

УДК 504.453 (470.325)
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-573-590
EDN HCOTUD

Геоморфологические факторы расположения истоков рек Белгородской области

Украинский П.А., Нарожняя А.Г., Хомутовская А.Г.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
pa.ukrainski@gmail.com, narozhnyaya_a@bsuedu.ru, khomutovskaya@gmail.com

Аннотация. Почти все реки Белгородской области начинаются на ее территории. Но география истоков рек, несмотря на их многочисленность, остается недостаточно исследованной. На распределение истоков рек по территории Белгородской области влияет рельеф, климатические и гидрогеологические особенности территории. Это исследование посвящено одному из этих факторов – рельефу. Цель работы – оценка согласованности геоморфометрических параметров с расположением истоков рек на исследуемой территории. Анализируемая выборка представляет собой истоки рек и случайным образом сгенерированные точки их отсутствия. По цифровой модели рельефа *FABDEM* были рассчитаны 22 геоморфометрических параметров. Затем были рассчитаны коэффициенты бисериальной корреляции между геоморфометрическими параметрами и наличием истоков рек. Среди полученных коэффициентов корреляции максимальное абсолютное значение равно 0,7. У 10 из 19 параметров абсолютное значение коэффициента корреляции лежит в диапазоне от 0,3 до 0,5. С наличием истоков рек сильнее всего коррелируют геоморфометрические параметры, описывающие форму поверхности (выпуклая или вогнутая), положение на склоне и расчлененность рельефа. Такие параметры рельефа как высота, уклон и экспозиция на наличие истоков реки влияют слабо. Наличие истоков рек всегда отрицательно коррелирует с положением на склоне. С индексами формы поверхности корреляция у истоков рек чаще отрицательная, а с показателями пересеченности рельефа – чаще положительная. Полученные результаты могут быть востребованы при выборе предикторов для построения моделей расположения истоков рек.

Ключевые слова: водотоки, рельеф, *FABDEM*, геоморфометрические параметры, корреляционный анализ, бинарные данные, бисериальная корреляция

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания FZWG-2025-0006.

Для цитирования: Украинский П.А., Нарожняя А.Г., Хомутовская А.Г. 2026. Геоморфометрические факторы размещения истоков рек Белгородской области. Региональные геосистемы, 50(3): 573–590. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-573-590 EDN: HCOTUD

Geomorphologic Factors of the Location of River Sources in the Belgorod Region

Pavel A. Ukrainskiy, Anastasia G. Narozhnyaya, Anna G. Khomutovskaya

Belgorod State National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

E-mail: pa.ukrainski@gmail.com, narozhnyaya_a@bsuedu.ru, khomutovskaya@gmail.com

Abstract. Almost all of the rivers in the Belgorod Region originate within its territory. However, despite their abundance, the geography of these river sources remains understudied. The distribution of river

© Украинский П.А., Нарожняя А.Г., Хомутовская А.Г., 2026

sources across the region is influenced by topography, climatic conditions, and hydrogeological features. This study focuses on one of these factors – topography. The aim of the work is to quantify how geomorphometric parameters are related to the location of river sources. The analyzed sample consists of river sources and randomly generated points of absence. Twenty-two geomorphometric parameters were calculated using the *FABDEM* digital elevation model. Biserial correlation coefficients were then calculated between the geomorphometric parameters and the presence of river sources. Among the obtained correlation coefficients, the highest absolute value is 0.7. For 10 of the 19 parameters, the absolute value of the correlation coefficient lies in the range from 0.3 to 0.5. The strongest correlations with the presence of river sources are geomorphometric parameters describing surface shape (convex or concave), position on a slope, and relief ruggedness. Relief parameters such as elevation, slope, and aspect have a weak influence on the presence of river sources. The presence of river sources is always negatively correlated with position on a slope. The correlation with surface convexity is often negative, while that with ruggedness is often positive. The obtained results can be used in selecting predictors for constructing river source location models.

Keywords: watercourses, relief, *FABDEM*, geomorphometric parameters, correlation analysis, binary data, biserial correlation

Acknowledgements: This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Assignment No. FZWG-2025-0006.

For citation: Ukrainskiy P.A., Narozhnyaya A.G., Khomutovskaya A.G. 2026. Geomorphometric Factors of the Location of River Sources in the Belgorod Region. *Regional Geosystems*, 50(3): 573–590 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-573-590 EDN: HCOTUD

Введение

Примечательной способностью Белгородской области является то, что почти все реки начинаются в ее границах. Исключение составляют р. Оскол, р. Убля и одиннадцать малых рек [Лисецкий и др., 2015]. Такая особенность обусловлена рельефом области, а именно ее положением на Среднерусской возвышенности.

Для территории Белгородской области существует ряд работ, посвященных изучению густоты речной сети [Дмитриева, Фолимонова, 2016; Нарожная, 2023; Украинский, Нарожная, 2025] и ее изменению в историческом прошлом [Чендев, Гончаров, 2000; Белеванцев, 2013; Кузьменко и др., 2013; Петин и др., 2015; Шевченко, 2019]. Во всех этих работах объектом исследования выступают водотоки – русла рек и ручьев. А вот истоки рек как отдельный объект исследования для Белгородской области до сих пор не рассматривались. Они частично попадали в поле зрения исследователей в контексте состояния родников. Но в таких работах уделялось внимание преимущественно качеству воды в родниках, их дебиту, эстетической привлекательности и рекреационному использованию [Петин, Новых, 2009; Новых и др., 2022; Раевская, 2023]. А вот закономерности размещения истоков рек и связь их с ландшафтными факторами не изучались.

На положение истоков рек влияет совокупность разнородных факторов. Прежде всего, это рельеф местности, характеристики климата, геологические и гидрогеологические характеристики территории. Влияние этих факторов имеет сложный и комплексный характер, а потому каждый из них заслуживает отдельного и пристального изучения. Начинать такое изучение следует с рельефа, так как именно по этому фактору благодаря современным цифровым моделям рельефа (ЦМР) имеются наиболее полные, точные и детальные пространственные данные [Florinsky, 2025].

Целью работы являлась количественная оценка согласованности характеристик рельефа (геоморфометрических параметров) с расположением истоков рек Белгородской области. В ходе исследования рассчитаны корреляции между наличием истоков рек и

геоморфометрическими параметрами. Выполнено сравнение различных групп геоморфометрических параметров по силе корреляции с наличием истоков рек. Отдельное внимание уделено изучению различий влияния геоморфометрических параметров на локальном и субрегиональном уровне.

Объекты и методы исследования

Работа состояла из трех этапов. На первом этапе выполнен сбор сведений о расположении истоков рек. На втором этапе проведен сбор сведений о рельефе. На третьем этапе осуществлен статистический анализ собранных данных.

Инвентаризация истоков рек проведена в программе ArcGIS 10.5. В качестве источника данных о расположении истоков рек использованы топографические карты масштаба 1 : 100 000 [Топографические..., 2026], по которым отвекторизованы все реки Белгородской области [Украинский, Нарожная, 2025]. В таблицу атрибутов созданного линейного слоя рек были внесены сведения о длине рек. Затем были отобраны реки длиной с округлением до десятых свыше 3,0 км и расставлены точки их истоков. В эту выборку попали как постоянные, так и пересыхающие реки или участки рек (рис. 1).



Рис. 1. Истоки рек и случайно сгенерированные точки отсутствия истоков
Fig. 1. River sources and randomly generated points of absence of sources

Помимо сведений о локализации истоков рек для анализа необходимы сведения о местах, где истоков рек нет (точки отсутствия). Они были сгенерированы случайным образом за пределами буферной зоны в 4,5 км вокруг истоков рек (см. рис. 1). Размер буферной зоны выбран равным среднему расстоянию между истоками. Количество точек отсутствия задано равным количеству истоков. Таким образом, была получена выборка из 338 истоков и 338 точек отсутствия, которые были объединены в один точечный слой (см. рис. 1). В таблице атрибутов этого слоя создано целочисленное поле, в которое для истоков внесены значения 1, а для точек отсутствия – значения 0. В результате наличие

истоков рек было представлено в количественном выражении в виде бинарных (дихотомических) данных.

В качестве источника сведений о рельефе выбрана ЦМР *FABDEM (forest and buildings removed Copernicus DEM)* [Hawker, Neal, 2021; Hawker et al., 2022]. Исследования последних лет показывают, что *FABDEM* наиболее точная ЦМР из существующих сейчас свободно распространяемых ЦМР [Мальцев и др., 2025]. Анализ рельефа выполняли с помощью программы *SAGA* (расчет геоморфометрических параметров) [Olaya, Conrad, 2009; Passy, Théry, 2018] и частично с помощью *ArcGIS 10.5* (предварительная обработка ЦМР и извлечение зональной статистики).

Исходное пространственное разрешение используемой ЦМР составляло 30 м/пиксель. Для ускорения обработки она была понижена до 100 м/пиксель. Тайлы ЦМР, покрывающую территорию Белгородской области, были сшиты в единую мозаику и обрезаны по границам области. Далее в программе *SAGA 9.11.1* с помощью инструментов из группы *Terrain Analysis* (набора *Morphometry*) были созданы растры следующих геоморфометрических параметров (в скобках названия параметров в *SAGA* и используемые в этой статье аббревиатуры):

- абсолютная высота (*height*),
- уклон (*slope*),
- косинус экспозиции или «северность» (*northness*),
- профильная или вертикальная кривизна (*profile curvature*),
- плановая или горизонтальная кривизна (*plan curvature*),
- общая кривизна (*general curvature*),
- глубина долин (*Valley Depth – VD*),
- относительное положение на склоне (*Relative Slope Position – RSP*),
- индекс топографической позиции (*Topographic Position Index – TPI*),
- индекс морфометрической защищенности (*Morphometric Protection Index – MPI*),
- топографический индекс расчлененности (*Terrain Ruggedness Index – TRI*),
- индекс конвергенции (*Convergence Index – CI*),
- выпуклость поверхности местности (*Terrain Surface Convexity – TSC*),
- текстура поверхности местности (*Terrain Surface Texture – TST*)
- мультимасштабный индекс плоскостности дна долин (*Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness – MRVBF*),
- мультимасштабный индекс плоскостности вершин хребтов (*Multiresolution Index of the Ridge Top Flatness – MRRTF*).

При вычислении общей, плановой и профильной кривизны в настройках *SAGA*, был выбран метод, предложенный И.В. Флоринским [Florinsky, 2009]. Вычисление косинуса было проведено, чтобы вместо циркулярных данных получить непрерывные. Это обусловлено требованиями к данным, предъявляемым используемыми методами статистического анализа.

При вычислении части геоморфометрических параметров используется радиус поиска. Такие параметры называют вторичными, в отличие от первичных параметров, вычисляемых без извлечения данных в пределах радиуса поиска. К вторичным параметрам относятся индексы *TPI*, *MPI*, *TRI*, *CI*, *TSC*, *TST*. Мы использовали два варианта радиуса поиска – 1 км и 25 км. Чтобы различать индексы, построенные с разным радиусом поиска, далее по тексту к их аббревиатуре будет прибавляться цифра 1 или 25 (например, *TPI-1* и *TPI-25*). В случаях, когда имеются в виду оба варианта индекса сразу, цифра к аббревиатуре прибавляться не будет. Радиус поиска в 1 км – это расстояние, сопоставимое с длиной местного склона, т.е. склона поднимающегося от эрозионного вреза до водораздела звена эрозионной сети первого порядка. Радиус поиска в 25 км – это расстояние сопоставимое с длиной речных бассейнов 4 и 5 порядков, составляющих более 90 % бассейнов области. Индексы, построенные с радиусом поиска 1 км, показывают

различие рельефа на локальном уровне. Это же относится к параметрам, при построении которых радиус поиска не используется. Индексы, построенные с радиусом поиска 25 км, показывают различия рельефа на субрегиональном уровне. Здесь термины «локальный» и «субрегиональный» употребляются нами относительно размеров исследуемой территории. В таком смысле их употребление ближе к практике ландшафтоведения, чем к практике геоморфометрии.

Из растров геоморфометрических параметров при помощи инструмента зональной статистики были извлечены значения в истоках рек и в точках отсутствия. Затем извлеченные значения были присоединены к таблице атрибутов точечного слоя истоков рек и точек отсутствия. Эта таблица атрибутов скопирована в *Excel* и сохранена в виде csv-файла для передачи в *R* и последующего анализа.

Статистическая обработка собранных данных выполнена в среде для статистических вычислений *R* 4.1.0 [R Core Team, 2021] с использованием дополнительных пакетов *polycor* (корреляционный анализ) [Fox, 2022] и *ggplot2* (статистическая визуализация) [Wickham, 2016].

В *R* при помощи функции *polyserial* из пакета *polycor* проведен корреляционный анализ. Рассчитаны коэффициенты бисериальной корреляции, показывающие связь между дихотомической переменной (наличие или отсутствие истоков рек) и непрерывными переменными (геоморфометрические параметры). С помощью инструментов из пакета *ggplot2* выполнена статистическая визуализация результатов – созданы диаграммы размахов (боксплоты) для сравнения геоморфометрических параметров в истоках рек и в точках отсутствия.

Результаты и их обсуждение

Все рассмотренные геоморфометрические параметры для удобства интерпретации результатов корреляционного анализа можно разделить на пять групп:

- первичные базовые параметры – высота, уклон, косинус экспозиции;
- параметры, описывающие форму поверхности – общая кривизна, профильная кривизна, плановая кривизна, *CI*, *TSC*;
- параметры, описывающие положение на склоне – *TPI*, *RSP*;
- параметры, описывающие пересеченность (расчлененность) и защищенность (закрытость) рельефа – *TRI*, *MPI*, *TST*;
- параметры, описывающие принадлежности к днищам долин и вершинам водоразделов – глубина долин, *MRVBF*, *MRRTF*.

Результаты корреляционного анализа показаны в табл. 1. В этой таблице геоморфометрические параметры отсортированы в порядке убывания абсолютного значения коэффициента бисериальной корреляции. Из 22 геоморфометрических параметров статистически значимую корреляцию с наличием истоков рек имеют 19 параметров. Для трех параметров – уклона, *TPI*-25 и глубины долин, корреляция статистически значимой не является.

Из тех 19 геоморфометрических параметров, которые имеют статистически значимую корреляцию с наличием истоков рек, 12 параметров имеют положительный коэффициент бисериальной корреляции. Это *MPI*-1, *MPI*-25, *CI*-25, *TST*-1, *MRRTF*, косинус экспозиции, *TSC*-25, высота, *TST*-25, *TRI*-1, *TSC*-1, *MRVBF*. Семь имеют отрицательный коэффициент бисериальной корреляции. Это *TPI*-1, общая кривизна, *CI*-1, профильная кривизна, *RSP*, *TRI*-25, плановая кривизна. Характерно, что параметры, отрицательно коррелирующие с наличием истоков рек, имеют большую тесноту связи, чем положительно коррелирующие. Так для первых коэффициент бисериальной корреляции изменяется от –0,20 до –0,70, а для вторых от 0,11 до 0,53.

Таблица 1
Table 1

Корреляция между наличием истоков рек и геоморфометрическими параметрами
Correlation between the presence of river sources and geomorphometric parameters

Геоморфометрические параметры	Группа параметров	Коэффициент бисериальной корреляции ρ_{bs}	p-значение
<i>TPI-1</i>	Положение на склоне	–0,70	$5,08 \times 10^{-171}$
Общая кривизна, m^{-1}	Форма поверхности	–0,64	$8,46 \times 10^{-110}$
<i>CI-1</i>	Форма поверхности	–0,64	$1,27 \times 10^{-100}$
<i>MPI-1</i>	Пересеченность местности	0,53	$3,54 \times 10^{-57}$
<i>MPI-25</i>	Пересеченность местности	0,50	$6,24 \times 10^{-47}$
Профильная кривизна, m^{-1}	Форма поверхности	–0,45	$4,53 \times 10^{-28}$
<i>CI-25</i>	Форма поверхности	0,36	$4,06 \times 10^{-17}$
<i>RSP</i>	Положение на склоне	–0,35	$3,13 \times 10^{-17}$
<i>TRI-25</i>	Пересеченность местности	–0,33	$5,12 \times 10^{-14}$
<i>TST-1</i>	Пересеченность местности	0,32	$2,22 \times 10^{-13}$
<i>MRRTF</i>	Долины и водоразделы	0,27	$1,42 \times 10^{-9}$
Косинус экспозиции	Базовые первичные	0,27	$1,89 \times 10^{-9}$
<i>TSC-25</i>	Форма поверхности	0,24	$2,02 \times 10^{-6}$
Плановая кривизна, m^{-1}	Форма поверхности	–0,20	$3,83 \times 10^{-6}$
Высота, м	Базовые первичные	0,18	0,0002
<i>TST-25</i>	Пересеченность местности	0,17	0,0003
<i>TRI-1</i>	Пересеченность местности	0,16	0,001
<i>TSC-1</i>	Форма поверхности	0,12	0,01
<i>MRVFB</i>	Долины и водоразделы	0,11	0,03
Глубина долин, м	Долины и водоразделы	0,04	0,36
<i>TPI-25</i>	Положение на склоне	–0,03	0,51
Уклон, °	Базовые первичные	0,02	0,68

Качественную интерпретацию величины корреляции обычно дают по шкале Чеддока. Так очень высокая теснота связи (абсолютные значения коэффициента корреляции от 0,9 до 1,0) ни для одного из рассмотренных геоморфометрических параметров не обнаружена. Высокая теснота связи (абсолютные значения от 0,7 до 0,9) обнаружена только для *TPI-1*. Средняя теснота связи (абсолютные значения коэффициента корреляции от 0,5 до 0,7) выявлена для четырех параметров – общей кривизны, *CI-1*, *MPI-1*, *MPI-25*. Умеренная теснота связи (абсолютные значения коэффициента корреляции от 0,3 до 0,5) выявлено для пяти параметров – профильная кривизна, *CI-25*, *RSP*, *TRI-25*, *TST-1*. Среди параметров, показавших высокую, среднюю или умеренную корреляцию с наличием истоков рек, оказались параметры, описывающие положение на склоне, форму поверхности и пересеченность местности. Базовые первичные параметры и параметры, описывающие принадлежность к днищам долин или водоразделам, среди них отсутствуют.

12 (54 %) геоморфометрических параметров показали слабую корреляцию с наличием истоков рек (абсолютные значения коэффициента корреляции от 0,0 до 0,3). Среди них есть представители всех пяти групп параметров.

Обобщение коэффициентов корреляции по группам морфометрических параметров представлено в табл. 2. В среднем, наиболее сильную корреляцию показывают параметры, описывающие положение на склоне. Затем идут параметры, описывающие пересеченность рельефа, и на третьем месте – параметры, описывающие форму поверхности. В этих трех группах параметров, показывающих наиболее сильную корреляцию с наличием истоков рек, встречаются параметры, показывающие отрицательную корреляцию. А вот в двух остальных группах, встречаются параметры только с положительной корреляцией. Именно этим (физическим смыслом групп параметров) и объясняется описанный выше факт, что отрицательно коррелирующие параметры имеют большую тесноту связи с наличием рек.

Таблица 2
Table 2

Обобщение коэффициентов корреляции по группам морфометрических параметров
Generalization of correlation coefficients for groups of morphometric parameters

Группа параметров	Средний $ \rho_{bs} $	Диапазон $ \rho_{bs} $	Знак корреляции
Базовые	0,16	0,25	положительная
Положение на склоне	0,36	0,67	отрицательная
Форма поверхности	0,29	0,52	Положительная или отрицательная
Пересеченность рельефа	0,34	0,37	Положительная или отрицательная
Принадлежность к долинам и плакорам	0,14	0,23	положительная

Помимо физического смысла параметра на силу корреляции с наличием источников рек влияет также радиус поиска. Он задается при расчете TPI , MPI , TRI , CI , TST и TSC . Для четырех (TPI , MPI , CI , TST) из этих шести индексов более сильная корреляция с наличием истоков рек наблюдается при радиусе поиска 1 км. Это говорит о том, что локальное варьирование рельефа, описываемое этими параметрами, сказывается на размещении истоков рек сильнее, чем различие рельефа в масштабах бассейна. Но для двух параметров (TRI и TSC) закономерность обратная – корреляции сильнее при радиусе поиска в 25 км.

На рисунках 2–6 с помощью диаграмм размахов (боксплотов) показано, как различаются значения геоморфометрических параметров для истоков рек и для случайно сгенерированных точек отсутствия. На рис. 2 показаны различия в первичных базовых параметрах. К первичным базовым параметрам мы отнесли высоту, уклон и экспозицию склона. Базовыми мы их называем в том смысле, что они наиболее распространены в исследованиях и обязательно присутствуют в любых программных продуктах, обеспечивающих хотя бы минимальные возможности обработки ЦМР. К первичным же параметрам в геоморфометрии принято относить те, что вычисляются напрямую из пикселей ЦМР без привлечения сведений о пикселях в заданном радиусе поиска.

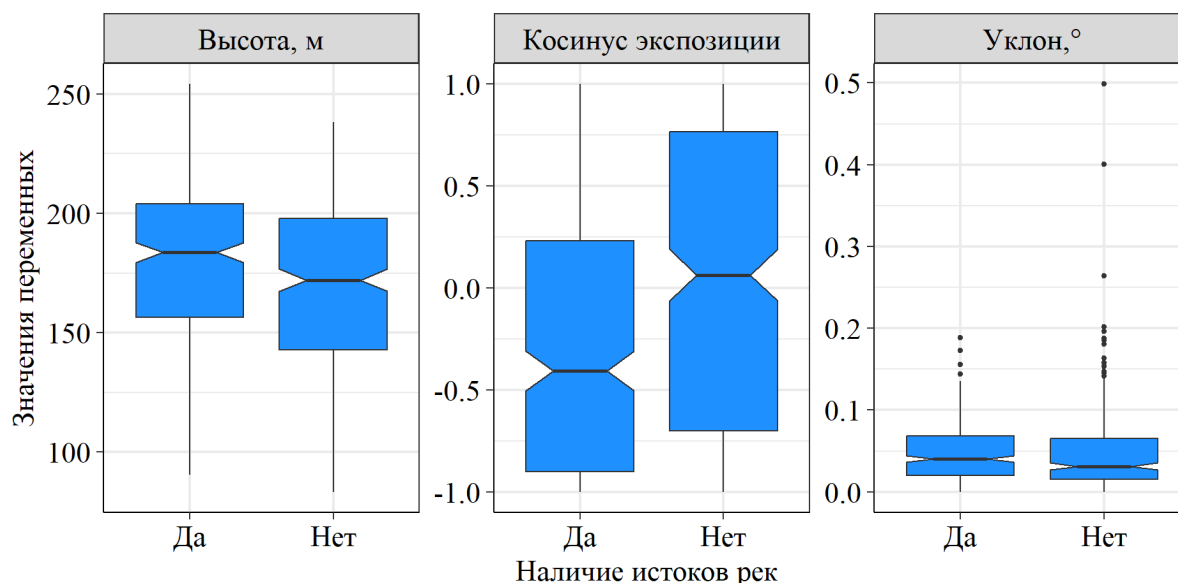


Рис. 2. Диаграммы размахов для базовых первичных геоморфометрических параметров
Fig. 2. Boxplots for basic primary geomorphometric parameters

Среди базовых первичных параметров наибольшие различия истоков рек и точек отсутствия обнаруживаются для косинуса экспозиции склона (см. рис. 2). Положительные значения этого параметра указывают на склоны северных экспозиций, а отрицательные – на склоны южных экспозиций. На территории Белгородской области истоки рек тяготеют к более южным экспозициям склонов (см. рис. 2). Для горных территорий аналогичное наблюдение было сделано в работе [Mocior et al., 2015]. Они указывают, что в Бещадах (Восточные Карпаты) наибольшая плотность родников отмечается на склонах юго-западной экспозиции. Ozdemir [2011] указывал, что на исследованном участке в турецкой провинции Конья большинство родников находится на склонах с экспозицией 112,5–292,5°.

Второй по силе корреляции среди базовых первичных параметров идет абсолютная высота. Для истоков рек она в среднем выше, чем для точек отсутствия. Истоки рек занимают в пределах речных бассейнов высокие участки местности, расположенные чаще всего там, где плакоры сменяются пологими прибалочными склонами (см. рис. 1). Интересно то, что влияние высоты обнаруживается в равнинных условиях, в то время как в литературе чаще упоминается влияние высоты на размещение родников в горах [Williams, Vondracek, 2010; Ozdemir, 2011; Pourtaghi, Pourghasemi, 2014; Mocior et al., 2015].

Уклон для истоков рек на территории Белгородской области в среднем немного больший, чем для точек отсутствия. Но как написано выше, корреляция между уклоном и наличием истоков рек статистически значимой не является. Стоит отметить, что такое наблюдение сделано на возвышенности (Среднерусской возвышенности), но все-таки в условиях равнины. Для горных территорий ряд исследований показал, что уклон влияет на встречаемость родников [Williams, Vondracek, 2010; Ozdemir, 2011; Pourtaghi, Pourghasemi, 2014; Niraula et al., 2021; Paudel, Subedi, 2025; Ghalley et al., 2026].

На рис. 3 для истоков рек и точек отсутствия показаны различия в положении на склоне. Положение точки на склоне описывается геоморфометрическими параметрами *RSP* и *TPI*. *RSP* изменяется от 0 до 1,0. Значение 0,5 указывает на середину склона. Верхняя часть склона имеет *RSP* более 0,5, нижняя – менее 0,5. Для *TPI* верхняя и нижняя граница диапазона четко не установлена, а середине склона соответствует нулевое значение. Положительные значения *TPI* соответствуют верхней части склона, а отрицательные – нижней [De Reu et al., 2013].

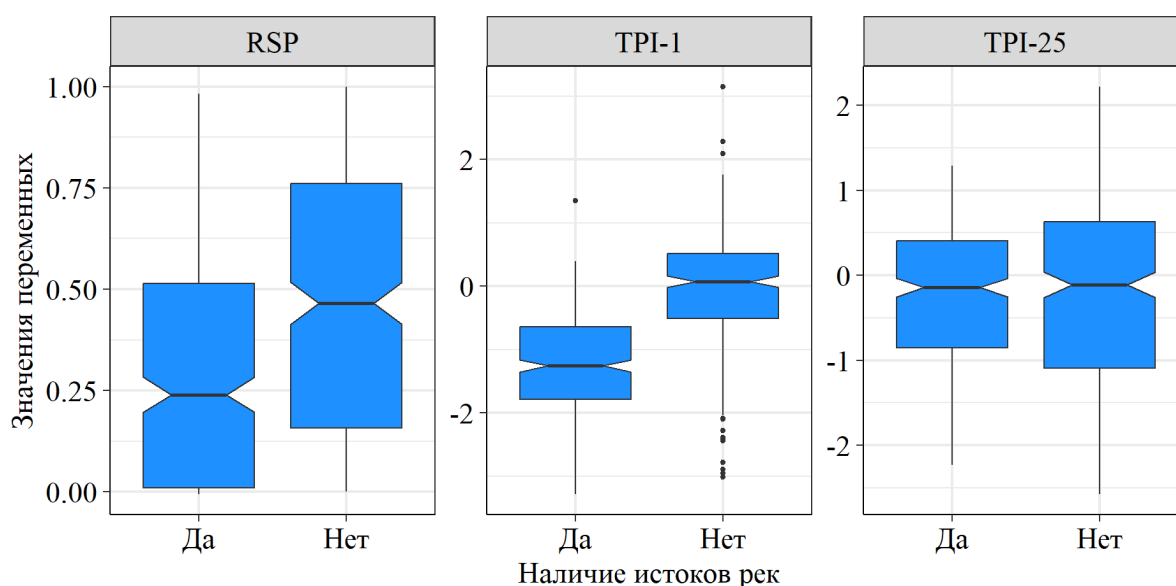


Рис. 3. Диаграммы размахов для геоморфометрических параметров, описывающих положение на склоне

Fig. 3. Boxplots for geomorphometric parameters of slope position

Истоки рек тяготеют к более нижним частям склонов. На это указывают пониженные значения *RSP*, *TPI-1* и *TPI-25* у истоков рек по сравнению с точками отсутствия. Сильнее такая закономерность выражена на локальном уровне, то есть на уровне отдельных местных склонов. Поэтому для *TPI-1* и *RSP* наблюдается более высокая корреляция с наличием истоков рек, чем для *TPI-25*. На субрегиональном уровне такая закономерность практически незаметна – для *TPI-25* разница медиан у истоков и точек отсутствия очень мала, а корреляция с наличием истоков рек статистически незначима (см. рис. 3). В исследовании [Rahmati et al., 2018], проведенном в аридной горной местности иранской провинции Северный Хорасан, также установлена значимость этих показателей для оценки значимости выхода грунтовых вод.

На рис. 4 для истоков рек и точек отсутствия показаны различия в форме поверхности. Геоморфометрические параметры позволяют количественно разделить форму поверхности на два типа – выпуклая и вогнутая поверхность. Из семи параметров, представленных на этом рисунке, три относятся к первичным параметрам – это общая, профильная и плановая кривизна. Отрицательные значения этих параметров указывают на вогнутые поверхности, а положительные – на выпуклые.

Все три показателя кривизны поверхности указывают на то, что истоки рек на локальном уровне тяготеют к вогнутым поверхностям. Аналогичные выводы о роли общей, профильной и плановой кривизны в распределении родников сделали Martinić и Čanjevac [2024] для территории Хорватии и Moghaddam и соавторами [2020] для территории иранской провинции Западный Азербайджан. Pourtaghi и Pourghasemi [2014] отдельно описывали влияние плановой кривизны на размещение родников. В условиях Белгородской области вогнутыми поверхностями, к которым тяготеют истоки рек, являются днища верхних звеньев эрозионной сети. При этом общая кривизна – второй по силе корреляции параметр из 22 рассмотренных нами.

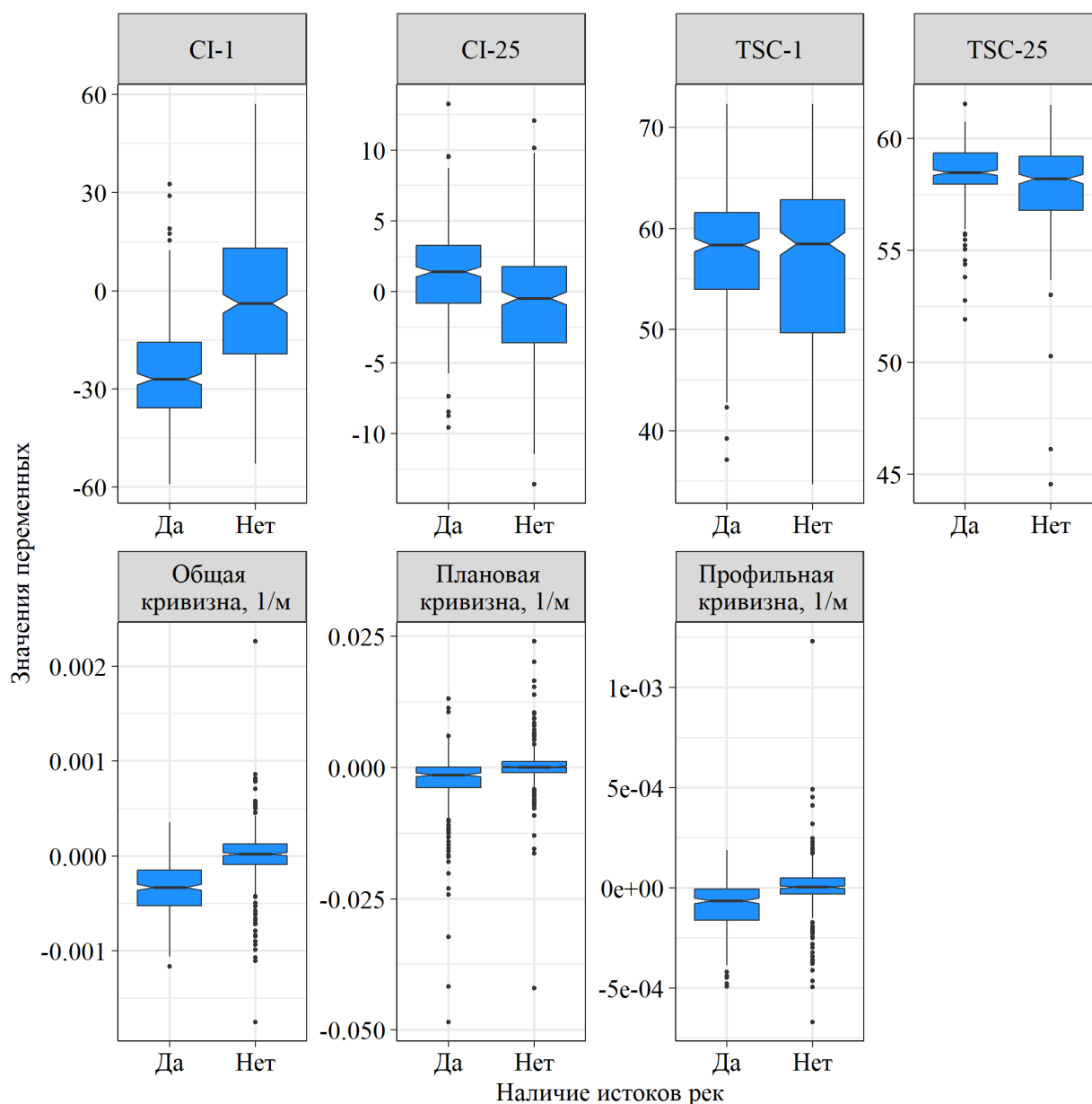


Рис. 4. Диаграммы размахов для геоморфометрических параметров, описывающих форму поверхности

Fig. 4. Boxplots for geomorphometric parameters of surface convexity

Индекс конвергенции *CI* показывает, как ведут себя склоны вокруг анализируемого пикселя ЦМР. Склоны могут сходиться (конвергировать) или расходиться (дивергировать). В первом случае поверхность вогнутая (на это указывают отрицательные значения), а во втором – выпуклая (на это указывают положительные значения). На локальном уровне для истоков рек характерен более низкий *CI*, чем для точек отсутствия. На субрегиональном уровне наоборот, точки истоков имеют более высокий *CI*, т.е. тяготеют к выпуклым поверхностям. Выпуклые формы рельефа субрегионального уровня – это пологие прибалочные склоны.

Индекс выпуклости поверхности *TSC* показывает в пределах радиуса поиска долю «выпуклых» пикселей ЦМР, то есть пикселей, возвышенных относительно центрального пикселя. Он принимает значения от 0 до 100 %. Чем ниже значение *TSC*, тем вогнутее поверхность, чем больше – тем выпуклее [Iwahashi, Pike, 2007]. На территории Белгородской области для истоков рек характерен меньший межквартильный размах *TSC*, чем у точек

отсутствия (см. рис. 4). При этом медианные значения TSC на локальном уровне слабо различаются, а на субрегиональном уровне выше, чем у точек отсутствия. Принадлежность истоков на субрегиональном уровне для TSC объясняется так же, как и для CI .

На рис. 5 для истоков рек и точек отсутствия показаны различия в геоморфометрических параметрах, описывающих пересеченность местности (расчлененность рельефа). Индекс текстуры поверхности местности TST описывает шероховатость поверхности. Чем ниже значения TST , тем ровнее поверхность. Чем выше значения TST , тем поверхность изрезаннее [Iwahashi, Pike, 2007]. Для истоков рек значения TST выше, чем для точек отсутствия. Такое соотношение наблюдается как при радиусе поиска 1 км, так и при радиусе поиска 25 км. Это указывает на приуроченность истоков рек расчлененному рельефу.

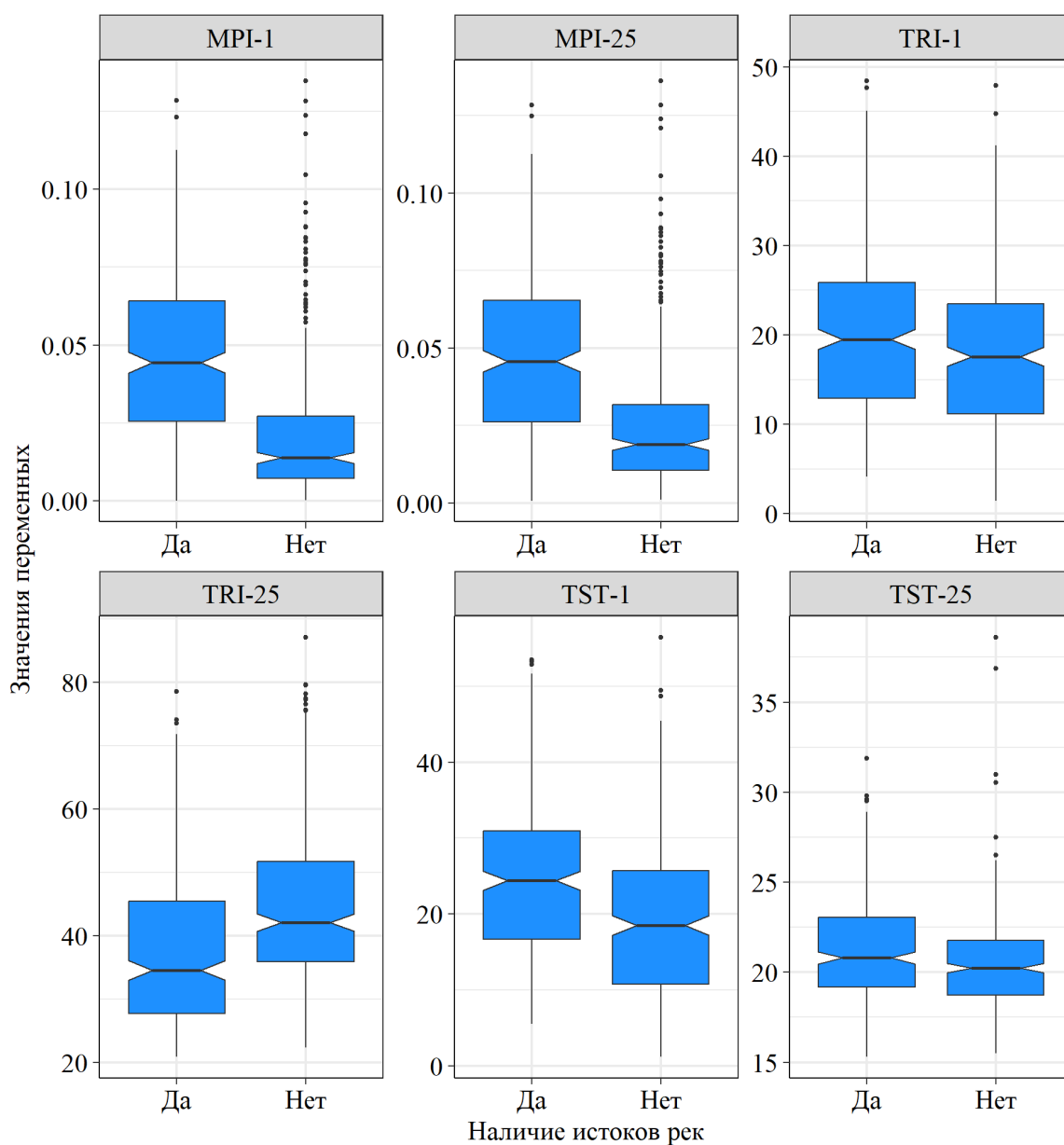


Рис. 5. Диаграммы размахов для геоморфометрических параметров, описывающих пересеченность рельефа

Fig. 5. Boxplots for geomorphometric parameters of relief ruggedness

Индекс морфометрической защищенности *MPI* усредняет максимальные вертикальные углы по разным направлениям между анализируемым пикселем и его соседями в заданном радиусе поиска. Высокие значения указывают на рельеф, закрывающий по периметру анализируемый пиксель. А низкие значения *MPI* указывают на открытый рельеф. Для истоков рек на исследуемой территории характерны более высокие значения *MPI*, чем для точек отсутствия. Это наблюдается как при радиусе поиска 1 км, так и при радиусе поиска 25 км.

Топографический индекс расчлененности *TRI* характеризует усредненный перепад высот в заданном радиусе поиска. Низкие значения *TRI* свидетельствуют о сглаженном и выровненном рельефе, высокие – о расчлененном рельефе. В отличие от *MPI* и *TST*, для исследуемой территории *TRI* при радиусах поиска 1 км и 25 км имеют обратную зависимость. Так на локальном уровне истоки рек тяготеют к участкам с высоким *TRI*, а на субрегиональном – к участкам с низким *TRI*. Т.е. на водосборах с большим вертикальным расчленением меньше вероятность нахождения истока реки, чем в речных бассейнах с меньшим расчленением, но отдельно взятые элементы эрозионной сети с большим перепадом высот имеют большую вероятность нахождения истока.

На рис. 6 для истоков рек и точек отсутствия показаны различия в геоморфометрических параметрах, описывающих принадлежность к долинам или водораздельным поверхностям. Это параметры *MRVBF*, *MRRTF* и глубина долин.

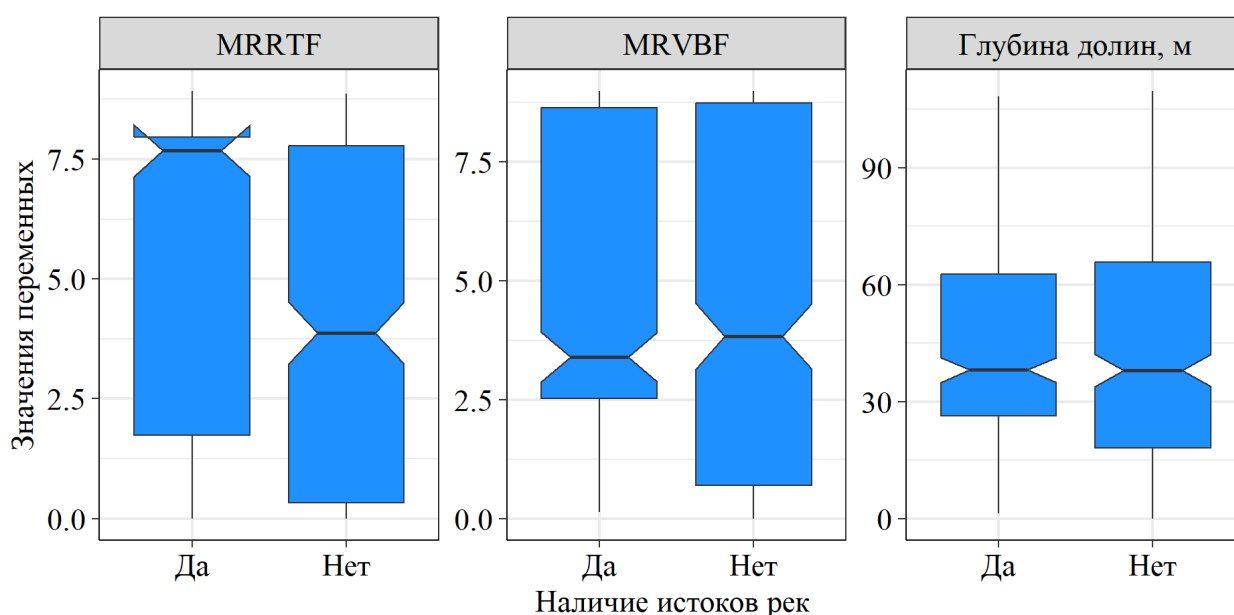


Рис. 6. Диаграммы размахов для геоморфометрических параметров, описывающих принадлежность к днищам долин или водоразделам

Fig. 6. Boxplots for geomorphometric parameters of belonging to valley bottoms or watersheds

Наиболее простой в вычислении параметр – глубина долин, не позволяет разделять истоки рек и точки отсутствия. Корреляции с ним наличия истоков рек не является статистически значимой, а медианные значения для истоков и точек отсутствия практически одинаковые. Это связано с тем, что глубина верховий речных долин сильно различается в разных речных бассейнах. Те значения, которые в одном бассейне соответствуют днищу долины, в другом бассейне будут соответствовать придолинному склону.

Индекс *MRVBF* предназначен для автоматизированного выделения днищ долин. Чем выше его значение, тем больше участок похож на выположенное дно долины [Gallant, Dowling, 2003]. Для истоков рек значения *MRVBF* в среднем больше, чем для точек отсутствия. Индекс *MRRTF* предназначен для автоматизированного выделения плоских водораздельных поверхностей. Чем выше его значение, тем больше участок похож на плоский водораздел [Gallant, Dowling, 2003]. Для истоков рек в среднем его значение ниже, чем для точек отсутствия. При этом у истоков рек межквартильный размах *MRVBF* и *MRRTF* меньше, чем у точек отсутствия. Это связано с тем, что истоки находятся обычно в верховьях эрозионной сети. А точки отсутствия при генерации случайным образом были размещены и на плакорах, и на пологих прибалочных склонах, и в днищах речных долин.

Заключение

Для территории Белгородской области характерны следующие закономерности влияния рельефа на расположение истоков рек:

1. Рельеф оказывает влияние на наличие истоков рек. При этом наблюдается теснота связи не выше средней. Для наиболее сильно влияющих параметров (*TPI-1*, *CI-1*, *MPI-1*, *MPI-25*) абсолютное значение коэффициента корреляции не превышает 0,7.

2. На наличие истоков рек сильнее всего влияют такие характеристики рельефа как форма поверхности (выпуклая или вогнутая), положение на склоне и расчлененность рельефа. Такие параметры рельефа как высота, уклон и экспозиция на наличие истоков реки влияют слабо.

3. С положением на склоне у наличия истоков рек наблюдается отрицательная бисериальная (двухрядная) корреляция для всех геоморфометрических параметров, описывающих эту особенность рельефа. С индексами формы поверхности корреляция у истоков рек чаще отрицательная, а с показателями пересеченности рельефа – чаще положительная.

4. Из параметров, описывающих положения на склоне, сильнее всего влияет индекс топографической позиции *TPI*, рассчитанный с радиусом поиска 1 км ($\rho_{bs} = -0,70$). Из параметров, описывающих форму рельефа, сильнее всего влияет общая кривизна ($\rho_{bs} = -0,64$). Из параметров, описывающих расчлененность рельефа, сильнее всего влияет морфометрический индекс защищенности *MPI-1*, рассчитанный с радиусом поиска 1 км ($\rho_{bs} = -0,53$).

5. Большая часть геоморфометрических параметров оказывает схожее влияние на локальном и субрегиональном уровне, но для отдельных параметров характер влияния противоположный. Это наблюдается для индекса конвергенции *CI* и индекса выпуклости поверхности *TSC*. Локально истоки рек тяготеют к вогнутым поверхностям овражно-балочно-долинной сети, а на субрегиональном уровне – к выпуклым поверхностям, состоящим из плакоров и продолжающих их пологих прибалочных склонов, прорезаемых эрозионной сетью.

Полученные в ходе этой работы сведения будут полезны при моделировании расположения истоков рек. Они позволяют выбирать среди множества геоморфометрических параметров оптимальные предикторы для включения в ансамбли статистических моделей.

Список источников

- Топографические карты Белгородской области. Масштаб 1:100000. Состояние местности на 1981–1990 год. Электронный ресурс. URL: <https://satmaps.info> (дата обращения 11.02.2026).
- R Core Team. 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing. Electronic resource. URL: <https://www.R-project.org/> (date of access 11.02.2026)
- Hawker L., Neal J. 2021. FABDEM V1-0. Bristol, United Kingdom, University of Bristol. Electronic resource. URL: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7> (date of access 11.02.2026)
- Fox J. 2022. Polycor: polychoric and polyserial correlations. R package version 0.8-1. Electronic resource. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=polycor> (date of access 11.02.2026)

Список литературы

- Белеванцев В.Г. 2013. Сравнительный анализ изменения речной сети в бассейнах Ворсклы и Тихой Сосны за историческое время: Белгородская область. Современные проблемы науки и образования, 6: 941.
- Дмитриева В.А., Фолимонова Ю.С. 2016. Речная сеть и ресурсы рек Белгородской области. В кн.: Актуальные вопросы гидрологии и геоэкологии. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию ПГНИУ, Пермь, 17–18 октября 2016. Пермь, ПГНИУ: 121–125.
- Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Кириленко Ж.А., Григорьева О.И. 2013. Обеспечение оптимальной водоохранной лесистости при бассейновой организации природопользования. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 15(3–2): 652–657.
- Лисецкий Ф.Н., Дегтярь А.В., Буряк Ж.А., Павлюк Я.В., Нарожная А.Г., ... Маринина О.А. 2015. Реки и водные объекты Белогорья. Белгород, КОНСТАНТА, 362 с.
- Мальцев К.А., Талипова С.Н., Магзянов И.И., Сомов А.А., Мальцева Т.С. 2025. Сравнение современных свободно распространяемых цифровых моделей рельефа и их применимости для эрозионного моделирования. Известия Русского географического общества, 157(1): 79–98. <https://doi.org/10.7868/S3034538325010067>
- Нарожная А.Г. 2023. Структура речной сети Белгородской области. В кн.: Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах. Материалы X Международной научной конференции, Белгород, 24–27 октября 2023. Белгород, НИУ «БелГУ»: 173–178.
- Новых Л.Л., Раевская М.В., Орехова Г.А. 2022. Некоторые особенности использования родников (на примере Белгородской области). Региональные геосистемы, 46(4): 624–634. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-624-634.3>
- Петин А.Н., Новых Л.Л. 2009. Родники Белогорья. Белгород, КОНСТАНТА, 219 с.
- Петин А.Н., Петина М.А., Лебедева М.Г., Белеванцев В.Г. 2015. Применение ГИС-технологий в историческом анализе речных систем на примере Белгородской области. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 21: 241–246. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2015-1-21-241-246>
- Раевская М.В. 2023. Родники как индикаторы экологического состояния окружающей среды: возможности и проблемы. Геология, география и глобальная энергия, 4(91): 86–92. https://doi.org/10.54398/20776322_2023_4_86
- Украинский П.А., Нарожная А.Г. 2025. Распределение густоты речной сети Белгородской области вдоль географических градиентов. Региональные геосистемы, 49(3): 533–547. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-3-533-547>.
- Чендев Ю.Г., Гончаров Н.Е. 2000. Деградация речной сети Белгородской области. В кн.: Экологическая безопасность и здоровье людей в XXI веке. VI Всероссийская научно-практическая конференция, Белгород, 10–12 октября 2000. Белгород, Издательский центр «Логия»: 70–73.
- Шевченко В.Н. 2019. Трансформация гидрографической сети урбанизированных территорий Белгородской области. Вектор ГеоНаук, 2(4): 22–25. <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10042>

- Florinsky I.V. 2025. Digital Terrain Analysis. London, Elsevier, Academic Press, 478 p. <https://doi.org/10.1016/C2023-0-51092-4>
- Florinsky I.V. 2009. Computation of the Third Order Partial Derivatives from a Digital Elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(2): 213–231. <https://doi.org/10.1080/13658810802527499>.
- Gallant J.C., Dowling T.I. 2003. A Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness for Mapping Depositional Areas. *Water Resources Research*, 39(12): 1347–1359. <https://doi.org/10.1029/2002WR001426>
- Ghalley R.K., Tantane S., Nusit K., Chidburee P., Soonthornnonda P., Tai C.H. 2026. A GIS-Based Logistic Regression Model for Groundwater Spring Potential Mapping in the Gamri Chhu basin, Bhutan. *International Journal of Geoinformatics*, 22(5): 36–58. <https://doi.org/10.52939/ijg.v22i5.4979>
- Hawker L., Uhe P., Neal J., Paulo L. Sosa J., ... Sampson C. 2022. A 30 m Global Map of Elevation with Forests and Buildings Removed. *Environmental Research Letters*, 17(2): 024017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>.
- Iwahashi J., Pike R.J. 2007: Automated Classifications of Topography from DEMs by an Unsupervised Nested-Means Algorithm and a Three-Part Geometric Signature. *Geomorphology*, 86(3): 409–440. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>.
- Martinić I., Čanjevac I. 2024. Distribution and Characteristics of Springs in Two Neighboring Areas of Different Morphogenic Relief Type – Example of SW Medvednica Mountain (Central Croatia). *Water*, 16(7): 994. <https://doi.org/10.3390/w16070994>
- Mocior E., Rzonca B., Siwek J., Plenzler J., Placzowska E., ... Zdziebko D. 2015. Determinants of the Distribution of Springs in the Upper Part of a Flysch Ridge in the Bieszczady Mountains in Southeastern Poland. *Episodes Journal of International Geoscience*, 38(1): 21–30. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2015/v38i1/003>
- Moghaddam D.D., Rahmati O., Haghizadeh A., Kalantari Z. 2020. A Modeling Comparison of Groundwater Potential Mapping in a Mountain Bedrock Aquifer: QUEST, GARP, and RF Models. *Water*, 12(3): 679. <https://doi.org/10.3390/w12030679>
- Niraula R.R., Sharma S., Pokharel B.K., Paudel U. 2021. Spatial Prediction of Spring Locations in Data Poor Region of Central Himalayas. *Hydrology Research*, 52(2): 492–505. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.223>
- Olaya V., Conrad O. 2009. Geomorphometry in SAGA. In: *Developments in soil science*. Ed. by T. Hengl, H.I. Reuter. Amsterdam, Elsevier: 293–308. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00012-3)
- Ozdemir A. 2011. Using a Binary Logistic Regression Method and GIS for Evaluating and Mapping the Groundwater Spring Potential in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey). *Journal of Hydrology*, 405(1): 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.015>
- Passy P., Théry S. 2018. The Use of SAGA GIS Modules in QGIS. In: *QGIS and Generic Tools*. Ed. by N. Baghdadi, C. Mallet, M. Zribi. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc.: 107–149. <https://doi.org/10.1002/9781119457091.ch4>
- Paudel M., Subedi D.S. 2025. Spatial Distribution of Spring Water Resources: a Study of Waling municipality, Nepal. *The Himalayan Geographers*, 16(1): 83–94. <https://doi.org/10.3126/thg.v16i1.92614>
- Pourtaghi Z.S., Pourghasemi H.R. 2014. GIS-Based Groundwater Spring Potential Assessment and Mapping in the Birjand Township, Southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, 22(3): 643–662. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1089-6>
- Rahmati O., Naghibi S.A., Shahabi H., Bui D.T., Pradhan B., ... Melesse A.M. 2018. Groundwater Spring Potential Modelling: Comprising the Capability and Robustness of Three Different Modeling Approaches. *Journal of Hydrology*, 565: 248–261. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.027>
- De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwervaegher A., Gelorini V., ... Crombé P. 2013. Application of the Topographic Position Index to Heterogeneous Landscapes. *Geomorphology*, 186(15): 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015>
- Wickham H. 2016. *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (2nd Edition). New York, Springer-Verlag, 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>.

Williams M.A., Vondracek B. 2010. Spring Distributions and Relationships with Land Cover and Hydrogeologic Strata in a Karst Landscape in Winona County, Minnesota, USA. *Carbonates and Evaporites*, 25(4): 333–347. <https://doi.org/10.1007/s13146-010-0037-y>

References

- Belevantsev V.G. 2013. The Comparative Analysis of the River Network Change in the Basins of Vorskla and Tikhaya Sosna Rivers for Historical Time: Belgorod Oblast. *Modern Problems of Science and Education*, 6: 941 (in Russian).
- Dmitrieva V.A., Folimonova Yu.S. 2016. River Net and Water Resources of Rivers at Belgorod Oblast. In: *Current Issues in Hydrology and Geoecology. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of PSNRU*, Perm, 17–18 October 2016. Perm, Publ. PSNRU: 121–125 (in Russian).
- Kuzmenko Ya.V., Lisetskiy F.N., Kirilenko Zh.A., Grigorieva O.I. 2013. Providing the Optimum Water Protection Forests Amount at Basin Organization of Nature Management. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 15(3–2): 652–657 (in Russian).
- Lisetskiy F.N., Degtyar' A.V., Buryak Zh.A., Pavlyuk Ya.V., Narozhnyaya A.G., ... Marinina O.A. 2015. *Reki i vodnye ob'ekty Belgor'ya* [Rivers and Water Bodies of Belogorye]. Belgorod, Publ. CONSTANTA, 362 p.
- Maltsev K.A., Talipova S.N., Magzyanov I.I., Somov A.A., Maltseva T.S. 2025. Accuracy Analysis of New Freely Available Digital Terrain Models in the European Territory of Russia. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 157(1): 79–98 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S3034538325010067>
- Narozhnyaya A.G. 2023. *Struktura rechnoy seti Belgorodskoy oblasti* [Structure of the River Network of the Belgorod Region]. In: *Problemy prirodopol'zovaniya i ekologicheskaya situatsiya v Evropeyskoy Rossii i sopredel'nykh stranakh* [Problems of Nature Management and the Ecological Situation in European Russia and Neighboring Countries]. *Proceedings of the X International Scientific Conference*, Belgorod, 24–27 October 2023. Belgorod, Publ. BelSU: 173–178.
- Novykh L.L., Raevskaya M.V., Orekhova G.A. 2022. Some Types of Spring Use (Belgorod Region). *Regional Geosystems*, 46 (4): 624–634 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-624-634>
- Petin A.N., Novykh L.L. 2009. *Rodniki Belgor'ya* [Springs of Belogorye]. Belgorod, Publ. CONSTANTA, 219 p.
- Petin A.N., Petina M.A., Lebedeva M.G., Belevantsev V.G. 2015. Application of GIS Technologies in Historical Analysis of River Systems on an Example Belgorod Region. *InterCarto. InterGIS*, 21: 241–246 (in Russian). <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2015-1-21-241-246>
- Raevskaya M.V. 2023. Springs as Environmental Indicators: Opportunities and Challenges. *Geology, geography and global energy*, 4(91): 86–92 (in Russian). https://doi.org/10.54398/20776322_2023_4_86
- Ukrainsky P.A., Narozhnyaya A.G. 2025. Distribution of River Network Density Along Geographical Gradients in the Belgorod Region. *Regional Geosystems*, 49(3): 533–547 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-3-533-547>
- Chendev Yu.G., Goncharov N.E. 2000. Degradatsiya rechnoy seti Belgorodskoy oblasti [Degradation of the River Network of the Belgorod Region]. In: *Ekologicheskaya bezopasnost' i zdorov'e lyudey v XXI veke* [Environmental Safety and Human Health in the 21st Century]. VI All-Russian Scientific and Practical Conference, Belgorod, 10–12 October 2000. Belgorod, Publ. Logia: 70–73.
- Shevchenko V.N. 2019. Transformation of a Hydrographic Network of Urbanized Territories of the Belgorod Region. *Vektor GeoNauk*, 2(4): 22–25 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10042>
- Florinsky I.V. 2025. *Digital Terrain Analysis*. London, Elsevier, Academic Press, 478 p. <https://doi.org/10.1016/C2023-0-51092-4>
- Florinsky I.V. 2009. Computation of the Third Order Partial Derivatives from a Digital Elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(2): 213–231. <https://doi.org/10.1080/13658810802527499>
- Gallant J.C., Dowling T.I. 2003. A Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness for Mapping Depositional Areas. *Water Resources Research*, 39(12): 1347–1359. <https://doi.org/10.1029/2002WR001426>

- Ghalley R.K., Tantanee S., Nusit K., Chidburee P., Soonthornnonda P., Tai C.H. 2026. A GIS-Based Logistic Regression Model for Groundwater Spring Potential Mapping in the Gamri Chhu basin, Bhutan. *International Journal of Geoinformatics*, 22(5): 36–58. <https://doi.org/10.52939/ijg.v22i5.4979>
- Hawker L., Uhe P., Neal J., Paulo L. Sosa J., ... Sampson C. 2022. A 30 m Global Map of Elevation with Forests and Buildings Removed. *Environmental Research Letters*, 17(2): 024017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>.
- Iwahashi J., Pike R.J. 2007: Automated Classifications of Topography from DEMs by an Unsupervised Nested-Means Algorithm and a Three-Part Geometric Signature. *Geomorphology*, 86(3): 409–440. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>.
- Martinić I., Čanjevac I. 2024. Distribution and Characteristics of Springs in Two Neighboring Areas of Different Morphogenic Relief Type – Example of SW Medvednica Mountain (Central Croatia). *Water*, 16(7): 994. <https://doi.org/10.3390/w16070994>
- Mocior E., Rzonca B., Siwek J., Plenzler J., Placzowska E., ... Zdziebko D. 2015. Determinants of the Distribution of Springs in the Upper Part of a Flysch Ridge in the Bieszczady Mountains in Southeastern Poland. *Episodes Journal of International Geoscience*, 38(1): 21–30. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2015/v38i1/003>
- Moghaddam D.D., Rahmati O., Haghizadeh A., Kalantari Z. 2020. A Modeling Comparison of Groundwater Potential Mapping in a Mountain Bedrock Aquifer: QUEST, GARP, and RF Models. *Water*, 12(3): 679. <https://doi.org/10.3390/w12030679>
- Niraula R.R., Sharma S., Pokharel B.K., Paudel U. 2021. Spatial Prediction of Spring Locations in Data Poor Region of Central Himalayas. *Hydrology Research*, 52(2): 492–505. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.223>
- Olaya V., Conrad O. 2009. Geomorphometry in SAGA. In: *Developments in soil science*. Ed. by T. Hengl, H.I. Reuter. Amsterdam, Elsevier: 293–308. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00012-3)
- Ozdemir A. 2011. Using a Binary Logistic Regression Method and GIS for Evaluating and Mapping the Groundwater Spring Potential in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey). *Journal of Hydrology*, 405(1): 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.015>
- Passy P., Théry S. 2018. The Use of SAGA GIS Modules in QGIS. In: *QGIS and Generic Tools*. Ed. by N. Baghdadi, C. Mallet, M. Zribi. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc.: 107–149. <https://doi.org/10.1002/9781119457091.ch4>
- Paudel M., Subedi D.S. 2025. Spatial Distribution of Spring Water Resources: a Study of Waling municipality, Nepal. *The Himalayan Geographers*, 16(1): 83–94. <https://doi.org/10.3126/thg.v16i1.92614>
- Pourtaghi Z.S., Pourghasemi H.R. 2014. GIS-Based Groundwater Spring Potential Assessment and Mapping in the Birjand Township, Southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, 22(3): 643–662. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1089-6>
- Rahmati O., Naghibi S.A., Shahabi H., Bui D.T., Pradhan B., ... Melesse A.M. 2018. Groundwater Spring Potential Modelling: Comparing the Capability and Robustness of Three Different Modeling Approaches. *Journal of Hydrology*, 565: 248–261. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.027>
- De Reu J., Bourgeois J., Bats M., Zwertvaegher A., Gelorini V., ... Crombé P. 2013. Application of the Topographic Position Index to Heterogeneous Landscapes. *Geomorphology*, 186(15): 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015>
- Wickham H. 2016. *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (2nd Edition). New York, Springer-Verlag, 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>.
- Williams M.A., Vondracek B. 2010. Spring Distributions and Relationships with Land Cover and Hydrogeologic Strata in a Karst Landscape in Winona County, Minnesota, USA. *Carbonates and Evaporites*, 25(4): 333–347. <https://doi.org/10.1007/s13146-010-0037-y>

*Поступила в редакцию 29.06.2026;
поступила после рецензирования 20.07.2026;
принята к публикации 07.09.2026*

*Received June 29, 2026;
Revised July 20, 2026;
Accepted September 07, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Украинский Павел Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Нарожняя Анастасия Григорьевна, кандидат географических наук, доцент кафедры природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Хомутовская Анна Григорьевна, магистрант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Ukrainskiy, Associate Professor of the Department of Geography, Geoecology and Life Safety, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Anastasia G. Narozhnyaya, Associate Professor of the Department of Nature Management and Land Cadastre Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Anna G. Khomutovskaya, Master's Student, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia