calculation of morphometric characteristics. Disadvantage is related to the insufficient accuracy of the results obtained due to the mismatch in spatial resolution and height. However, this method can be used to quickly obtain estimated information about the morphometric characteristics of the studied watersheds and for a general representation of the relief.

Key words: small rivers, watersheds, morphometric characteristics, FABDEM digital elevation model, analysis tools QGIS.

For citation: Zakharova M.V. Morphometric Analysis of Small River Catchments in the City of Kaluga Based on a Digital Cartographic Framework. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2026, no. 2, pp. 84-92. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/2/84-92

REFERENCES

1. *Atlas malykh rek Kaluzhskoy oblasti. Tom 2. Okskiy basseynovyy okrug* [Atlas of small rivers of the Kaluga region. Volume 2. Oka Basin District] / I.V. Man'shina, Yu.F. Kosakovskiy, V.E. Ivanova i dr. Kaluga: Izdatel'stvo OOO firma «Ekoanalitika», 2022. 450 p. (In Russ.)

2. Bezgodova O.V. Morfometricheskiy analiz basseynov malykh rek gorno-Kotlovinnoy chasti basseyna reki Irkut [Morphometric analysis of small rivers basins of the mountain and depression part of the Irkut river basin]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 2024, vol. 10 (76), no. 1, pp. 99-114. (In Russ.)

3. Doganovskiy A.M. *Gidrologiya sushi (obshchiy kurs): uchebnik* [Hydrology (general course): textbook]. Saint-Petersburg: RGGMU, 2012. 523 p. (In Russ.)

4. Zakharova M.V. Gidrologicheskoe modelirovanie vodosbornoy ploshchadi reki Yachenki na osnove tsifrovoy modeli poverkhnosti v srede QGIS [Hydrological modeling of the catchment area of the Yachenka River based on a digital surface model in QGIS]. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii*, 2024, no. 4 (180), pp. 62-66. (In Russ.)

5. Koshel' S.M. Sovremennye metody rascheta raspredeleniya poverkhnostnogo stoka po tsifrovym modelyam rel'efa [Contemporary methods for calculating surface water distribution from digital elevation models]. *Geomorfologi: Sovremennye metody i tekhnologii tsifrovogo modelirovaniya rel'efa v naukakh o Zemle. Vol. 6*, 2016. pp. 24-34. (In Russ.)

6. Maksimovich K.Yu. Morfometricheskiy analiz mestnosti na osnove GIS dlya zadach ekologicheskogo monitoringa [GIS-based terrain morphometric analysis for environmental monitoring tasks]. *Journal of Agriculture and Environment*, 2022, no. 1 (21), pp. 1-8. (In Russ.)

7. Mal'tsev K.A. Ispol'zovanie tsifrovykh modeley rel'efa dlya avtomatizirovannogo postroeniya granits vodosborov [Using DEMs for automatic plotting of catchments]. *Geomorfologiya*, 2014, no. 1, pp. 45-53. (In Russ.)

8. *Nauchno-prikladnoy spravochnik: Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki rek basseyna Verkhney Volgi* [Scientific and applied reference book: The main hydrological characteristics of the rivers of the Upper Volga basin] / pod red. Georgievskogo V.Yu. Livny: Izdatel' Mukhametov G.V., 2015. 129 p. (In Russ.)

9. Stolyarskiy A.V. Formirovanie poverkhnostnogo stoka Yachenskogo vodokhranilishcha [Formation of the surface runoff of the Yachenskoe reservoir]. *Sostoyanie, ispol'zovanie i okhrana vodnykh resursov: sbornik materialov.* Kaluga: Izdatel'stvo OOO firma «Ekoanalitika», 2016. pp. 17-19. (In Russ.)

10. Tabunshchik V.A. Morfometricheskie kharakteristiki basseynov rek severo-zapadnogo sklona Krymskikh gor (na primere basseynov rek Zapadnyy Bulganak, Al'ma, Kacha, Bel'bek, Chernaya) [Morphometric characteristics of river basins of the

© Zakharova M.V., 2026
✉ Marina V. Zakharova, e-mail: ZakharovaMV@tksu.ru
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

north Western slope of the Crimean Mountains (Zapadnyy Bulganak, Alma, Kacha, Belbek, Chernaya river basins)]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 2021, vol. 7 (73), no. 3, pp. 267-278. (In Russ.)

11. Chupikova S.A. Morfometricheskie osobennosti struktury rechnykh basseynov Oyna-Kharal'skogo rudnogo uzla (Tuva) [Morphometric features of the structure of river basins Oina-Kharal ore node (Tuva)]. *Geosfernye issledovaniya*, 2020, no. 2, pp. 90-100. (In Russ.)

12. Entin A.L. Soglasovanie tsifrovykh modeley rel'efa i gidrograficheskoy seti dlya opredeleniya granits basseynov [The harmonization of digital elevation models and hydrographic network for basin delineation]. *Geodeziya i kartografiya*, 2019, vol. 80, no. 1, pp. 94-101. (In Russ.)

13. Hawker L., Uhe P., Paulo L., et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 2022, vol. 17, no. 2, 024016.

Conflict of interests: The author declares no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 05.08.2025
Accepted: 20.05.2026

Захарова Марина Владимировна
Кандидат географических наук, заведующий кафедрой геопространственных систем и комплексной безопасности института естествознания Калужского государственного университета им. К.Э. Циолковского, г. Калуга, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-4946-811X, e-mail: ZakharovaMV@tksu.ru

Marina V. Zakharova
Cand. Sci. (Geogr.), Head of the Department of Geospatial Systems and Integrated Safety, Institute of Natural Sciences, Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovski, Kaluga, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-4946-811X, e-mail: ZakharovaMV@tksu.ru