

УДК 504.453 (470.325)
DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-3-533-547
EDN PRDWRL

Распределение густоты речной сети Белгородской области вдоль географических градиентов

Украинский П.А., Нарожняя А.Г.

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

Аннотация. Цель исследования – дать количественное описание наиболее общим закономерностям географии речной сети Белгородской области. Анализировался векторный слой рек, созданный на основе карт масштаба 1:100000. Изучено распределение густоты речной сети вдоль пяти географических градиентов (градиент высот и четыре горизонтальных градиента – северный, восточный, юго-восточный и северо-восточный). Белгородская область была разделена на полосы вдоль градиентов с шагом 5 км (5 м для градиента высот), в которых подсчитана густота речной сети. Полученные ряды данных проанализированы на наличие тренда, точек переломов и циклов. Обнаружено, что густота речной сети уменьшается с увеличением высоты местности и при движении по восточному, юго-восточному и юго-западному градиентам. Для северного градиента тренд не обнаружен. Точки перелома наблюдаются на высотном (95 и 140 м), восточном (70 и 180 км), юго-восточном (70 км) и северо-восточном градиентах (120 и 200 км). Направление тренда после точек перелома всегда сохраняется. Статистически значимые циклы наблюдаются на высотном (размер цикла 15 м), северном (50 км) и северо-восточном градиентах (65 км).

Ключевые слова: речная сеть, Белгородская область, географический градиент, пространственный тренд, точки перелома временного ряда, вейвлет-анализ

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. 2025. Распределение густоты речной сети Белгородской области вдоль географических градиентов. Региональные геосистемы, 49(3): 533–547. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-533-547 EDN: PRDWRL

Distribution of River Network Density along Geographical Gradients in the Belgorod Region

Pavel A. Ukrainskiy, Anastasia G. Narozhnyaya
Belgorod State National Research University
85 Pobedy St, Belgorod 308015, Russia
pa.ukrainski@gmail.com, narozhnyaya_a@bsuedu.ru

Abstract. The article provides a quantitative description of the most general patterns of the river network geography in the Belgorod region. A vector layer of rivers based on 1:100,000 scale maps was analyzed. The study was focused on the distribution of river network density along five geographic gradients (the elevation gradient and four horizontal gradients: the northern, the eastern, the southeastern, and the northeastern ones). The Belgorod region was divided into strips along the gradients with a step of 5 km (5 m for the elevation gradient), in which the river network density was calculated. The data series obtained were analyzed for a trend, breakpoints, and cycles. The study shows that the river network density decreases with increasing terrain altitude and when moving along the eastern, southeastern, and southwestern gradients. No trend was found for the northern gradient. The turning points are observed on the altitudinal gradient (95 and 140 m), the eastern (70 and 180 km), the southeastern (70 km) and the

northeastern gradient (120 and 200 km). The trend direction is always preserved after the turning points. Statistically significant cycles were detected on the altitudinal gradient (cycle size 15 m), the northern gradient (50 km), and the northeastern one (65 km).

Keywords: river network, Belgorod region, geographic gradient, spatial trend, time series breakpoints, wavelet analysis

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: Ukrainsky P.A., Narozhnaya A.G. 2025. Distribution of River Network Density along Geographical Gradients in the Belgorod Region. *Regional Geosystems*, 49(3): 533–547 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-533-547 EDN: PRDWRL

Введение

Белгородская область обладает неоднородной по густоте речной сетью. Современная география речной сети определяется на ее территории сочетанием природных и антропогенных факторов. К природным факторам относится климат (изменение условий увлажнения по территории области), рельеф (положение на Среднерусской возвышенности) и геологическое строение [Хижняк, 1975; Лисецкий и др., 2015]. К антропогенным факторам относится вырубка лесов и распашка территории в историческом прошлом [Антипов, 1959; Chendev et al., 2008; Лисецкий и др., 2015]. Многие исследования сосредоточены именно на влиянии антропогенных факторов на изменение густоты речной сети в последние три века [Ченdev, Гончаров, 2000; Chendev et al., 2008; Белеванцев, 2013; Лисецкий и др., 2015; Петин и др., 2015; Шевченко, 2019]. Но и современная география густоты речной сети привлекает не меньшее внимание и неоднократно описывалась [Антипов, 1959; Chendev et al., 2008; Дмитриева, Фолимонова 2016; Лисецкий и др., 2015; Павлюк и др., 2022; Нарожняя, 2023]. Ее описания выполнялись в основном на данных визуального анализа карт речной сети или карт густоты речной сети. Количественная оценка густоты речной сети проводилась в разрезе речных бассейнов [Нарожняя, 2023] или по ячейкам регулярной сетки [Нечетова, Нарожняя, 2010].

Эта работа посвящена количественному изучению изменения густоты речной сети вдоль географических градиентов. Географический градиент – это линия пространственного профиля (вертикального или горизонтального), по единичным отрезкам которого оцениваются явления, объекты и их свойства [Бакланов, 2021]. В научной литературе широко представлены работы, посвященные изучению географического градиента фитомассы и биоразнообразия растительности [Усольцев и др., 2022; Nishizawa et al., 2022]. Гораздо меньше работ по фауне и очень мало по изменению иных компонентов ландшафтов [Коломыш, 2018]. Выявлению географического градиента функционирования рек посвящены работы Б.И. Гарцмана [Gartsman, 2013]. За рубежом подобные работы известны для рек Андского региона Южной Америки [Habit et al., 2022].

Цель этой работы – сравнение изменений густоты речной сети вдоль разных географических градиентов (вертикального градиента и горизонтальных градиентов, проведенных по сторонам света). Проведение такого сравнения позволит выяснить, для какого из географических градиентов характерен наибольший размах густоты речной сети, существует ли в географии густоты речной сети трендовая составляющая, на каком географическом градиенте тренд наиболее выражен, присутствуют ли точки переломов густоты речной сети на географических градиентах, есть ли в географии густоты речной сети циклическая составляющая, на каких географических градиентах она присутствует, какой размер существующих циклов. В совокупности ответы на эти вопросы дадут наиболее обобщенное количественно описание географии густоты речной сети Белгородской области.

Объекты и методы исследования

Белгородская область расположена на южных и юго-западных склонах Среднерусской возвышенности в бассейнах рек Днепра и Дона. Охватывая лесостепную и степную зоны, территория представляет собой возвышенную равнину, приподнятую в северной части и имеющую слабо выраженные уклоны на запад – юго-запад и восток – юго-восток, сильно расчлененную овражно-балочной сетью – лошинами, балками, оврагами. Площадь Белгородской области составляет 27,1 тыс. км², протяженность с севера на юг – 190 км, с запада на восток – 275 км [Антипов, 1959; Хижняк, 1975; Природные ресурсы..., 2007; Дегтярь и др., 2016].

Исходными пространственными данными стали три слоя: векторный слой речной сети Белгородской области (шнейп-файл с линейной геометрией), векторный слой границ Белгородской области (шнейп-файл с полигональной геометрией) и цифровая модель рельефа (ЦМР, растровый слой в формате *geotIFF*). Все исходные данные к моменту начала представленного здесь исследования уже существовали. Они были созданы Федерально-региональным центром аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов (НИУ «БелГУ») в ходе разработки концепции бассейнового природопользования для территории Белгородской области [Кузьменко и др., 2013; Лисецкий, Панин, 2013]. Детальность векторных слоев соответствует масштабу карт 1:100000 [Топографические ..., 2025]. Пространственное разрешение ЦМР составляет 30 м/пиксель. Все слои как исходные, так и созданные в процессе работы, имели единую систему координат проекции *UTM 37N WGS-84* (номер *EPSG 32637*).

Общий методический принцип, лежащий в основе работы, – это количественное описание географии густоты речной сети в предельно обобщенном виде. Предельный уровень обобщения подразумевает преобразование трехмерного пространства в несколько одномерных рядов. Эти одномерные ряды соответствуют географическим градиентам. Для изучения мы взяли пять географических градиентов – четыре горизонтальных и один вертикальный. Горизонтальные градиенты – это четыре направления, пересекающие Белгородскую область с юга на север (северный или широтный градиент), с запада на восток (восточный или долготный градиент), с северо-запада на юго-восток (юго-восточный градиент, перпендикулярный оси Волги) и с юго-запада на северо-восток (северо-восточный градиент, параллельный оси Волги). Вертикальный (высотный) градиент соответствует смене абсолютной высоты от минимальной до максимальной. Каждый географический градиент был разделен на равные отрезки. Горизонтальные градиенты мы разделили на отрезки, равные 5 км, а вертикальный градиент был разделен на отрезки с перепадом высот 5 м. Внутри этих отрезков была подсчитана густота речной сети. В результате были получены ряды чисел, по структуре аналогичные временным рядам. Но вместо времени в них используется изменение расстояния или абсолютной высоты. К таким пространственным рядам можно применять те же методы статистического анализа, что и к временным рядам. Идея применения методов анализа временных рядов к рядам пространственных данных не нова. Пример такого подхода опубликован в работе Гусарова и Шарифуллина [Шарифуллин, Гусаров, 2025].

Работа состояла из двух этапов. Первый этап заключался в подготовке данных к анализу. Были созданы векторные полигональные слои географических градиентов и в них подсчитана густота речной сети. Для обработки данных на первом этапе использовались программы *ArcGIS 10.2* и *QGIS 3.16*. На втором этапе проводился статистический анализ собранных данных. Для этого использовался язык программирования *R 4.1.0* [R Core Team, 2021] и интегрированная среда разработки *Rstudio 1.4.1106*.

Для создания горизонтальных градиентов, представляющих собой параллельные полосы шириной 5 км, построен полигональный слой минимальной ограничивающей геометрии (МОГ) – прямоугольник, стороны которого проходят через крайние точки Белгородской области. С помощью параллельного копирования были созданы линии с расстоянием 5 км между ними. По этим линиям полигон МОГ был разрезан на полосы. Для восточного градиента

линии разрезов прокладывались параллельно западной стороне МОГ; для северного градиента – параллельно южной стороне МОГ; для юго-восточного – параллельно линии азимутом 45° , проходящей через северо-западный угол МОГ; для северо-восточного – параллельно линии азимутом 135° , проходящей через юго-западный угол МОГ.

Все полигональные слои горизонтальных градиентов были обрезаны по слою границ Белгородской области. После этого была рассчитана площадь каждого полигона в слоях градиентов. Затем в *QGIS* была подсчитана суммарная длина речной сети в полигонах. С учетом данных площади полигонов и суммарной длины речной сети в них была рассчитана густота речной сети. Слой вертикального градиента представляет собой полигоны, разделенные по изогипсам с интервалом, кратным 5 м. Для создания этого слоя была проведена переклассификация ЦМР, т. е. преобразование ее из непрерывного растра в дискретный. Далее дискретный растр был преобразован в векторный слой с полигональной геометрией. Подсчет густоты речной сети в полигонах этого слоя выполнен аналогично горизонтальным градиентам.

Статистический анализ включал в себя проверку рядов на наличие линейного тренда, точек перелома, выбросов и циклических колебаний. Проверка рядов на наличие линейного тренда выполнена с помощью непараметрического теста Манна – Кендалла. Для этого использован дополнительный пакет *trend* языка *R* [Pohlert, 2020]. Поиск выбросов в рядах выполнен с помощью метода, предложенного *Chen* и *Liu*, с помощью инструментов из дополнительного пакета *tsoutliers* языка *R* [Chen, Liu, 1993; Lopez-de-Lacalle, 2024]. Выделение точек переломов выполнено с помощью дополнительного пакета *strucchange* [Zeileis et al., 2002; 2003]. В этом пакете реализован алгоритм выделения нескольких точек переломов, который был предложен *Bai* и *Perron* [Bai, Perron, 2003]. При поиске точек перелома задан минимальный размер сегмента, равный $0,15 \times L$, где L – длина ряда. Поиск циклических колебаний в рядах выполнен с помощью вейвлет-анализа. Для этого применялся дополнительный пакет *WaveletComp* 1.1 языка *R* [Roesch, Schmidbauer, 2018]. В пакете *WaveletComp* для вычисления спектра мощности используется вейвлет Морле (*Morlet*). Для генерации суррогатных временных рядов мы использовали метод белого шума. Число симуляций, необходимых для оценки статистической значимости периодов колебаний, было задано нами равным 30000.

Результаты и их обсуждение

При подъеме вдоль вертикального (высотного) градиента от 70 до 250 м густота речной сети уменьшается (рис. 1А). Размах значений на этом градиенте составляет 2,16 км/км² (максимальное значение – 2,17, минимальное – 0,01 км/км²). На высотах более 250 м речная сеть отсутствует. Территории выше 250 м относятся к верхней ландшафтно-высотной ступени по Ф.Н. Милькову [Михно, Горбунов, 2001]. В Белгородской области это наиболее возвышенная часть Донецко-Сеймского междуречного плато [Антимонов, 1959]. Территориям с нулевой густотой речной сети соответствуют семь крайних (верхних) наблюдений на вертикальном градиенте. Эти наблюдения были исключены из статистического анализа и на рис. 1А не показаны.

В отличие от вертикального градиента, на котором есть целый ряд наблюдений с нулевой густотой речной сети, на горизонтальных градиентах нулевые значения густоты речной сети представлены только единичными наблюдениями. По линии запад – восток присутствует одно нулевое значение (рис 1Б). Это крайнее восточное наблюдение. Соответствующая ему пятикилометровая полоса охватывает приводораздельную территорию в бассейне Сармы (приток Айдара). По линии, идущей с юго-запада на северо-восток (рис. 1Г), выявлены два нулевых значения. Это крайнее юго-западное наблюдение и крайнее северо-восточное наблюдение. Соответствующие им пятикилометровые полосы охватывают приводораздельные территории в бассейне рек Понуры (приток Ворсклы) и Потудань соответственно. Крайние наблюдения с нулевыми значениями были исключены из статистического анализа горизонтальных градиентов и на рис. 1 не отражены.

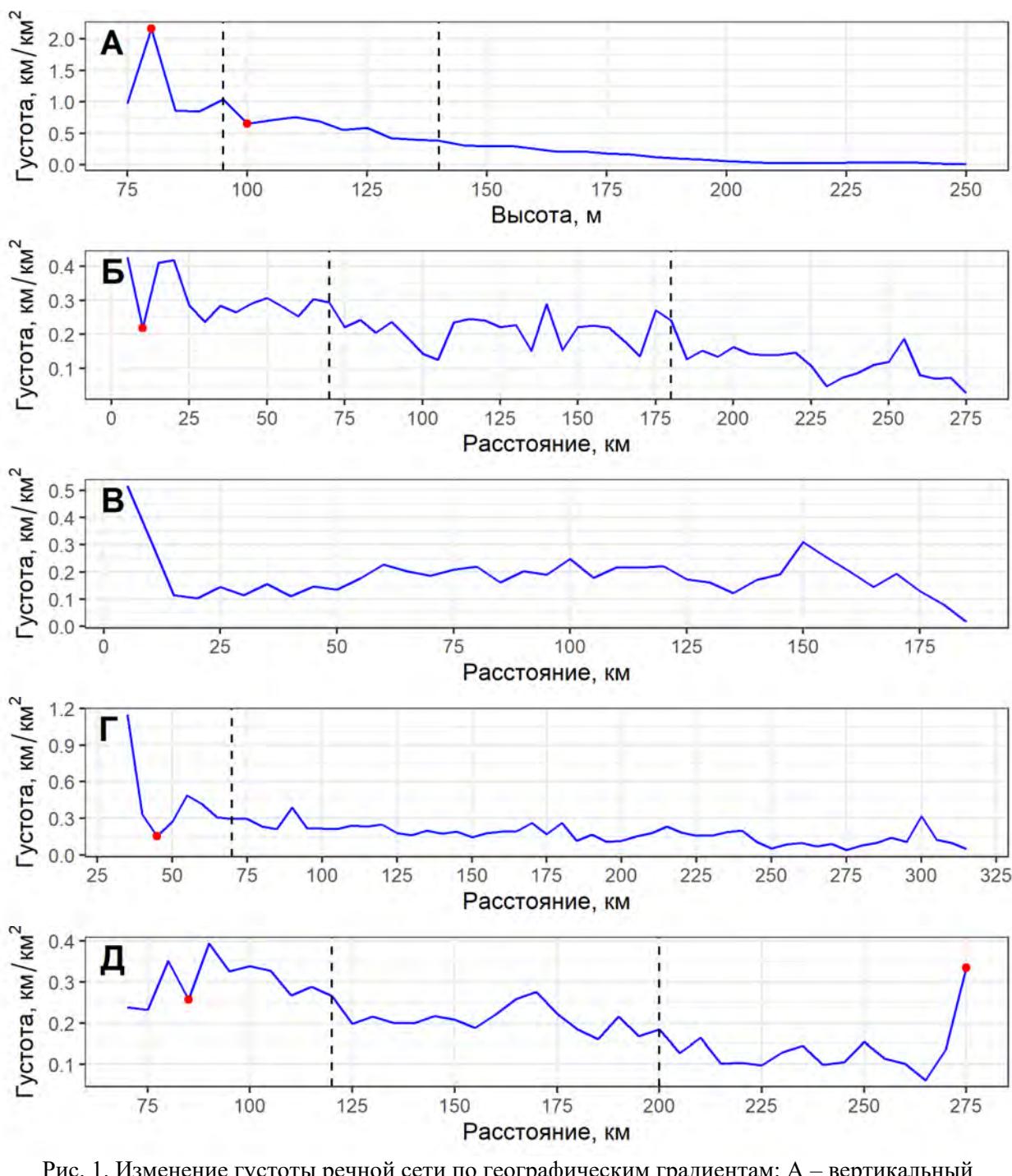


Рис. 1. Изменение густоты речной сети по географическим градиентам: А – вертикальный градиент, Б – восточный градиент, В – северный градиент, Г – юго-восточный градиент, Д – северо-восточный градиент. Пунктирные линии – точки переломов, красные точки – выбросы

Fig. 1. Change in river network density along geographic gradients: А – vertical gradient, Б – eastern gradient, В – northern gradient, Г – southeastern gradient, Д – northeastern gradient. Dashed lines – breakpoints, red points – outliers

При движении вдоль трех горизонтальных градиентов (с запада на восток, с северо-запада на юго-восток и с юго-запада на северо-восток) наблюдается уменьшение густоты речной сети (рис. 1Б, Г, Д). При движении вдоль четвертого горизонтального градиента (линия юг – север) четких закономерностей изменений густоты речной сети не наблюдается (рис. 1Б). Размах значений густоты речной сети на горизонтальных градиентах меньше, чем на вертикальном. Среди горизонтальных градиентов максимальных размах наблюдается у юго-

восточного градиента (линия с северо-запада на юго-восток). Он равен $1,11 \text{ км}/\text{км}^2$ (максимальное значение – $1,15 \text{ км}/\text{км}^2$, минимальное – $0,04 \text{ км}/\text{км}^2$). Для восточного градиента (линия запад – восток) он составляет $0,50 \text{ км}/\text{км}^2$ (максимальное значение – $0,43 \text{ км}/\text{км}^2$, минимальное значение – $0,03 \text{ км}/\text{км}^2$). Для северного градиента (линия юг – север) размах равен $0,40 \text{ км}/\text{км}^2$ (максимальное значение – $0,52 \text{ км}/\text{км}^2$, минимальное значение – $0,02 \text{ км}/\text{км}^2$). Для северо-восточного градиента (линия с юго-запада на северо-восток) размах равен $0,33 \text{ км}/\text{км}^2$ (максимальное значение – $0,39 \text{ км}/\text{км}^2$, минимальное значение – $0,06 \text{ км}/\text{км}^2$).

Визуально наблюдаемые на графиках тенденции (см. рис. 1) подтверждаются результатами количественного анализа наличия линейного тренда с помощью теста Манна – Кендалла (табл. 1). Статистически значимый тренд ($p < 0,05$) обнаружен для четырех географических градиентов из пяти – для высотного, восточного (линия запад – восток), юго-восточного (линия с северо-запада на юго-восток) и северо-восточного градиентов (линия с юго-запада на северо-восток). Отсутствует линейный тренд только для северного градиента (линия юг – север). Для него густота речной сети колеблется вокруг среднего значения $0,19 \text{ км}/\text{км}^2$, не показывая устойчивого понижения или повышения по мере продвижения с юга на север.

Таблица 1
 Table 1

Результаты теста Манна – Кендалла на наличие линейного тренда
 Results of the Mann – Kendall test for linear trend

Градиент	τ -коэффициент	z -критерий	p -значение
Вертикальный (высотный)	–0,91	–7,84	$5,96 \times 10^{-15}$
Горизонтальные	Восточный	–0,65	$1,90 \times 10^{-12}$
	Северный	0,003	0,99
	Юго-восточный	–0,59	$1,22 \times 10^{-10}$
	Северо-восточный	–0,60	$2,24 \times 10^{-8}$

Отрицательные значения τ -коэффициента указывают на нисходящий тренд – уменьшение густоты речной сети вдоль указанных выше четырех географических градиентов (см. табл. 1). Абсолютное значение τ -коэффициента характеризует степень выраженности тренда. Наиболее явный тренд наблюдается у вертикального (высотного) градиента. Среди горизонтальных градиентов тренд наиболее выражен у восточного градиента (линия запад – восток). То есть для Белгородской области основной закономерностью географии густоты речной сети является ее уменьшение в направлении с запада на восток. Таким образом, анализ с помощью теста Манна – Кендалла подтверждает выводы, сделанные в предыдущих исследованиях [Антипов, 1959; Лисецкий и др., 2015; Нарожняя, 2023] на основе визуального анализа карт густоты речной сети.

Однако визуальный анализ карт густоты речной сети отличается субъективностью восприятия. Поэтому такой анализ может приводить к близкому, но отличающемуся от нашего, выводу, что сильнее всего уменьшается густота речной сети в направлении с северо-запада на юго-восток. Этот вывод кажется очень логичным, так как этот градиент перпендикулярен оси Воейкова, а значит, должен быть климатически обусловленным. Но при визуальном анализе карт густоты речной сети может вводить в заблуждение диапазон значений по линии с северо-запада на юго-восток. Внимание наблюдателя обращается в первую очередь на контраст между высокими и низкими значениями густоты речной сети на разных концах этого градиента, а не на характер перехода между крайними значениями. А тест Манна – Кендалла анализирует именно устойчивость тренда. И этот статистический тест показывает, что тренд по направлению с северо-запада на юго-восток выражен слабее, чем по направлению с запада на восток.

Обнаруженные в рядах данных тренды осложняются наличием выбросов (табл. 2), точек переломов (табл. 3) и цикличности (рис. 3). Однако выбросы в данных малочисленные. Для четырех из пяти географических градиентов суммарно к выбросам можно отнести только шесть наблюдений (табл. 3). Отрицательные выбросы встречаются чаще. К отрицательным выбросам относится четыре наблюдения, а к положительным – два. На северном градиенте (линия север – юг) выбросы обнаружены не были. Коэффициент напряженности указывает на степень выраженности выброса. Чем больше абсолютное значение коэффициента напряженности, тем сильнее выброс. На вертикальном градиенте выбросы более сильные, чем на горизонтальных градиентах.

Таблица 2
Table 2Выбросы в рядах данных густоты речной сети
Outliers in river network density data series

Градиент	Расстояние, км / высота, м*	Коэффициент напряженности	t-критерий	p-значение
Вертикальный	80	1,25	25,00	$6,56 \times 10^{-24}$
	100	-0,23	-4,52	$6,77 \times 10^{-5}$
Горизонтальные	Восточный	10	-0,18	-3,87
	Северный	Выбросы не обнаружены		
	Юго-восточный	45	-0,66	$5,84 \times 10^{-13}$
	Северо-восточный	85	-0,12	-4,05
		275	0,20	$1,71 \times 10^{-5}$

Примечание: * – для высотного градиента положение выбросов обозначено в м, для горизонтальных градиентов – в км.

Таблица 3
Table 3Переломы в рядах данных густоты речной сети
Breakpoints in river network density data series

Градиент	Положение точек перелома, км или м*	Сегменты градиента, км или м*	Среднее сегмента, км/км ²
Вертикальный (высотный)	95 и 140	70–95	1,18
		96–140	0,57
		141–250	0,12
Горизонтальные	Восточный	0–70	0,31
		71–180	0,21
		181–275	0,11
	Северный	Точек переломов не обнаружено	
	Юго-восточный	0–70	0,43
		71–285	0,17
	Северо-восточный	70–120	0,30
		121–200	0,21
		201–275	0,13

Примечание: * – для высотного градиента положение точек перелома обозначено в м, для горизонтальных градиентов – в км.

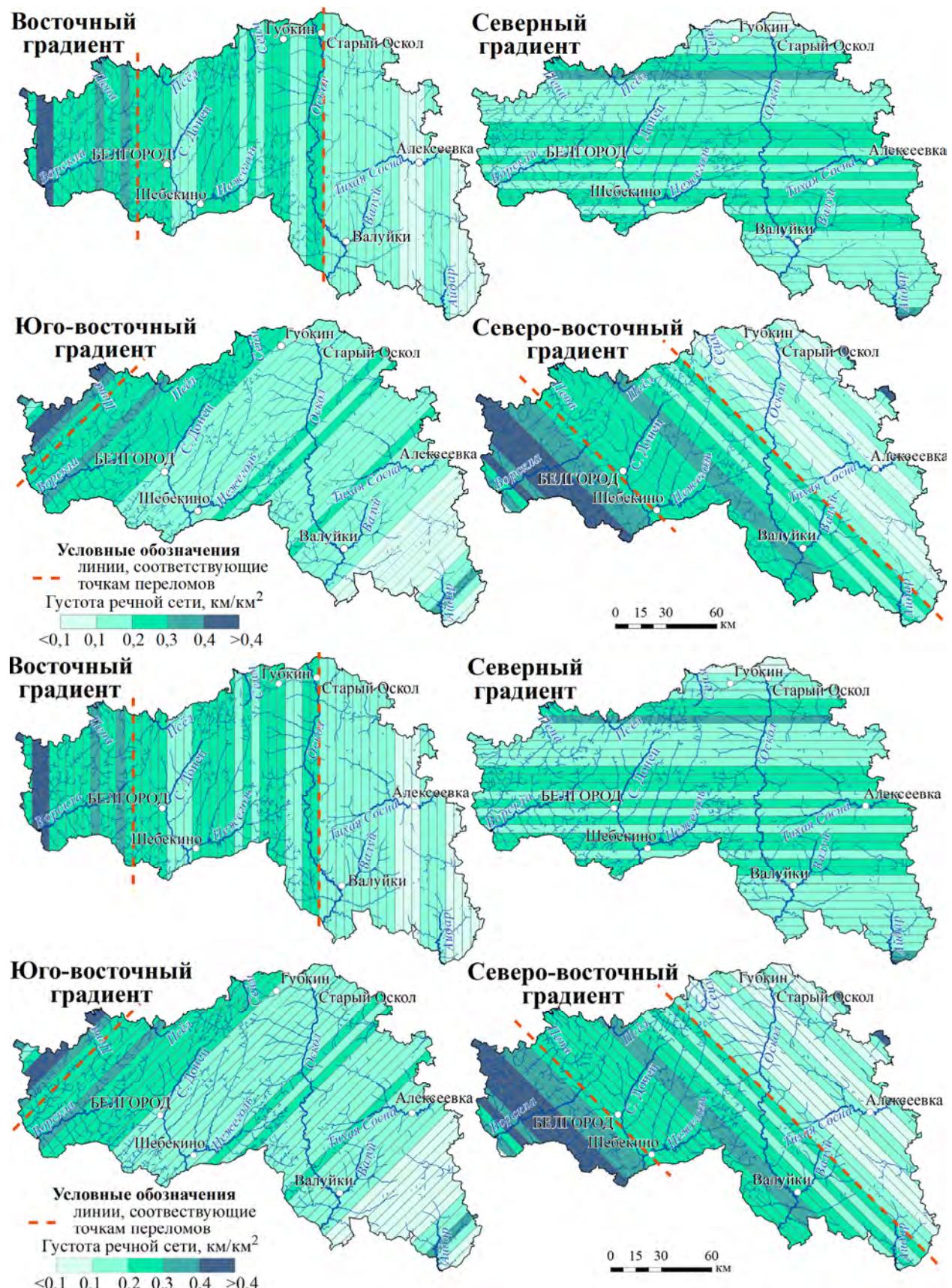


Рис. 2. Линии, соответствующие точкам переломов густоты речной сети
 на географических градиентах

Fig. 2. Lines corresponding to the breakpoints in the density of the river network
 along the geographic gradients

Точки переломов отмечены на всех градиентах, кроме северного (линия юг – север). На высотном, восточном и северо-восточном градиентах обнаружено две точки переломов (см. табл. 3). На юго-восточном – одна. В пространстве эти точки переломов для вертикального (высотного) градиента можно провести как соответствующие изогипсы. А для горизонтальных градиентов точки переломов в пространстве можно провести как линии, перпендикулярные оси градиента. Характерно, что во всех случаях после прохождения точки перелома направление изменения густоты речной сети не меняется – сохраняется тренд на уменьшение при движении по градиенту. Это видно по последовательному уменьшению среднего значения густоты речной сети между сегментами, на которые делят ряды данных точки переломов.

Для вертикального градиента наблюдаются две точки переломов. Первая – это изогипса 95 м, вторая – изогипса 140 м. Первая точка перелома примерно соответствует границе низкого пойменного яруса и возвышенного террасового яруса внутри нижней высотной-ландшафтной ступени по Ф.Н. Милькову [Frolov, Cherkashin, 2012; Михно, Горбунов, 2021]. Вторая точка перелома приблизительно соответствует границе между средней и нижней высотно-ландшафтной ступенями. Большая часть Белгородской области попадает в территории с высотами выше второй точки перелома [Нарожняя, Буряк, 2016]. Между высотами, соответствующими второй и первой точке перелома для вертикального градиента, расположены долины наиболее длинных рек Белгородской области – Ворсклы, Ворсклицы, Северского Донца, Нежеголи, Корня, Корочи, Оскола, Тихой Сосны, Черной Калитвы. На высотах ниже первой точки перелома находится долина Айдара, нижняя часть долин Тихой Сосны, Оскола и Потудани.

Для восточного градиента выделены две точки перелома (расстояние 70 и 180 км от начала отсчета). Первая точка перелома соответствует линии, отделяющей бассейны Ворсклы, Пены, Уды, Лопани и Харькова на западе от бассейна Северского Донца на востоке. С определенной натяжкой можно отождествить ее с водоразделом Днепра и Дона. Вторая точка перелома приблизительно соответствует долине Оскола. Ранее в литературе Оскол указывался как рубеж, к востоку от которого понижена плотность густоты речной сети, а к западу повышена [Антимонов, 1959; Лисецкий и др., 2015]. А вот водораздел Днепра и Дона в таком качестве указываться реже [Петин и др., 2015; Фолимонова, Дмитриева, 2016]. Видимо, это связано с тем, что различия густоты речной сети к востоку и к западу от водораздела Днепра и Дона выражены меньше, чем различия густоты речной сети к востоку и западу от Оскола. Так, для первого перелома на восточном градиенте это соотношение равно 1,5 к 1, а для второго перелома соотношение составляет уже 2 к 1 (см. табл. 3).

Для юго-восточного градиента выделена точка перелома на расстоянии 70 км от начала отсчета. Это соответствует линии, отделяющей с юго-востока от остальной области бассейны Илька, Бобравы, Солотины и нижнюю часть бассейна Пены. Эти территории являются частью бассейна Псёла и отличаются наибольшей густотой речной сети в Белгородской области.

Для северо-восточного градиента (линия с юго-запада на северо-восток) выделены две точки перелома, находящиеся на расстоянии 120 и 200 км от начала отсчета. Значение густоты речной сети между точками перелома и соотношение этих значений у северо-восточного градиента практически совпадают со значениями и соотношением у восточного градиента.

Первая точка перелома для северо-восточного градиента примерно соответствует линии, проходящей по долине реки Пена, отсекающей с запада верховья Ворсклы и далее проходящей по долине Северского Донца южнее впадения Везелки. Вторая точка перелома для северо-восточного градиента разделяет верхнюю и нижнюю часть бассейна Оскола в границах Белгородской области. Это линия раздела проходит к югу от впадения Беленькой в Оскол. Юго-восточнее этого места вторая точка перелома приблизительно соответ-

ствует водоразделу, к северо-востоку от которого лежат бассейны Потудани, Тихой Сосны и Черной Калитвы, а к юго-западу находятся бассейны Айдара и Валуя. Северо-восточнее впадения Беленькой в Оскол вторая точка перелома приблизительно соответствует линии, пересекающей Донецко-Сеймецкое междуречное плато и разделяющей бассейн Донецкой Сеймицы и бассейны притоков Северского Донца от остальной части бассейна Сейма и бассейнов правобережных притоков Оскола.

На наличие циклической составляющей в исследуемых рядах густоты речной сети указывают результаты вейвлет-анализа. На рис. 3 эти результаты представлены в виде графиков зависимости средней мощности вейвлета от величины периода. Пики на графиках соответствуют в данных циклическим колебаниям с соответствующим периодом. Для вертикального (высотного) градиента обнаружен один статистически значимый цикл значений густоты речной сети с периодом 15 м.

Для горизонтальных градиентов обнаруживаются сразу три-четыре цикла. Однако статистически значимыми ($p < 0,05$) из них являются только циклы с периодом 65 км для северо-восточного градиента и с периодом 50 км для северного градиента. Кроме того, если мы допускаем признание статистически значимыми колебаний при $p < 0,1$, то для северного градиента подтверждается еще второй цикл с периодом 80 км.

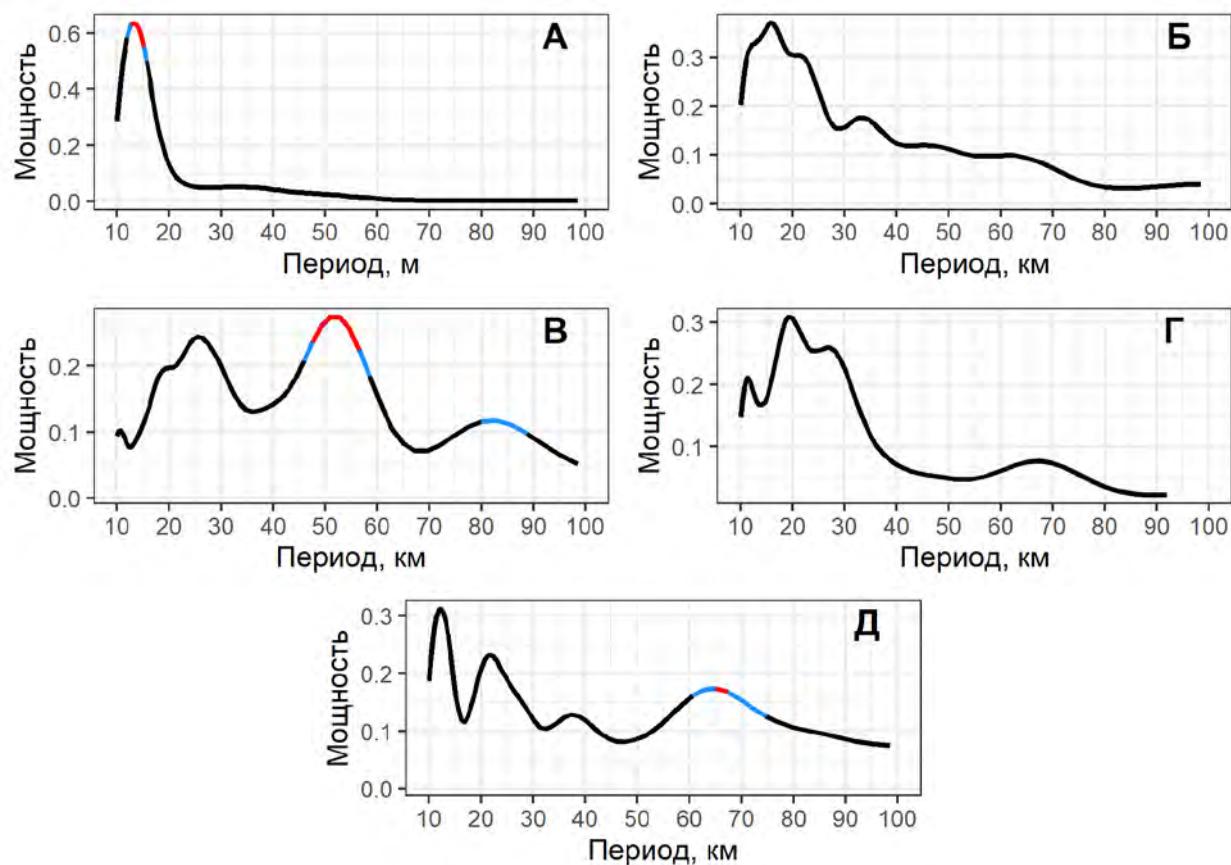


Рис. 3. Зависимость средней мощности вейвлета от величины периода: А – вертикальный градиент, Б – восточный градиент, В – северный градиент, Г – юго-восточный градиент, Д – северо-восточный градиент. Красная линия – $p < 0,05$, синяя линия – $p < 0,1$

Fig. 3. Dependence of the average wavelet power on the period value: А – vertical gradient, Б – eastern gradient, В – northern gradient, Г – southeastern gradient, Д – northeastern gradient. Red line – $p < 0.05$, blue line – $p < 0.1$

Цикличность в изменении густоты речной сети по горизонтальным градиентам может быть связана с рельефом территории. Размеры циклов в таком случае соответствуют размерам речных бассейнов. Циклы с более длинным периодом соответствуют размерам бассейнов меньших порядков. Циклы с более короткими периодами соответствуют бассейнам больших порядков. Но количественная проверка этого предположения требует проведения отдельного исследования.

Заключение

Для территории Белгородской области характерны следующие закономерности в изменении густоты речной сети вдоль основных географических градиентов:

1. Наибольший размах значений густоты речной сети (от 2,17 до 0,01 км/км²) наблюдается для высотного градиента. Среди горизонтальных градиентов наибольший размах значений (от 1,15, до 0,04 км/км²) наблюдается на юго-восточном градиенте (линия с северо-запада на юго-восток).

2. Трендовая составляющая в изменении густоты речной сети присутствует во всех рассмотренных географических градиентах, кроме северного (широтный градиент, линия юг – север). Сильнее всего тренд выражен на вертикальном (высотном) градиенте. Среди горизонтальных градиентов тренд сильнее всего выражен у восточного градиента (долготный градиент, линия запад – восток).

3. Для высотного градиента тренд состоит в уменьшении густоты речной сети по мере снижения высоты местности. Для горизонтальных градиентов тренды заключаются в уменьшении густоты речной сети при движении с запада на восток, с северо-запада на юго-восток и с юго-запада на северо-восток.

4. Точки перелома наблюдаются на высотном (абсолютные высоты 95 и 140 м), восточном (70 и 180 км от начала отсчета), юго-восточном (70 км от начала отсчета) и северо-восточном градиентах (120 и 200 км от начала отсчета). При прохождении точки перелома наблюдается относительно резкое изменение густоты речной сети, но направление тренда при этом сохраняется.

5. Статистически значимые циклы изменения густоты речной сети отмечаются при движении вдоль высотного, северного (широтный градиент, линия юг – север) и северо-восточного градиентов. Для высотного градиента такой цикл равен 15 м высоты. Для северного градиента он равен 50 км расстояния, а для северо-восточного – 65 км расстояния.

6. Методы анализа густоты речной сети, описанные в этой работе, могут быть применены для других территорий, для картографических данных иных масштабов и ЦМР, построенных различными способами (включая гидрологически корректные ЦМР).

Список источников

- Топографические карты Белгородской области. Масштаб 1:100000. Состояние местности на 1981–1990 год. Электронный ресурс. URL: <https://satmaps.info> (дата обращения 12.04.2025).
- Lopez-de-Lacalle J. 2024. tsoutliers: Detection of outliers in time series. R package version 0.6-10. Electronic resource. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=tsoutliers> (date accessed 04.04.2025).
- Pohlert T. 2020. Trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.4. Electronic resource. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=trend> (date accessed 08.04.2025).
- 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 accessed 12.04.2025).
- Roesch A., Schmidbauer H. 2018. WaveletComp: Computational Wavelet Analysis. R Package Version 1.1. Electronic resource. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=WaveletComp> (date accessed 21.04.2025).

Список литературы

- Антипов Н.А. 1959. Природа Белгородской области. Белгород, Белгородское книжное издательство, 240 с.
- Бакланов П.Я. 2021. Географические градиенты как измерение географического пространства. В кн.: Геосистемы Северо-Восточной Азии: природа, население, хозяйство территории. Сборник трудов конференции, Владивосток, 02–23 апреля 2021 года. Владивосток, Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения РАН: 11–13. <https://doi.org/10.35735/tig.2021.56.55.002>
- 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.
- Дегтярь А.В., Григорьева О.И., Татаринцев Р.Ю. 2016. Экология Белогорья в цифрах. Белгород, КОНСТАНТА, 122 с.
- 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 года. Пермь, ПГНИУ: 121–125.
- Коломыц Э.Г. 2018. Избранные очерки географической экологии: Часть I. Базовый ландшафтно-экологический анализ. Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии, 27(1): 15–129. <https://doi.org/10.24411/2073-1035-2018-10002>
- 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., Землякова А.В., Маринина О.А. 2015. Реки и водные объекты Белогорья. Белгород, КОНСТАНТА, 362 с.
- Лисецкий Ф.Н., Панин А.Г. 2013. Бассейновая концепция природопользования на сельских территориях Белгородской области. Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук, 1: 48–51.
- Михно В.Б. Горбунов А.С. 2001. Высотно-ландшафтные комплексы мелового юга Среднерусской возвышенности. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 1: 16–24.
- 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, Белгородский государственный национальный исследовательский университет: 173–178.
- Нарожная А.Г., Буряк Ж.А. 2016. Морфометрический анализ цифровых моделей рельефа Белгородской области разной степени генерализации. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 25(246): 169–178.
- Нечетова Ю.В., Нарожная А.Г. 2010. Изучение овражно-балочной сети Белгородской области с применением ГИС-технологий. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, 11(71): 96–100.
- Павлюк Я.В., Саблина О.М., Смирнова С.Б. Гладкая К.А. 2022. Анализ закономерностей развития линейной эрозии в бассейнах рек на юге Среднерусской возвышенности с использованием ГИС. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 14(3): 192–212. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-192-212>
- 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>
- Природные ресурсы и окружающая среда Белгородской области. 2007. Под ред. С.В. Лукина. Белгород, БелГУ, 556 с.
- Усольцев В.А., Цепордей И.С., Данилин И.М. 2022. Охвоенность побегов сосны обыкновенной в географических градиентах Евразии. Хвойные бореальной зоны, 40(4): 303–311. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-6-303-311>

- Хижняк А.А. 1975. Природные ресурсы земли Белгородской. Воронеж, Центрально-Черноземное книжное издательство, 126 с.
- Ченdev Ю.Г. Гончаров Н.Е. 2000. Деградация речной сети Белгородской области. В кн.: Экологическая безопасность и здоровье людей в XXI веке. Статьи, краткие сообщения и тезисы докладов VI Всероссийской научно-практической конференции, Белгород, 10–12 октября 2000. Белгород, Белгородский государственный университет: 70–73.
- Шарифуллин А.Г., Гусаров А.В. 2025. Особенности размещения и морфометрические характеристики бобровых плотин и прудов на малых реках возвышенностей степной зоны Поволжья. Известия Русского географического общества, 156(4): 423–440. <https://doi.org/10.31857/S0869607124040129>
- 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>
- Bai J., Perron P. 2003. Computation and Analysis of Multiple Structural Change Models. *Journal of applied econometrics*, 18(1): 1–22. <https://doi.org/10.1002/jae.659>
- Chen C., L.-M. Liu. 1993. Joint Estimation of Model Parameters and Outlier Effects in Time Series. *Journal of the American Statistical Association*, 88(421): 284–297. <https://doi.org/10.1080/01621459.1993.10594321>
- Chendev Yu.G., Petin A.N., Serikova E.V. Kramchaninov N.N. 2008. Degradation of Geosystems in the Belgorod Region as a Result of the Economic Activities. *Geography and Natural Resources*, 29(4): 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.gnr.2008.10.010>
- Frolov A.A., Cherkashin A.K. 2012. Altitudinal Gradient as a Complex Factor for Formation of Landscape Microzonality and Geosystem Serialness. *Geography and Natural Resources*, 33(1): 10–18. <https://doi.org/10.1134/S1875372812010027>
- Gartsman B.I. 2013. Analysis of Geomorphological Conditions for Primary Streams Formation Using Digital Elevation Models. *Geography and Natural Resources*, 34(1): 69–78. <https://doi.org/10.1134/S1875372813010101>
- Habit E., Zurita A., Díaz G., Manosalva A., Arriagada P., Link O., Górska K. 2022. Latitudinal and Altitudinal Gradients of Riverine Landscapes in Andean Rivers. *Water*, 14(17): 2614. <https://doi.org/10.3390/w14172614>
- Nishizawa K., Shinohara N., Cadotte M.W., Mori A.S. 2022. The Latitudinal Gradient in Plant Community Assembly Processes: a Meta-Analysis. *Ecology Letters*, 25(7): 1711–1724. <https://doi.org/10.1111/ele.14019>
- Zeileis A., Kleiber C., Kramer W., Hornik K. 2003. Testing and Dating of Structural Changes in Practice. *Computational Statistics & Data Analysis*, 44(1–2): 109–123. [https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(03\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(03)00030-6)
- Zeileis A., Leisch F., Hornik K., Kleiber C. 2002. Strucchange: an R Package for Testing for Structural Change in Linear Regression Models. *Journal of statistical software*, 7(2): 1–38. <https://doi.org/10.18637/jss.v007.i02>

References

- Antimonov N.A. 1959. Priroda Belgorodskoy oblasti [Nature of the Belgorod region]. Belgorod, Pabl. Belgorod book, 240 p.
- Baklanov P.Ya. 2021. Geographical Gradients – as a Measurement of Geographical Space. In: Geosystems of Northeast Asia: Nature, Population, Economy of the Territory. Conference Proceedings, Vladivostok, 02–23 April 2021. Vladivostok, Pabl. Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of the RAS: 11–13 (in Russian). <https://doi.org/10.35735/tig.2021.56.55.002>
- 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).
- Degtyar A.V., Grigorieva O.I., Tatarintsev R.Yu. 2016. Ecology of Belgorod in Figures. Belgorod, Pabl. CONSTANTA, 122 p. (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, Pabl. PSNRU: 121–125 (in Russian).
- Kolomyts E.G. 2018. Selected Essays of Geographical Ecology: Part I. Basic Landscape Ecological Analysis. Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii, 27(1): 15–129 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2073-1035-2018-10002>
- Kuzmenko Ya.V., Lisetskiy F.N., Kirilenko Ja.A., Grigoryeva 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., Zemlyakova A.V., Marinina O.A. 2015. Reki i vodnye ob"ekty Belgorod'ya [Rivers and Water Bodies of Belogorye]. Belgorod, Pabl. CONSTANTA, 362 p.
- Lisetskiy F.N., Panin A.G. 2013. Basin Conception of Nature Use in Rural Areas of Belgorod Oblast. Vestnik of the Russian agricultural science, 1: 48–51 (in Russian).
- Mikhno V.B., Gorbunov A.S. 2001. Vysotno-landscape complexes of the chalk south of the Central Russian Upland. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya, 1: 16–24.
- 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, Pabl. Belgorod National Research University: 173–178.
- Narozhnyaya A.G., Buryak Zh.A. 2016. Morphometric Analysis of Digital Elevation Models of the Belgorod Region at Different Degrees of Generalization. Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences series, 25(246): 169–178 (in Russian).
- Nechetova Yu.V., Narozhnyaya A.G. 2010. Study of Gullies and Ravines Network Within Belgorod Region Using GIS Technology. Land Management, Monitoring and Cadastre, 11(71): 96–100 (in Russian).
- Pavlyuk Ya.V., Sablina O.M., Smirnova S.B., Gladkaya K.A. 2022. Regularities Analysis of the Linear Erosion Development in River Basins in the South of the Central Russian Hill with the Use of GIS. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 14(3): 192–212 (in Russian). <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-192-212>
- 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>
- Prirodnyye resursy i okruzhayushchaya sreda Belgorodskoy oblasti [Natural resources and environment of Belgorod region]. 2007. Ed. by S.V. Lukin. Belgorod, Pabl. Belgorod State University, 556 p.
- Usoltsev V.A., Tseporey I.S., Danilin I.M. 2022. The Needle Share in Tree Greenery Biomass of Scots Pine in Geographical Gradients of Eurasia. Conifers of the boreal area, 40(4): 303–311 (in Russian). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-6-303-311>
- Khizhnyak A.A. 1975. Prirodnye resursy zemli Belgorodskoy [Natural Resources of the Belgorod Land]. Voronezh, Pabl. Central Chernozem region book, 126 p.
- 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]. Articles, brief reports and abstracts of reports of the VI All-Russian scientific and practical conference, Belgorod, 10–12 October 2000. Belgorod, Pabl. Belgorod State University: 70–73.
- Sharifullin A.G., Gusaev A.V. 2025. Features of Distribution and Morphometric Characteristics of Beaver Dams and Ponds in Small Rivers of the Uplands of the Steppe Zone of the Volga Region, European Russia. Proceedings of the Russian Geographical Society, 156(4): 423–440 (in Russian) <https://doi.org/10.31857/S0869607124040129>

- Shevchenko V.N. 2019. Transformation of a Hydrographic Network of Urbanized Territories of the Belgorod Region. *Vector of Geosciences*, 2(4): 22–25 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10042>
- Bai J., Perron P. 2003. Computation and Analysis of Multiple Structural Change Models. *Journal of applied econometrics*, 18(1): 1–22. <https://doi.org/10.1002/jae.659>
- Chen C., L.-M. Liu. 1993. Joint Estimation of Model Parameters and Outlier Effects in Time Series. *Journal of the American Statistical Association*, 88(421): 284–297. <https://doi.org/10.1080/01621459.1993.10594321>
- Chendev Yu.G., Petin A.N., Serikova E.V. Kramchaninov N.N. 2008. Degradation of Geosystems in the Belgorod Region as a Result of the Economic Activities. *Geography and Natural Resources*, 29(4): 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.gnr.2008.10.010>
- Frolov A.A., Cherkashin A.K. 2012. Altitudinal Gradient as a Complex Factor for Formation of Landscape Microzonality and Geosystem Serialness. *Geography and Natural Resources*, 33(1): 10–18. <https://doi.org/10.1134/S1875372812010027>
- Gartsman B.I. 2013. Analysis of Geomorphological Conditions for Primary Streams Formation Using Digital Elevation Models. *Geography and Natural Resources*, 34(1): 69–78. <https://doi.org/10.1134/S1875372813010101>
- Habit E., Zurita A., Díaz G., Manosalva A., Arriagada P., Link O., Górska K. 2022. Latitudinal and Altitudinal Gradients of Riverine Landscapes in Andean Rivers. *Water*, 14(17): 2614. <https://doi.org/10.3390/w14172614>
- Nishizawa K., Shinohara N., Cadotte M.W., Mori A.S. 2022. The Latitudinal Gradient in Plant Community Assembly Processes: a Meta-Analysis. *Ecology Letters*, 25(7): 1711–1724. <https://doi.org/10.1111/ele.14019>
- Zeileis A., Kleiber C., Kramer W., Hornik K. 2003. Testing and Dating of Structural Changes in Practice. *Computational Statistics & Data Analysis*, 44(1–2): 109–123. [https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(03\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(03)00030-6)
- Zeileis A., Leisch F., Hornik K., Kleiber C. 2002. Strucchange: an R Package for Testing for Structural Change in Linear Regression Models. *Journal of statistical software*, 7(2): 1–38. <https://doi.org/10.18637/jss.v007.i02>

Поступила в редакцию 04.07.2025;
поступила после рецензирования 30.07.2025;
принята к публикации 26.08.2025

Received July 04, 2025;
Revised July 30, 2025;
Accepted August 26, 2025

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, эксперт Центра валидации и верификации углеродных единиц, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Ukrainskiy, Candidate of Geographical Sciences, Expert of the Carbon Units Validation and Verification Center, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

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