

УДК: 912.43+910.27

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-317-342

Хуан Лихуа<sup>1</sup>

## **ПОЛИМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ СВЯЗЕЙ СТРУКТУРЫ LULC И КАЧЕСТВА ВОДЫ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА Р. ВОРСКЛЫ)**

### **АННОТАЦИЯ**

Опираясь на трехкратную съемку землепользования/наземного покрова (LULC) за 2010, 2015 и 2020 гг. и 23 гидрохимических показателя, измеренные в 2008–2022 гг. в замыкающем створе трансграничной р. Ворсклы, выполнен полимасштабный анализ для всей территории водосбора в границах России. Для верховий реки (в зоне воздействия Яковлевского ГОКа), поста «Козинка» и основного русла реки сформированы буферные зоны различного радиуса; методом PCA выделены интегральные факторы качества воды, а методом RDA оценена их зависимость от типов LULC. Четыре главные компоненты суммарно объясняют 71,94 % дисперсии (PC1 — буферная емкость и органическая нагрузка, PC2 — антропогенный ввод, PC3 — редокс-режим и миграция тяжелых металлов, PC4 — жесткость). Землепользование проявляет ярко выраженный градиент: в 400 м от Яковлевского ГОКа доля застройки возрастает с 6,09 % (3 км) до 62,47 %, а пашня, пастбища, болота и водная гладь почти исчезают; в буферах 100–2 000 м вокруг поста «Козинка» лес и пашня доминируют (лес — U-профиль, пашня — инвертированный U-профиль, 100 м пастбище 18,5 %); вдоль реки фиксируется градиент «притоки < основное русло < двойной берег». Редундантный анализ (RDA) показал, что застройка, воды и болота положительно коррелируют с ионными и антропогенными индикаторами и отрицательно — с редокс-компонентами, тогда как пастбища во всех буферах положительно связаны с PC3 (окислительные условия). Доля пашни в радиусах 300–500 м имеет наиболее выраженные корреляции с минерализацией и жесткостью воды, а лес при 300 м демонстрирует значимые отрицательные связи с антропогенными индикаторами. Полученные зависимости подчеркивают масштабную и региональную специфику связей «землепользование — качество воды» и могут быть использованы для обоснования приоритетного сохранения 300-метровой прибрежной зоны, контроля расширения застройки в зоне ГОКа и управления пашней на удалении 300–500 м от русла для повышения экологической устойчивости трансграничного бассейна.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** землепользование/наземный покров (LULC), буферная зона, метод главных компонент, редундантный анализ

---

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, д. 85, Белгород, Россия, 308015, e-mail: [lhhuang0@163.com](mailto:lhhuang0@163.com)

Huang Lihua<sup>1</sup>

## A MULTISCALE STUDY OF LULC STRUCTURE AND WATER QUALITY RELATIONSHIPS (CASE STUDY OF THE VORSKLA RIVER BASIN)

### ABSTRACT

Based on three snapshots of land use/land cover (LULC) for 2010, 2015 and 2020 and 23 hydrochemical parameters measured in 2008–2022 at the downstream control section of the transboundary Vorskla River, we conducted a multiscale analysis across the entire watershed within Russian territory. Buffer zones of varying radii were delineated around the headwaters (within the impact zone of the Yakovlevsky GOK), the “Kozinka” monitoring station, and the mainstem channel. Principal Component Analysis (PCA) was used to extract composite water-quality factors, and Redundancy Analysis (RDA) was applied to assess their dependence on LULC types. Four principal components together explained 71.94 % of the variance: PC1 — buffer capacity and organic load; PC2 — anthropogenic inputs; PC3 — redox conditions and heavy-metal mobility; and PC4 — hardness. Land use exhibited a pronounced gradient: within 400 m of the Yakovlevsky GOK, built-up area increased from 6.09 % at 3 km to 62.47 %, while cropland, pasture, wetlands and open water nearly vanished. In the 100–2 000 m buffers around the Kozinka station, forest and cropland dominated (forest following a U-shaped profile, cropland an inverted-U profile, with pasture at 18.5 % within 100 m). Along the river, a gradient was observed: tributaries < mainstem < combined-bank zones. RDA revealed that built-up areas, water bodies, and wetlands were positively correlated with ionic and anthropogenic indicators and negatively with redox components, whereas grasslands in all buffers were positively associated with PC3 (oxidizing conditions). Cropland within 300–500 m radii showed the strongest correlations with mineralization and water hardness, while forest at 300 m exhibited significant negative correlations with anthropogenic indicators. These relationships highlight the scale- and region-specific nature of “land use – water quality” interactions and can inform recommendations for the priority conservation of a 300 m riparian zone, control of built-up expansion in the mining area, and targeted cropland management at 300–500 m from the river channel to enhance the ecological resilience of this transboundary basin.

**KEYWORDS:** land use/land cover (LULC), buffer zone, principal component analysis (PCA), redundancy analysis (RDA)

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы масштабы загрязнения рек достигли беспрецедентного уровня: данные мониторинга, полученные UNEP<sup>2</sup> в 89 странах (≈75 000 водных объектов) показал, что более 40 % русловых участков находятся в тяжелом состоянии и угрожают питьевой воде для почти 3 млрд чел. Существенным драйвером деградации признано изменение структуры землепользования/наземного покрова (LULC): урбанизация, промышленная добыча ископаемых, расширение сельхозугодий, что усиливает диффузный сток загрязняющих веществ, ускоряют эрозию почв и нарушает баланс питательных элементов [Chen et al., 2016; Lisetskii, Buryak, 2023; Huang, 2024].

---

<sup>1</sup> Belgorod State National Research University, 85, Pobedy str., Belgorod, 308015, Russia,  
e-mail: [lhhuang0@163.com](mailto:lhhuang0@163.com)

<sup>2</sup> United Nations Environment Programme. Globally, 3 billion people at health risk due to scarce data on water quality. UNEP website, 19.03.2021. Электронный ресурс: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/globally-3-billion-people-health-risk-due-scarce-data-water-quality> (дата обращения 25.04.2025)

Как показано ранее [Yermolaev et al., 2018], формализованная интеграция природных и антропогенных характеристик водосборов малых рек в среде геоинформационных систем (ГИС) позволяет оперативно оценивать сток воды, наносов и степень антропогенного воздействия на бассейны Европейской России, что подтверждено данными Геопортала открытого доступа. Бассейновый подход, в свою очередь, обеспечивает объективное выделение границ разнопорядковых водосборов, локализацию техногенных источников в замыкающих створах и иерархическое управление территорией [Yermolaev et al., 2015; Buryak, Grigoreva, 2019; Buryak et al., 2022].

Река Ворскла — трансграничный водоток, российская часть которого охватывает лишь 13,5 % площади бассейна, однако именно здесь расположена крупнейшая горнодобывающая промышленная зона — Яковлевский ГОК, разрабатывающий богатое железорудное месторождение Курской магнитной аномалии [Корнилова и др., 2023]. Длительный дренаж шахтных и рудничных вод, складирование отходов приводят к отчуждению земель и поступлению загрязняющих веществ в атмосферу, почвы и поверхностные воды [Kong et al., 2023]. Сложные высоконапорные водоносные горизонты и подземные выработки существенно изменили гидрологический режим верховьев реки [Котлов и др., 2023]; экогеохимическое обследование близлежащих сельских территорий выявило превышения фоновых уровней для ряда тяжелых металлов [Бударина и др., 2024].

Несмотря на наличие результатов исследования отдельных участков долины Ворсклы, комплексная оценка, сочетающая длительный гидрохимический ряд и многоуровневый анализ LULC, остается неразработанной, особенно в контексте градиента «горнодобыча – русловая система» и его масштабной зависимости.

Анализ масштаба играет ключевую роль в определении взаимосвязей между землепользованием и показателями качества воды. В ряде исследований использовалась структура землепользования в прибрежных буферных зонах для объяснения изменений качества воды [McMillan и др., 2014], тогда как другие работы опирались на систему буферов различного радиуса вокруг пунктов отбора проб для количественной оценки влияния землепользования на содержание загрязняющих веществ [Bawa, Dwivedi, 2019]. В настоящем исследовании совмещены оба подхода: применены кольцевые буферные зоны вокруг территории Яковлевского ГОКа и гидропоста «Козинка», а также прибрежные буферы вдоль русла реки.

Существует значительное число исследований, в которых редундантный анализ (RDA) применялся для выявления связи между LULC и гидрохимическими показателями [Shen et al., 2014; Chen et al., 2016; Shi et al., 2017; Wu, Lu, 2019; Huang et al., 2020]. Наибольшее преимущество RDA заключается в том, что данный метод позволяет независимо учитывать вклад каждой объясняющей переменной в каждую зависимую переменную, не ограничиваясь простым анализом векторов объясняющих переменных и без преобразования части переменных в виртуальные сложные показатели [Zhao и др., 2015].

Настоящее исследование направлено на выявление пространственного отклика качества воды на изменения структуры LULC в бассейне р. Ворсклы. Интегрированы наблюдения за 22 гидрохимическими показателями (2008–2022 гг.) и картографические материалы LULC за 2010, 2015 и 2020 гг.; сформирована иерархическая база землепользования на основе полимасштабных буферных зон. Для выделения ведущих гидрохимических факторов использован метод главных компонент (PCA), а редундантный анализ (RDA) использован для установления связей между пропорциями типов LULC и качеством речных вод в пределах иерархически организованных буферных зон.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Описание района исследования

В качестве объекта исследования выбран бассейн р. Ворсклы, расположенный в границах территории Российской Федерации. Этот бассейн представляет собой типичную речную систему общей площадью около 2 482 км<sup>2</sup>. В верховьях бассейна находится промышленный объект — Яковлевский ГОК, характеризующийся высокой интенсивностью горнодобывающей деятельности (рис. 1). Для построения цифровой модели рельефа (DEM) в данном исследовании использованы данные FABDEM [Hawker et al., 2023]. По оценкам Мальцева и соавторов [2024], этот продукт по сравнению с другими глобальными ЦМР обладает наименьшей погрешностью и исключает влияние растительного покрова, что обеспечивает более точное отражение характеристик поверхности при анализе LULC и моделировании гидрологических процессов. В нижнем течении расположен гидрологический пост I разряда «Козинка», который с 1930 г. служит важным пунктом мониторинга в замыкающем створе российского участка бассейна р. Ворскле. Географические координаты исследуемой территории составляют: 35°22'5" – 36°31'42" в. д., 50°20'37" – 50°57'32" с. ш.

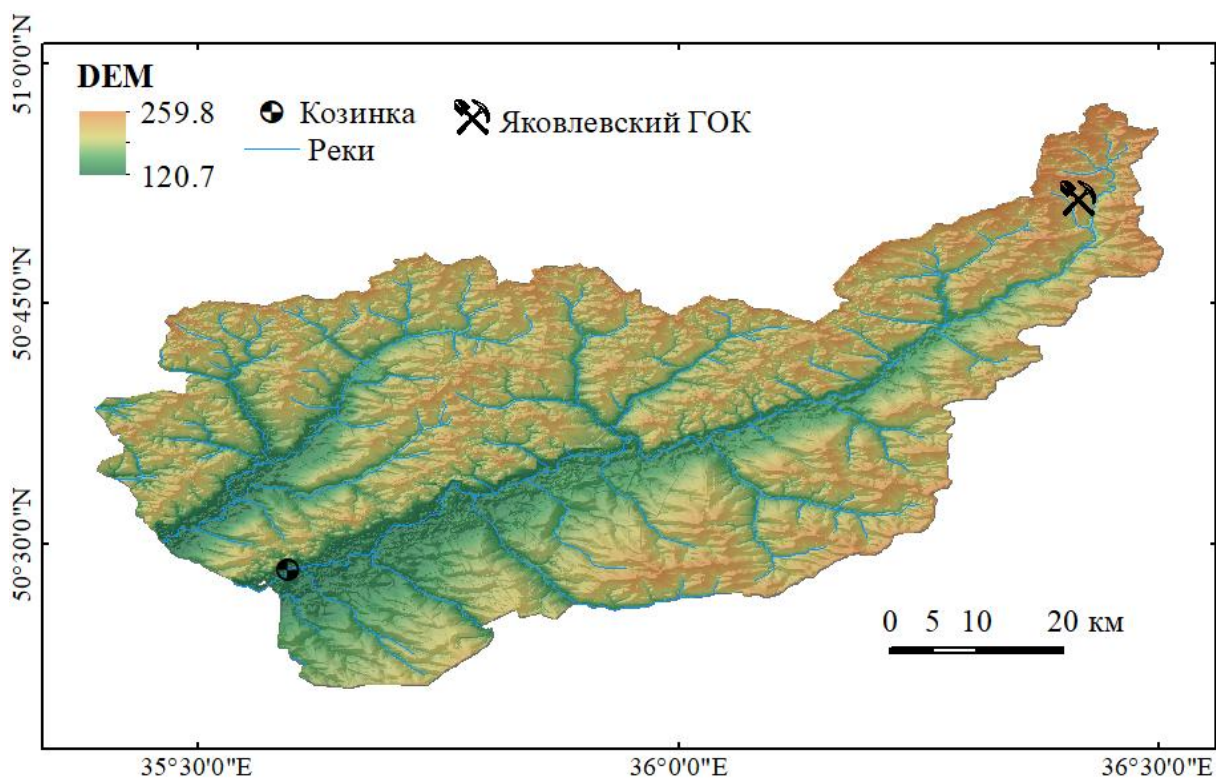


Рис. 1. DEM-карта района исследования

Fig. 1. DEM map of the study area

### Источники и обработка данных

#### Данные о качестве воды

Данные о качестве воды получены по наблюдениям на гидропосту «Козинка» и охватывают период с 2008 по 2022 гг. [Киселев, Корнилов, 2024]. В настоящем исследовании гидрохимические показатели использованы в виде среднегодовых значений, рассчитанных на основе обобщения 6 сезонных измерений в каждом году (февраль — 1, март — 1, апрель — 2, август — 1, ноябрь — 1). Было собрано 23 показателя качества воды,



в т. ч. расход, растворенный кислород, взвешенные вещества, pH, магний, хлориды, сульфаты, суммарные ионы, гидрокарбонаты, кальций, химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>), аммоний, нитриты, нитраты, фосфаты, кремниевая кислота, железо, медь, цинк, никель, нефтепродукты (НП) и поверхностно-активные вещества. Первичная обработка данных проводилась в Excel, где для устранения пропусков в данных (значения «Взвешенные вещества» за 2008, 2013–2015 и 2018 гг., а также «Кремнекислота» за 2008 г.) применяли методы линейной интерполяции и замещения средним значением. Все показатели были стандартизированы методом Z-преобразования (нормализация по стандартному отклонению), что обеспечило сопоставимость данных различных показателей.

### ***Данные о землепользовании и наземном покрове (LULC)***

Данные о структуре типов LULC были получены из глобального набора данных с пространственным разрешением 30 м — GLC\_FCS30 1985\_2020, разработанного Институтом космической и воздушной информации Китайской академии наук [Zhang et al., 2021]. Для анализа были отобраны данные за 2010, 2015 и 2020 гг., которые соответствовали трем временным интервалам многолетних гидрохимических наблюдений: 2008–2012 гг. — LULC 2010 г., 2013–2017 гг. — LULC 2015 г., 2018–2022 гг. — LULC 2020 г. Из данных были выделены шесть основных типов земного покрова: пахотные земли, леса, пастбища, застройка, вода, болота. Классификация и пространственный анализ были выполнены в программной среде ArcGIS 10.8.1.

С целью изучения влияния структуры землепользования и наземного покрова (LULC) на изменение качества воды в различных пространственных масштабах в настоящем исследовании, с опорой на ранее опубликованные научные работы [Chen et al., 2016; Huang et al., 2020] и с учетом пространственной конфигурации исследуемого региона как закрытого водосбора с расположением горнодобывающего предприятия в верховьях, была разработана система полимасштабных буферных зон для комплексной оценки реакции качества воды на структуру землепользования. Конкретно она включает следующие компоненты: 1) вокруг Яковлевского ГОКа были сформированы 13 концентрических буферов с радиусами от 100 до 3 000 м; 2) вокруг гидропоста «Козинка» — 11 буферных зон с радиусами от 100 до 2 000 м.

Вдоль притоков и основного русла и только основного русла р. Ворсклы были установлены стандартные буферные зоны шириной 200–500 м. Кроме того, вдоль основного русла были выделены дополнительные буферные зоны с асимметричной конфигурацией, в которых левая сторона реки была расширена на 100–200 м по сравнению с правой, что отражает геоморфологические особенности асимметричной речной долины: ее левый берег имеет более пологий характер, чем правый.

### **Методы статистического анализа**

*Анализ главных компонент (PCA).* Главные компоненты 23 показателей качества воды были выделены с помощью метода анализа главных компонент в программе SPSS с целью уменьшения размерности и извлечения основных факторов, влияющих на изменения качества воды.

*Редунданс-анализ (RDA).* Редундантный анализ проводили в программе Canoco 5. В качестве объясняющих переменных использовали параметры структуры землепользования (LULC), а в качестве откликов — значения главных компонент качества воды. Метод RDA применялся для оценки объясняющей способности структуры землепользования в отношении изменений качества воды и определения ключевых типов землепользования и их пространственных масштабов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Динамика показателей качества речной воды в 2008–2022 гг.

Рисунок 2 представляет стандартизированную тепловую карту 23 показателей качества воды, зарегистрированных на гидропосту наблюдения «Козинка» в период 2008–2022 гг., отражающую временные изменения основных параметров. В целом наблюдается тенденция к снижению расхода воды и содержания растворенного кислорода, тогда как значения pH демонстрируют колебательный характер. Концентрация взвешенных веществ во все годы наблюдений (2008–2022 гг.) превышала ПДК рыбохозяйственных водоемов в 1,56–3,67 р.

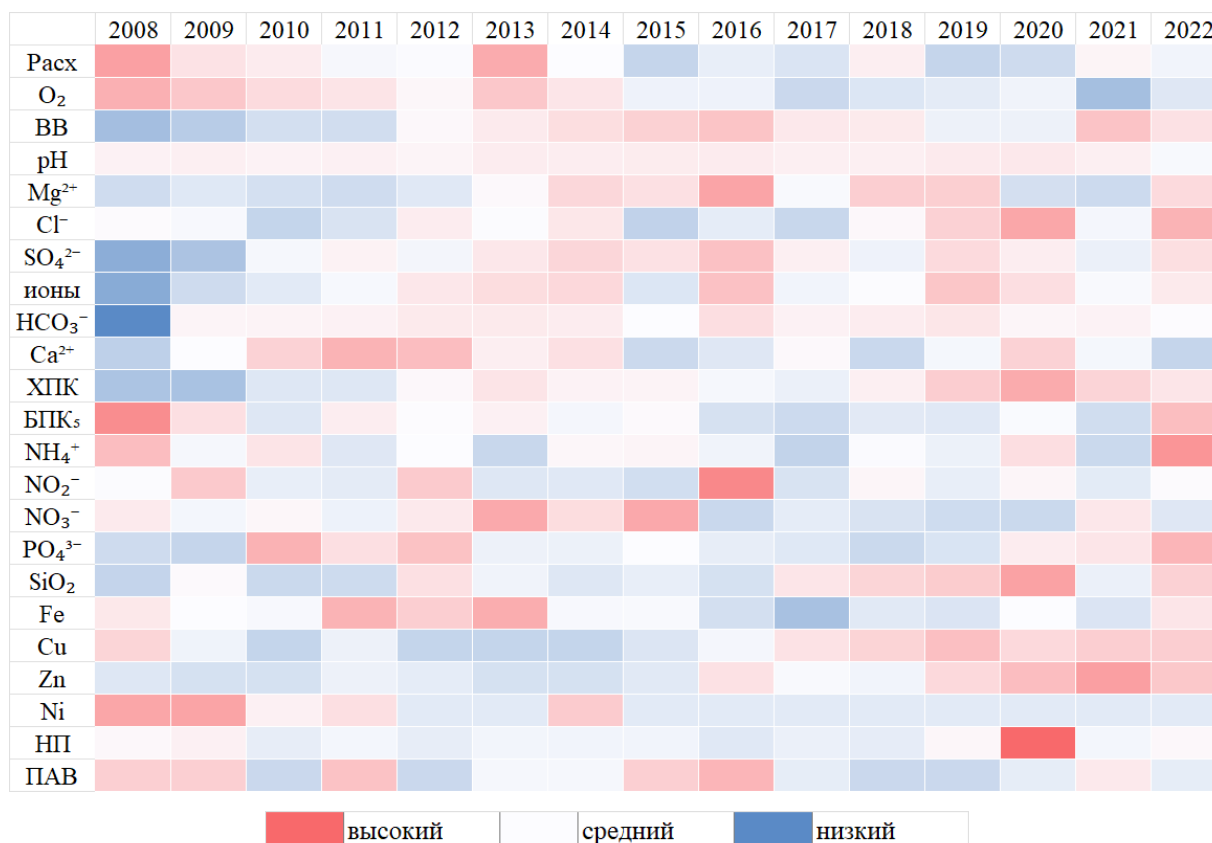


Рис. 2. Тепловая карта стандартизированных показателей качества воды в пункте наблюдения «Козинка» (2008–2022 гг.)

Fig. 2. Heatmap of standardized water quality indicators at the “Kozinka” monitoring station (2008–2022)

Среди неорганических ионов наиболее критичными являются сульфаты: их концентрация достигала пикового значения 141 мг/л (1,06–1,41 ПДК, начиная с 2010 г.). Магний (36,5 мг/л в 2016 г.), суммарные ионы (808 мг/л в 2016 г.), гидрокарбонаты (400 мг/л в 2016 г.), хлориды (84,4 мг/л в 2020 г.) и кальций (127 мг/л в 2011 г.) также фиксировались на своих максимальных уровнях, оставаясь при этом в пределах допустимых значений.

Для биогенных элементов характерен низкий уровень концентраций в 2017–2020 гг., однако в 2022 г. зафиксирован резкий рост: аммоний 0,698 мг/л (до 1,79 ПДК) и фосфаты 0,332 мг/л (1,04–1,69 ПДК). Превышения ПДК отмечались также по нитритам (2009, 2012 и 2016 гг.; до 2,19 ПДК), что свидетельствует об усилении рисков эвтрофикации водоема.

Среди органических загрязнителей химическое потребление кислорода (ХПК) и нефтепродукты демонстрировали восходяще-нисходящий тренд и достигли пиковых значений в 2020 г. — 40,7 мг/л и 0,235 мг/л соответственно. При этом ХПК в 2019–2022 гг. превышало норматив (1,00–1,36 ПДК), а нефтепродукты в 2020 г. превысили ПДК в 4,7 р. В отличие от этих показателей биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>) и поверхностно-активные вещества в целом снижались, однако в 2022 г. уровень БПК<sub>5</sub> вновь возрос до 30,4 мг/л, что сопоставимо с высоким значением 2008 г. (3,32 мг/л), и в оба года превышало норматив (1,11 и 1,01 ПДК). Это указывает на повторное усиление органической нагрузки.

Для тяжелых металлов и микроэлементов зафиксированы значительные превышения: железо в 2011–2012 гг. (1,13–1,37 ПДК), медь (383–2 020 ПДК), цинк (33–532 ПДК в 2008–2020 гг.) и никель (83–263 ПДК в 2009–2011 и 2014 гг.). Эти данные указывают на высокий уровень экологического риска и необходимость приоритетного контроля данных элементов. Ранее было показано, что в бассейне р. Ворсклы в период повышенной водности (1978–2023 гг.) потенциал самоочищения снижался, начиная с 2009 г., что связывается с уменьшением среднегодовых расходов воды на 29 %. При этом дренажные воды железорудного производства обуславливали повышенные концентрации F, B, Mn, Cu, Ti и P, тогда как агропромышленная деятельность способствовала росту содержания  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  [Лисецкий и др., 2025].

#### Анализ главных компонент (РСА) показателей качества воды

В результате анализа главных компонент (РСА), проведенного по 23 показателям качества воды на гидропосту «Козинка» за период 2008–2022 гг., диаграмма осыпи (график Кеттела) (рис. 3) показывает наличие четко выраженного «переломного момента» после четвертой компоненты, после которого объясняющая способность последующих факторов значительно снижается. Согласно табл. 1 с результатами общего объяснения дисперсии, первые четыре главные компоненты суммарно объясняют 71,94 % общей вариации, что позволяет считать их надежными обобщающими характеристиками исходных переменных.

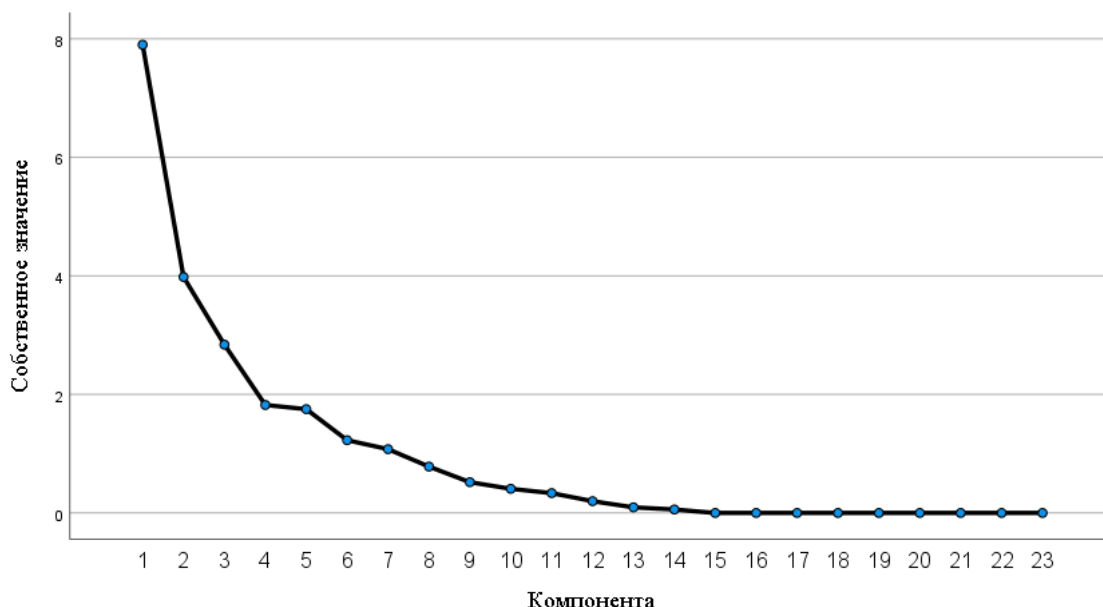


Рис. 3. График Кеттела  
Fig. 3. Cattell's graph

Табл. 1. Объяснение общей дисперсии  
Table 1. Total variance explained

Компо- нента	Собственные значения			Сумма квадратов нагрузок после извлечения		
	Всего	Дисперсия, %	Кумулятивно, %	Всего	Дисперсия, %	Кумулятивно, %
1	7,90	34,35	34,35	7,90	34,35	34,35
2	3,98	17,32	51,67	3,98	17,32	51,67
3	2,84	12,35	64,02	2,84	12,35	64,02
4	1,82	7,92	71,94	1,82	7,92	71,94
5	1,75	7,62	79,56	1,75	7,62	79,56
6	1,23	5,34	84,89	1,23	5,34	84,89
7	1,08	4,68	89,57	1,08	4,68	89,57
8	0,78	3,40	92,98	—	—	—
9	0,52	2,26	95,24	—	—	—
10	0,41	1,77	97,01	—	—	—
11	0,34	1,46	98,47	—	—	—
12	0,20	0,87	99,33	—	—	—
13	0,10	0,41	99,74	—	—	—
14	0,06	0,26	100,00	—	—	—
15	0,00	0,00	100,00	—	—	—
16	0,00	0,00	100,00	—	—	—
17	0,00	0,00	100,00	—	—	—
18	0,00	0,00	100,00	—	—	—
19	0,00	0,00	100,00	—	—	—
20	0,00	0,00	100,00	—	—	—
21	0,00	0,00	100,00	—	—	—
22	0,00	0,00	100,00	—	—	—
23	0,00	0,00	100,00	—	—	—

Матрица факторных нагрузок после ортогонального вращения по методу Варимакс (табл. 2) показывает, что первая главная компонента (PC1) положительно коррелирует с рН,  $\text{SO}_4^{2-}$ , ионами,  $\text{HCO}_3^-$  и ХПК, а также отрицательно — с БПК<sub>5</sub> и Ni, отражая совокупное влияние буферной способности воды и органической нагрузки. Вторая компонента (PC2) связана с  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SiO}_2$  и НП, что позволяет интерпретировать ее как индикатор антропогенного и диффузного загрязнения. Третья компонента (PC3) характеризуется положительными нагрузками по  $\text{O}_2$  и Fe и отрицательными — по Cu и Zn, что отражает связь между окислительно-восстановительными условиями и миграцией тяжелых металлов. Четвертая компонента (PC4) определяется значениями  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$  и представляет собой фактор, связанный с жесткостью воды и ионным балансом Ca–Mg.

Временные ряды значений этих компонент (рис. 4) показывают их динамику в 2008–2022 гг. Наиболее выраженные колебания наблюдаются у PC2 и PC3 в 2018–2020 гг., что совпадает с периодом существенных изменений гидрохимических условий. Напротив, PC1 и PC4 демонстрируют более устойчивые тенденции, обусловленные стабильностью буферных свойств и ионного состава воды.

Оставшиеся компоненты имеют низкую объясняющую способность и не рассматривались в дальнейшем анализе.



Табл. 2. Матрица факторных нагрузок  
после ортогонального вращения по методу Варимакс  
Table 2. Component loading matrix after Varimax rotation

Повернутая компонентная матрица <sup>1</sup>							
	Компонента						
	1	2	3	4	5	6	7
Расх	−0,59	−0,13	0,48	0,11	−0,18	−0,10	0,10
O <sub>2</sub>	−0,55	−0,08	0,78	−0,09	0,15	−0,11	0,01
ВВ	0,79	−0,10	−0,23	0,37	−0,21	0,08	0,19
pH	0,87	−0,02	−0,05	−0,31	0,06	−0,08	−0,13
Mg <sup>2+</sup>	0,54	−0,09	−0,01	0,73	0,32	−0,19	−0,07
Cl <sup>−</sup>	0,04	0,91	0,04	0,19	0,15	0,16	−0,18
SO <sub>4</sub> <sup>2−</sup>	0,90	0,05	0,01	0,16	0,03	0,14	0,01
ионы	0,89	0,30	0,08	0,05	0,21	−0,01	−0,08
HCO <sub>3</sub> <sup>−</sup>	0,90	−0,05	−0,02	−0,25	0,15	−0,05	−0,16
Ca <sup>2+</sup>	0,25	0,04	0,33	−0,85	0,05	0,13	−0,11
XПК	0,66	0,61	−0,19	0,05	−0,31	0,11	−0,09
БПК <sub>5</sub>	−0,75	0,25	0,38	0,30	0,01	0,24	0,16
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	−0,43	0,32	0,08	0,43	0,23	0,60	−0,15
NO <sub>2</sub> <sup>−</sup>	0,08	0,01	0,05	0,11	0,84	−0,01	0,24
NO <sub>3</sub> <sup>−</sup>	−0,02	−0,33	0,52	0,08	−0,69	0,00	0,19
PO <sub>4</sub> <sup>3−</sup>	0,21	0,00	0,06	−0,28	−0,08	0,92	−0,09
SiO <sub>2</sub>	0,27	0,73	−0,28	0,00	0,06	−0,06	−0,45
Fe	−0,14	0,18	0,79	−0,16	−0,17	0,31	0,18
Cu	−0,24	0,48	−0,74	0,27	0,01	−0,09	−0,01
Zn	0,27	0,54	−0,66	0,04	−0,02	0,24	0,28
Ni	−0,75	−0,16	0,31	−0,14	0,24	−0,20	0,13
НП	−0,08	0,85	−0,08	−0,29	0,04	−0,02	0,05
ПАВ	−0,22	−0,22	0,06	0,05	0,19	−0,14	0,89

### Особенности изменений землепользования в многомасштабных буферных зонах

На рисунке 5 показана динамика долей различных типов землепользования в окрестностях Яковлевского ГОКа (2015 и 2020 гг.) в буферных зонах радиусом 100–3 000 м. По мере приближения к центру рудника доля застройки резко возрастает: от 6,09 % на 3 000 м до 62,47 % на 300 м. Одновременно доли классов пашни и пастбища последовательно уменьшаются, а классов болота и воды практически исчезают вблизи предприятия. Таким образом, наблюдается выраженный пространственный градиент, отражающий быструю трансформацию природного рельефа в урбанизированные и индустриальные поверхности.

Рисунок 6 иллюстрирует изменение структуры и пространственное распределение землепользования в 2010–2020 гг. в буферах радиусом 100–2000 м вокруг гидропоста «Козинка». На всей площади зоны доминирует пашня и лес, причем наблюдается отчетливое сочетание инвертированной U-образной кривой для пашни и U-образной для леса. На удалении 2 000 м доля леса достигает ≈48 %, а пашня — 44 %. При сужении буферной зоны до 800 м доля леса падает, в то время как доля пашни возрастает почти до 65 %. В буферных зонах менее 500 м доля леса вновь увеличивается, при этом площадь пашни уменьшается, тогда как доля пастбищ резко возрастает: на 100 м в 2020 г. доля

<sup>1</sup> Метод извлечения: метод главных компонент. Метод вращения: нормализованное по Кайзеру вращение с максимальной дисперсией (Varimax). Вращение сошлось после 14 итераций

пастбищ составила 18,52 %. Классы «застройка» и «вода» во всех буферных зонах остаются низкими по вкладу, лишь между 800 и 500 м доля застройки слегка поднимается до  $\approx 4$  %.

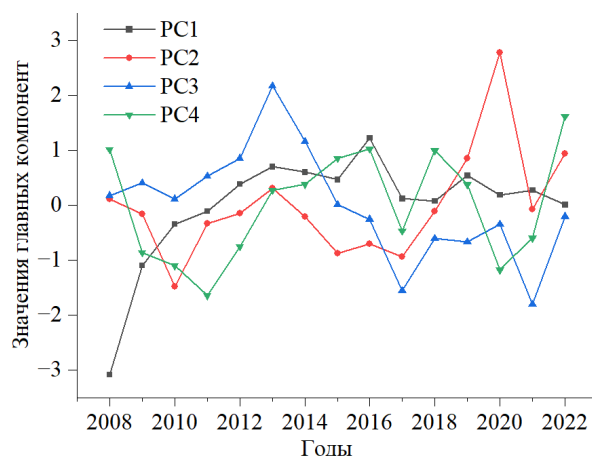


Рис. 4. Динамика главных компонент (PC1–PC4) качества воды на гидропосту «Козинка» в 2008–2022 гг.

Fig. 4. Temporal dynamics of principal components (PC1–PC4) of water quality at the “Kozinka” monitoring station, 2008–2022

Рисунок 7 отражает динамику долей землепользования вдоль русла Ворсклы (2010–2020 гг.) при трех конфигурациях буферных зон: «притоки + основное русло», односторонний буфер основного русла и комбинированный буфер обоих берегов. Во всех случаях преобладают пашня, лес и пастбище. Для зоны «притоки + основное русло» доля пашни варьирует от 52,66 до 58,86 %, лес и пастбище следуют далее, формируя аграрно-ориентированный ландшафт. В одностороннем буфере (200–500 м) структура стабильна: пашня  $\approx 50$  %, лес  $\approx 20$  %; при этом доля застройки здесь примерно вдвое выше, чем в предыдущем случае, что указывает на более интенсивное освоение зон вдоль основного русла. В комбинированных буферах зонах обоих берегов (например, 500 + 400 м, 500 + 300 м) доля искусственных поверхностей возрастает еще сильнее, а пастбище немного снижается, подчеркивая более высокий уровень антропогенного воздействия.

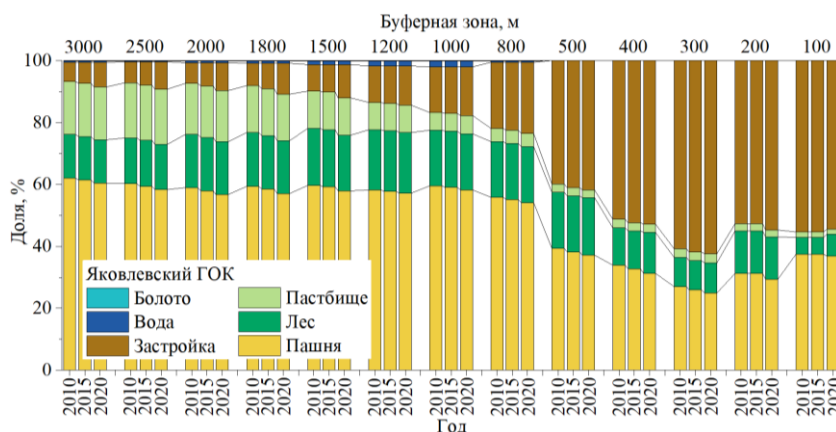


Рис. 5. Изменения типов землепользования в буферных зонах (100–3 000 м) вокруг Яковлевского ГОК

Fig. 5. Changes in land use types in multi-scale buffers (100–3 000 m) around Yakovlevsky GOK

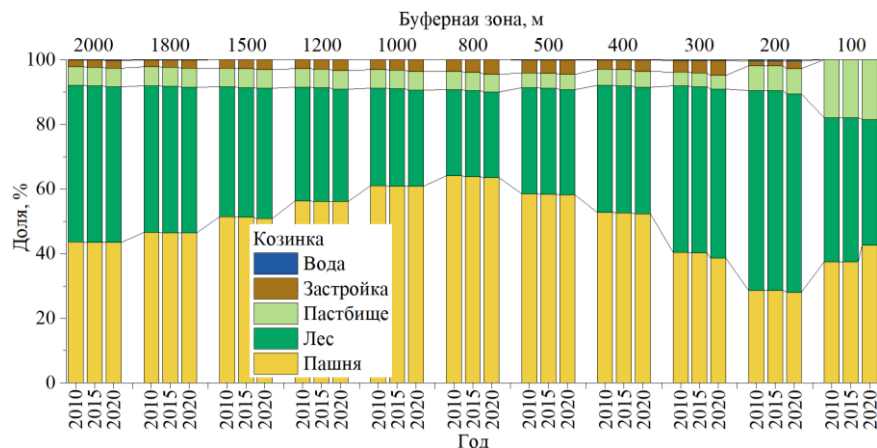


Рис. 6. Изменения типов землепользования в буферных зонах (100–2 000 м) вокруг пункта гидромониторинга «Козинка»

Fig. 6. Changes in land use types in multi-scale buffers (100–2 000 m) around “Kozinka” monitoring station

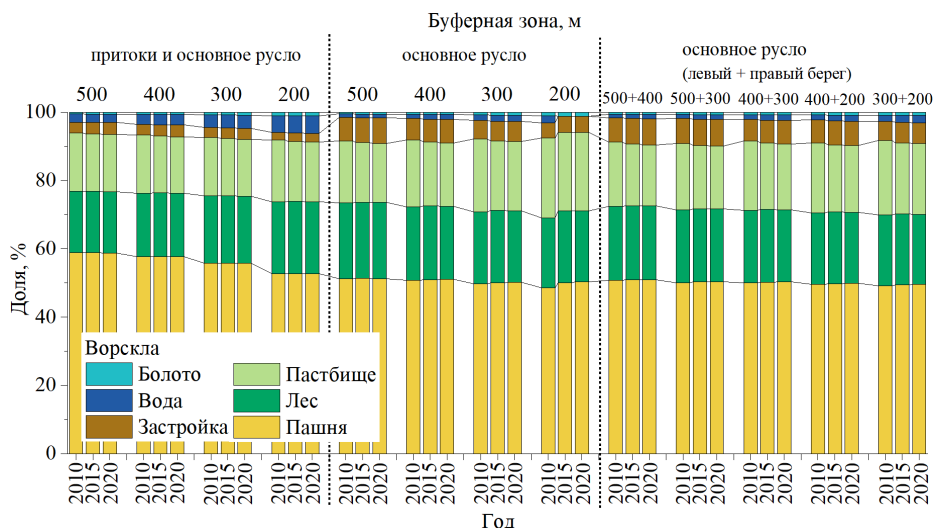


Рис. 7. Изменения типов землепользования в буферных зонах (200–500 м) вдоль русла р. Ворсклы

Fig. 7. Changes in land use types in 200–500 m buffer zones along the Vorskla River

### Редундантный анализ влияния типов землепользования на качество воды

На рисунках 8–12 представлены результаты редундантного анализа (RDA), выполненного на основе главных компонент качества воды (PC1–PC4) по данным гидропоста «Козинка» за 2008–2022 гг. и распределения типов землепользования для трех временных срезов (2010, 2015 и 2020 гг.), рассчитанных в буферных зонах Яковлевского ГОКа, вокруг гидропоста «Козинка» и вдоль руслового участка Ворсклы. С учетом пространственно-временного распределения LULC и различий их корреляции с компонентами воды для территории Яковлевского ГОКа выбраны буферы радиусом 300, 500, 800, 1 000, 1 200 и 3 000 м, а для гидропоста «Козинка» — 100, 300, 800 и 2 000 м. Общее объясненное разнообразие составило 56,00 %, из них переменные для типов землепользования объясняют 33,9 % (22,9 % после поправки на число параметров), что подтверждает значимое влияние структуры землепользования на качество воды на разных

пространственных масштабах. Общий тест значимости осей (pseudo-F = 3,1; P = 0,002) свидетельствует о статистической надежности модели.

В результатах редундантного анализа красные векторы обозначают различные типы землепользования (LULC) в пределах буферных зон, синие векторы — главные компоненты качества воды (PC). Углы между векторами отражают характер корреляции: при угле менее 90° (острый угол) наблюдается положительная корреляция, причем чем меньше угол, тем сильнее связь; при угле более 90° (тупой угол) фиксируется отрицательная корреляция, при этом максимально сильная — вблизи 180°; угол, близкий к 90°, указывает на отсутствие значимой корреляции.

### ***Редундантный анализ в районе Яковлевского ГОКа***

Из рисунка 8 видно, что во всех радиусах буферных зон вокруг Яковлевского ГОКа доля пашни (L2) отрицательно коррелирует с PC1 и PC4 и сильно отрицательно — с PC2, что указывает на статистическую связь с понижением буферных свойств и жесткости и с повышением органической нагрузки. Вместе с тем во всех радиусах наблюдается положительная корреляция L2 с PC3, что отражает ее связь с более окислительными условиями и меньшими значениями индикаторов миграции Cu и Zn.

Лес (L3) демонстрирует выраженную зависимость от радиуса буфера. В пределах 300–500 м установлена слабая положительная корреляция с PC1 и PC4, что указывает на ассоциацию леса с факторами, включающими буферные свойства и жесткость воды. Одновременно фиксируется сильная положительная корреляция с PC2 и сильная отрицательная — с PC3, что формально указывает на рост антропогенной нагрузки и рисков металлопереноса. Эти связи могут быть обусловлены пространственным наложением лесных участков с транспортными или дренажными объектами, а не свойствами леса как категории LULC [Li et al., 2019]. В диапазоне 800–1 000 м положительная связь с PC1 усиливается до умеренной, а связи с PC2 и PC3 ослабевают, показывая, что лес по-прежнему выполняет регуляторную функцию, но влияние на внешние факторы снижается. При радиусе 3 000 м значимые связи с PC1 и PC4 исчезают; корреляция с PC2 становится резко отрицательной, а с PC3 — сильно положительной, подчеркивая вклад леса в поддержание окислительной среды и сдерживание переноса Cu и Zn.

Для пастбища (L4) в буферах 300, 800 и 1 000 м наблюдается сильная положительная корреляция с PC2 и выраженная отрицательная — с PC3, что указывает на усиление антропогенного ввода и рисков металлопереноса вблизи рудника. При радиусах 1 200 и 3 000 м знаки инвертируются: связь с PC2 становится отрицательной, с PC3 — положительной, демонстрируя способность удаленных пастбищ снижать антропогенную нагрузку, улучшать окислительный режим и ограничивать миграцию металлов.

Застройка (L5) во всех радиусах буфера положительно коррелирует с PC1, PC2 и PC4 и отрицательно — с PC3, указывая на ее связь с ростом ионных и антропогенных индикаторов и ослабление редокс-стабильности. По мере увеличения радиуса влияние ослабевает, что объясняется концентрацией застройки вблизи рудника: ее доля падает с ≈55 % на 100 м до 6,1–7,9 % на 3 000 м.

Векторы воды (L6) в буферах 800 и 1 000 м располагаются почти в том же секторе, что и пастбище малого радиуса (300–1 000 м), а при радиусе 3 000 м совпадают с пастбищем 1 200 м. Это сходство направлений означает, что вода и пастбище реагируют на главные компоненты качества воды похожим образом.

Таким образом, вокруг Яковлевского ГОКа главные компоненты качества воды проявляют неодинаковую реакцию в зависимости от радиуса буфера на различные категории землепользования. Пашня частично разбавляет антропогенный вклад, но снижает буферные свойства; лес и пастбище вблизи рудника могут пересекаться с потоками

загрязнений, тогда как на периферии способствуют окислительному режиму и подавлению миграции металлов; застройка остается главной нагрузкой при малых радиусах.

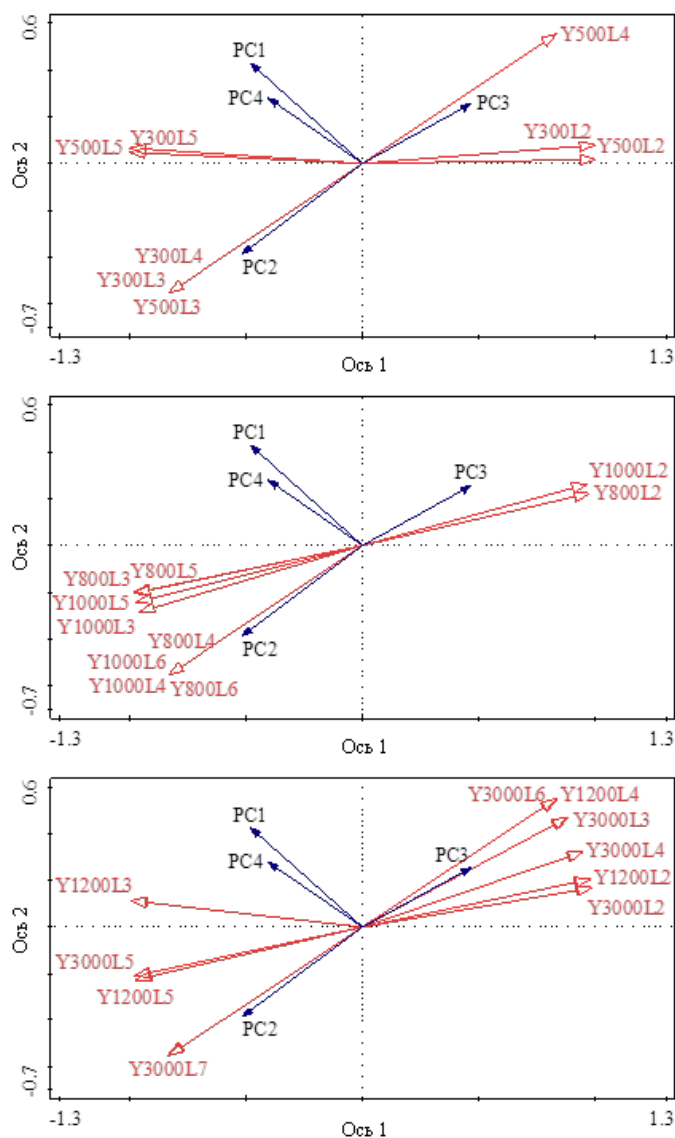


Рис. 8. Результаты редундантного анализа между типами землепользования и главными компонентами качества воды для разных масштабов буферных зон в районе Яковлевского ГОК<sup>1</sup>

Fig. 8. Redundancy analysis between land use types and water quality principal components at multiple buffer scales in the Yakovlevsky GOK area

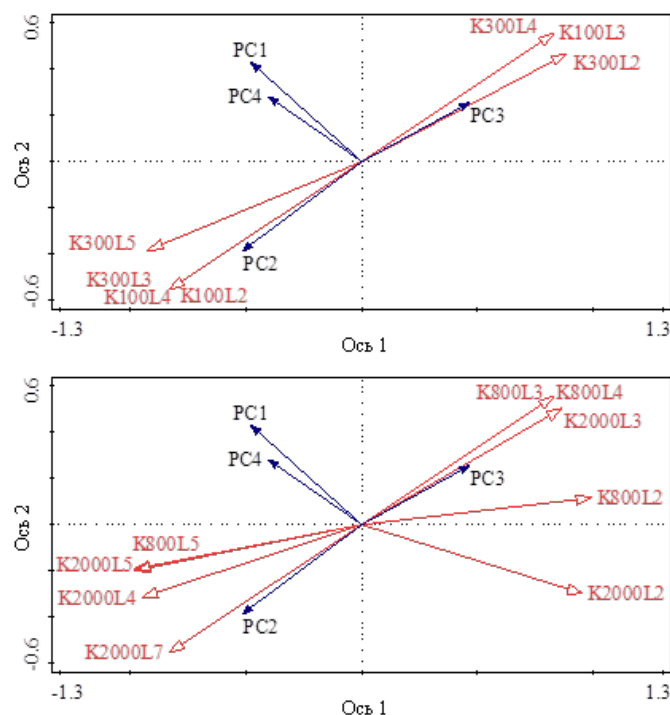
<sup>1</sup> Y обозначает Яковлевский ГОК, число после Y — радиус буферной зоны, L2–L7 — типы землепользования: пашня, лес, пастбище, застройка, вода, болото (далее то же самое). Для более наглядного представления и сопоставления результаты RDA при разных масштабах буферных зон были разделены на три рисунка: для буферов радиусом 300 и 500 м, 800 и 1 000 м, а также 1 200 и 3 000 м



### **Редундантный анализ в районе пункта гидромониторинга «Козинка»**

Из рисунка 9 заметно, что в буфере 100 м у поста «Козинка» оси пашни (L2) и пастбища (L4) почти совпадают: обе категории не коррелируют с PC1 и PC4, но демонстрируют сильную положительную связь с PC2 и сильную отрицательную — с PC3. Это указывает на их сосредоточение вдоль путей поступления загрязнителей и высокую чувствительность к антропогенному вкладу, сопровождающуюся ослаблением окислительно-восстановительного баланса воды.

Начиная с буфера в 300 м, направление корреляций L2 и L4 с PC2 и PC3 инвертируется: связь с PC2 становится отрицательной, с PC3 — положительной. По мере увеличения дистанции чувствительность к антропогенному вводу падает, а способность поддерживать окислительный режим возрастает.



*Рис. 9. Результаты редундантного анализа между типами землепользования и главными компонентами качества воды при разных масштабах буферных зон в районе пункта гидромониторинга «Козинка»<sup>1</sup>*

*Fig. 9. Redundancy analysis between land use types and water quality principal components at multiple buffer scales around the “Kozinka” monitoring station*

В буферной зоне 800 м ориентация вектора L4 близка к таковой на 300 м; на 2 000 м наблюдается слабая положительная связь с PC1 и PC4, сильная положительная — с PC2 и сильная отрицательная — с PC3. Это указывает на то, что в удаленных буферах пастбища демонстрируют статистические связи с зонами диффузного стока: положительная корреляция с PC2 может отражать пространственное совпадение с источниками антропогенной нагрузки, тогда как отрицательная связь с PC3 согласуется с менее выраженными окислительными условиями, что, вероятно, связано с агротехническими воздействиями или деградацией травостоя [Ren, 2022; Nuruzzaman et al., 2025].

<sup>1</sup> Примечание: К обозначает пункт гидромониторинга «Козинка»

Пашня в буферах шириной 800 и 2 000 м показывает более сложный отклик: умеренно отрицательные корреляции с PC1, PC4 и PC2 сочетаются с умеренно положительной — с PC3. Это одновременно указывает на ослабление буферных свойств и жесткости, но и на частичное поддержание окислительных условий и снижение антропогенной нагрузки. Максимальная доля пашни (64,15 %) зафиксирована именно на 800 м, где корреляционная картина наиболее сложна, что выделяет данный масштаб как критически чувствительный к аграрному влиянию.

Вектор леса (L3) в буфере шириной 100 м совпадает с направлением пашни и пастбища на 300 м, а в буферах 300, 800 и 2 000 м повторяет ориентацию пастбища на 300 м. Это свидетельствует о схожем отклике леса и других природных категорий и возможном перекрытии их пространственного размещения и путей переноса загрязнений.

Застройка (L5) в буфере шириной 300 м слабо положительно связана с PC1 и PC4, сильно положительно — с PC2 и сильно отрицательно — с PC3, что отражает ее участие в антропогенном вводе и нарушении редокс-равновесия, а также усиление миграции металлов. В буферах шириной 500 и 800 м направление сохраняется, но сила корреляций уменьшается до умеренной, показывая снижение воздействия по мере удаления.

Таким образом, в окрестностях поста «Козинка» реакция типов землепользования на главные компоненты качества воды проявляет выраженную масштабную зависимость. В прибрежной зоне (100 м) пашня и пастбище демонстрируют статистические связи с PC2 и PC3, указывая на высокую чувствительность к антропогенным индикаторам и ослабление редокс-баланса. На больших расстояниях часть природных площадей проявляет более сильные корреляции с окислительными условиями и меньшие связи с антропогенной нагрузкой. Для застройки фиксируются наиболее сильные корреляции в малых буферах, которые ослабевают с ростом радиуса. Сходство направлений векторов леса и других природных категорий свидетельствует о возможном синергетическом эффекте их совместного влияния на показатели качества воды в пределах данного бассейна.

### ***Редундантный анализ в районе р. Ворсклы***

#### ***Основное русло и притоки***

Согласно данным рис. 10, в зоне основного русла р. Ворсклы и ее притоков при радиусе буфера 200 м доля пашни (L2) умеренно положительно коррелирует с PC1 и PC4, что указывает на повышение буферной емкости и концентрации ионов, определяющих жесткость воды ( $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ ) в воде. Такое влияние, вероятно, связано с щелочными поступлениями при внесении удобрений (известкование, мелиоранты, содержащие Ca и Mg) [Whitmore et al., 2006]. Одновременно пашня умеренно положительно связана с PC3 и умеренно отрицательно — с PC2, т. е. при этом радиусе антропогенная нагрузка невелика, а редокс-режим остается стабильным. При расширении радиуса до 300–500 м положительные связи пашни с PC1, PC2 и PC4 ослабевают, тогда как корреляция с PC3 усиливается, отражая рост роли пашни в окислительных процессах под влиянием уклона, поверхностного склонового стока и путей миграции удобрений [Song et al., 2022; Zhang et al., 2022; Qiu et al., 2023].

Лес (L3) в радиусах 200–300 м умеренно положительно связан с PC1, PC4 и PC3 и умеренно отрицательно — с PC2, укрепляя буферные свойства, жесткость и окислительный потенциал воды при одновременном перехвате загрязнений. На 400 м положительные связи с PC1 и PC4 усиливаются; связь с PC2 становится слабopоложительной, а с PC3 — слабонегативной. При радиусе 500 м знаки корреляций сохраняются, но их сила снижается до среднего уровня. Таким образом, буферную зону в 300 м можно считать оптимальной границей, где лес оказывает наибольший водорегулирующий эффект; к аналогичным

выводам приходят Li с соавторами [2019], оценивая для влияния прибрежной полосы на COD.

Направление вектора пастбища (L4) во всех радиусах практически неизменно: умеренно отрицательные корреляции с PC1, PC2 и PC4 и умеренно положительная — с PC3. Это означает, что пастбище несколько снижает буферную емкость и жесткость, но способствует подавлению антропогенных индикаторов и сохранению окислительных условий.

В отличие от него застройка (L5) в диапазоне 200–500 м располагается почти в противоположном секторе: умеренно положительные связи с PC1, PC2 и PC4 и умеренно отрицательная — с PC3. Это отражает усиление ионного ввода и накопления загрязнений, ослабление редокс-стабильности и рост риска миграции тяжелых металлов.

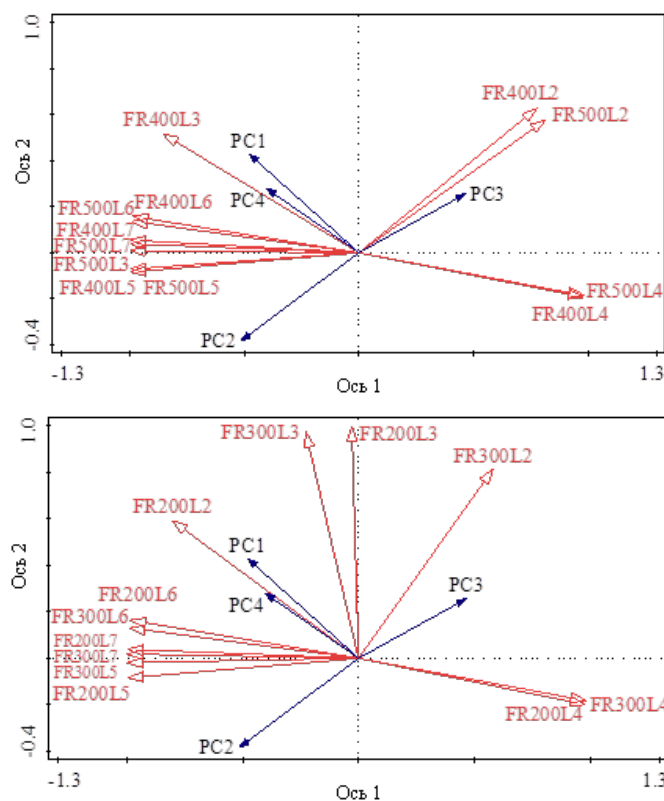


Рис. 10. Результаты редундантного анализа между типами землепользования и главными компонентами качества воды на разных масштабах буферных зон в районе р. Ворсклы (основное русло и притоки)<sup>1</sup>

Fig. 10. Redundancy analysis between land use types and water quality principal components at multiple buffer scales in the Vorskla River area (main channel and tributaries)

Векторы воды (L6) и болота (L7) группируются рядом с застройкой и направлены так же, что свидетельствует о сходных путях отклика на главные компоненты. Поскольку водоемы и болота нередко расположены в понижениях рельефа и концах дренажных путей, они аккумулируют поверхностный сток с окружающих земель (особенно застроенных территорий), проявляя высокую согласованность с источниками загрязнения [Pang, Guan, 2024].

<sup>1</sup> Примечание: FR — «притоки и основное русло»

### Основное русло

Анализ рис. 11 говорит о том, что в зоне основного русла при радиусах буфера 200–400 м доля пашни (L2) показывает умеренно-сильную положительную корреляцию с PC1 и PC4, умеренно-слабую положительную — с PC2 и умеренно-слабую отрицательную — с PC3. В буфере 500 м связь пашни с PC1 и PC4 остается сильной, а корреляции с PC2 и PC3 становятся статистически несущественными. Это указывает на то, что на малых радиусах расширение пашни через поверхностный сток или возврат ирригационных вод увеличивает содержание буферных компонентов и ионов жесткости в воде [Rossi et al., 2023], тогда как влияние на антропогенную нагрузку и миграцию металлов с увеличением радиуса ослабевает.

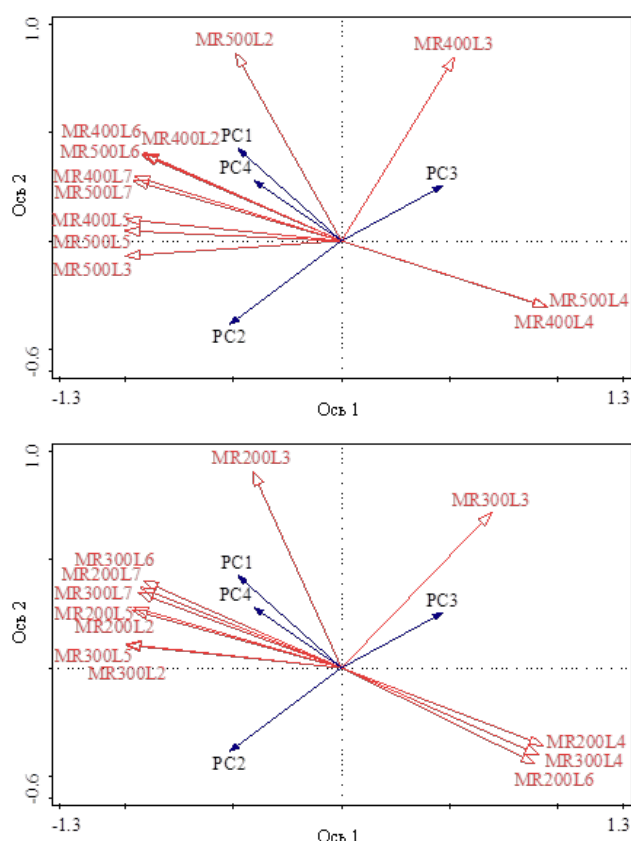


Рис. 11. Результаты редундантного анализа между типами землепользования и главными компонентами качества воды при разных масштабах буферных зон в районе р. Ворсклы (основное русло)<sup>1</sup>

Fig. 11. Redundancy analysis between land use types and water quality principal components at multiple buffer scales in the Vorskla River area (main channel)

Лес (L3) демонстрирует отчетливую зависимость от радиуса буфера. При 200 м фиксируется сильная положительная связь с PC1 и PC4, что подтверждает его роль в усилении буферных свойств и жесткости; при этом значимых корреляций с PC2 и PC3 нет. На 300–400 м положительные связи с PC1 и PC4 ослабевают, корреляция с PC2 становится резко отрицательной, а с PC3 — резко положительной: лес начинает работать как барьер для загрязнений и фактор, поддерживающий окислительные условия, вероятно из-за

<sup>1</sup> Примечание: MR — «основное русло»

затенения кронами и развитого подстилочного слоя [Park, Lee, 2020; Vera, Engel, 2021]. В буфере 500 м лес умеренно положительно связан с PC1, PC4 и PC2 и умеренно отрицательно — с PC3, что свидетельствует о восстановлении комплексной регулирующей функции при менее выраженной поддержке редокс-баланса.

Тенденции для пастбища (L4) и застройки (L5) по радиусам буфера вдоль основного русла в целом повторяют картину, полученную для зоны «притоки + основное русло».

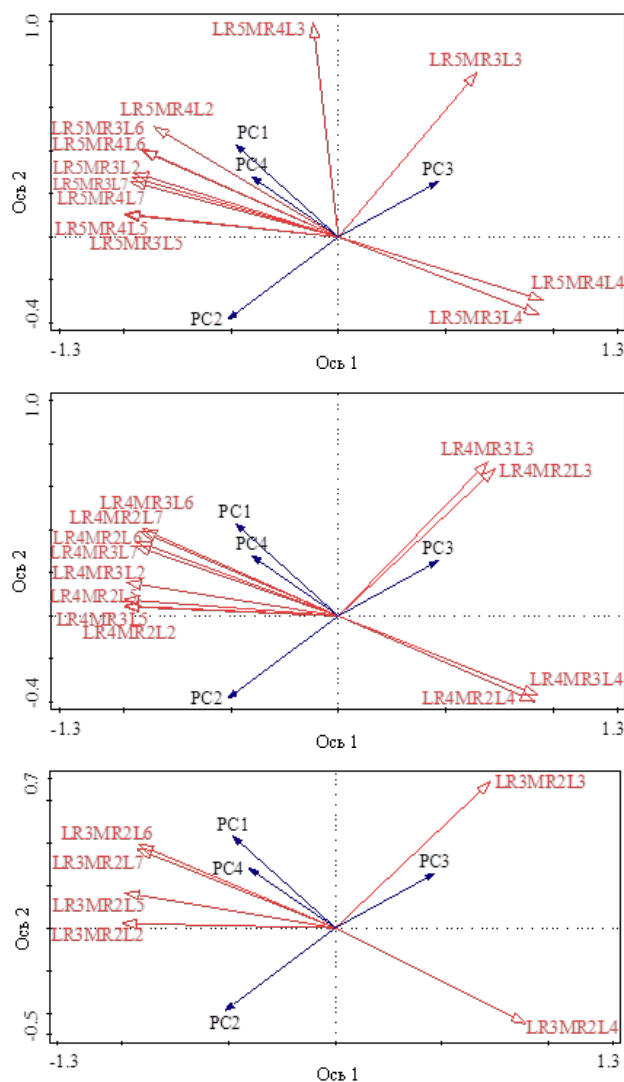


Рис. 12. Результаты редундантного анализа между типами землепользования и главными компонентами качества воды при разных масштабах буферных зон в районе р. Ворсклы (левый и правый берег основного русла)<sup>1</sup>

Fig. 12. Redundancy analysis between land use types and water quality principal components at multiple buffer scales in the Vorskla River area (left and right banks of the main channel)

В буфере шириной 200 м направление вектора воды (L6) практически совпадает с направлением пастбища, указывая на схожий контроль гидрологических условий и путей

<sup>1</sup> Примечание: LR — «левый берег», MR — «правый берег основного русла». Обозначение, имеющее вид LR500MR400L2, означает долю пашни (L2) в буферной зоне 500 м по левому берегу и 400 м по правому берегу. Аналогично для других обозначений



диффузного стока. В диапазоне 300–500 м векторы воды и болота (L7) смещаются к сектору застройки, что свидетельствует о тесной связи аккумуляции стока с зонами активной хозяйственной деятельности. Вероятно, на фоне интенсивного антропогенного давления самоочищающая функция болот ослабевает, а водоемы получают повышенную нагрузку от стока с застроенных территорий [Deng et al., 2020; Shen et al., 2022; Edo et al., 2024].

#### *Левый и правый берега основного русла*

В комбинационных буферных зонах левого и правого берегов основного русла векторы пашни (L2), застройки (L5), воды (L6) и болота (L7) сгруппированы и направлены одинаково: все категории положительно коррелируют с PC1, PC2 и PC4 и отрицательно — с PC3. Это указывает на то, что данные типы землепользования, вероятно через диффузный сток, береговую застройку и гидравлическую связность [Singh, Steinnes, 2020; Haynes, Zhou, 2022; Chatterjee, Shah, 2023], увеличивают концентрацию буферных компонентов, ионов жесткости и антропогенных индикаторов, одновременно ослабляя редокс-условия и тем самым способствуя мобилизации тяжелых металлов.

Лес (L3) в ряде сочетаний буферов (LR300MR200, LR400MR300, LR400MR200, LR500MR300) показывает одинаковое направление вектора: значимая отрицательная корреляция с PC2 и положительная — с PC3 при отсутствии связи с PC1 и PC4, что свидетельствует о высокой способности леса перехватывать загрязнения и поддерживать окислительный режим. При расширении до LR500MR400 направление меняется: лес становится умеренно положительно связанным с PC1, PC4 и PC3 и умеренно отрицательно — с PC2, демонстрируя более комплексное участие в регулировании минерализации и редокс-среды на крупном радиусе.

Позиция вектора пастбища (L4) в комбинированных буферах левого и правого берегов близка к таковой для пастбищ в буферах основного русла и зоны «притоки + русла», подтверждая стабильную способность пастбищ снижать загрязненность и поддерживать окислительный потенциал независимо от масштаба.

#### *Итог*

Результаты выполненного исследования показали, что в бассейне р. Ворсклы влияние категорий землепользования на главные компоненты качества воды имеет как общие закономерности, так и выраженную масштабную и региональную специфику. В исследованных масштабах застройка, водные поверхности и болота положительно коррелируют с ионными и антропогенными индикаторами и отрицательно — с редокс-компонентами, что указывает на их вовлеченность в процессы накопления загрязняющих веществ. Доля пастбищ во всех буферах положительно связана с PC3, что может отражать их роль в поддержании более окислительных условий. Эффекты пашни и леса зависят от радиуса: на расстоянии 300–500 м пашня демонстрирует наиболее выраженные связи с минерализацией и жесткостью воды, тогда как лес при радиусе 300 м положительно коррелирует с PC1, включающим сульфаты, pH и показатели буферной емкости воды.

В разных типах буферов проявляются различия: в зоне «притоки + русла» природные площади (особенно пастбища) эффективнее смягчают нагрузку, тогда как в основных и комбинированных русловых буферах вода и болота по характеру отклика сближаются с застройкой, что связано с рельефом: более пологий левый берег накапливает сток, а крутой правый — повышает транзит загрязнений.

## **ВЫВОДЫ**

Настоящее исследование опирается на 23 показателя качества воды, полученные в 2008–2022 гг. в замыкающем створе трансграничной р. Ворскле «Козинка», а также на три временных среза землепользования/наземного покрова (LULC) за 2010, 2015 и 2020 гг. Вокруг Яковлевского ГОКа были сформированы 13 концентрических буферов с радиусами

от 100 до 3 000 м, вокруг гидропоста «Козинка» — 11 буферных зон с радиусами от 100 до 2 000 м. Вдоль притоков и основного русла установлены стандартные буферы шириной 200–500 м, а также дополнительные асимметричные буферы, отражающие морфологию речной долины. Главные компоненты качества воды определялись методом PCA, взаимосвязь с LULC — методом RDA.

Четыре главные компоненты, извлеченные PCA, суммарно объясняют 71,94 % дисперсии: PC1 (26,8 %) описывает совокупное влияние буферной емкости и органической нагрузки; PC2 (19,2 %) отражает антропогенный ввод и диффузное загрязнение; PC3 (14,5 %) характеризует редокс-режим и миграцию тяжелых металлов; PC4 (11,4 %) соответствует жесткости воды и ионному составу.

Анализ распределения типов землепользования демонстрирует выраженный пространственный градиент. По мере сокращения радиуса буферной зоны вокруг Яковлевского ГОКа структура земель резко смещается в сторону искусственных покрытий: доля застройки увеличивается с 6,09 % при 3 000 м до 62,47 % на 400 м от центра рудника, тогда как площадь пашни, пастбищ, болот и открытой воды последовательно сокращается вплоть до полного исчезновения. В буферах 100–2 000 м вокруг поста «Козинка» доминируют лес и пашня: лес формирует U-образный профиль с минимумом на 800 м, пашня — инвертированный U-профиль с максимумом  $\approx 65\%$  на том же радиусе. Доля пастбищ резко растет внутри 200 м (до 18,5 %), тогда как застройка и вода остаются  $<4,66\%$  и  $<0,46\%$ . По продольному профилю долины Ворсклы выявляется следующий градиент: «притоки → основное русло → оба берега основного русла». В зоне «притоки + русла» площадь пашни достигает 53–59 %, в одностороннем буфере основного русла —  $\approx 50\%$ , причем доля застройки здесь вдвое выше, чем в притоках. В комбинированном береговом буфере максимальная площадь искусственных поверхностей.

В бассейне Ворсклы выявлены статистически значимые связи между категориями землепользования и главными компонентами качества воды (PC1–PC4), что отражает как общие закономерности, так и пространственно-масштабные особенности. В исследованных условиях застройка, водные поверхности и болота демонстрируют положительные корреляции с ионными и антропогенными индикаторами и отрицательные — с редокс-компонентами. Доля пастбищ во всех буферах положительно связана с PC3, что соответствует более окислительным условиям. Пашня на радиусах 300–500 м показывает наиболее выраженные корреляции с PC1 и PC4 (минерализация и жесткость воды). Лес в пределах 300 м положительно коррелирует с PC1, включающим сульфаты, pH и показатели буферной емкости воды, а на больших радиусах сила связей снижается. Пространственные различия выражены в том, что в зоне «притоки + русла» природные категории (особенно пастбища) чаще ассоциированы с меньшими антропогенными индикаторами, тогда как в комбинированных береговых буферах вода и болота по направлению корреляций сближаются с застройкой, что согласуется с морфологическими особенностями речной долины.

Таким образом, примененный комплекс статистических методов оказался эффективным для выявления масштабно-региональных связей между типами землепользования и интегральными показателями качества воды в бассейне р. Ворсклы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бударина В. А., Игнатенко И. М., Косинова И. И. Эколого-геохимические особенности почв и грунтов зоны аэрации территорий сельских поселений районов воздействия крупных горнодобывающих комплексов. Горный журнал, 2024. № 11. С. 103–108. DOI: 10.17580/gzh.2024.11.16.

*Киселев В. В., Корнилов А. Г.* Оценка гидрохимического состояния малых рек Белгородской области в пределах сельских территорий. Региональные геосистемы, 2024. Т. 48. № 3. С. 368–381. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-3-368-381.

*Корнилова Е. А., Лисецкий Ф. Н., Родионова М. Е.* Гидроэкологические особенности реки Ворсклы (российский участок) в контексте природно-хозяйственных изменений. Региональные геосистемы, 2023. Т. 47. № 4. С. 550–568. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-550-568.

*Котлов С. Н., Целищев Н. А., Сотник Е. А., Гилязов Д. Х.* Геолого-гидрогеологические факторы формирования водопритоков в горные выработки Яковлевского рудника. Горный журнал, 2023. № 5. С. 108–113. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.16.

*Лисецкий Ф. Н., Снесивцева А. Д., Хуан Л.* Особенности изменения поверхностных вод в бассейне реки Ворскла в динамике развития железорудного производства. Актуальные проблемы геологии и гидрометеорологии в условиях меняющегося мира. Материалы IV Международной научно-практической конференции, 2025. С. 133–139.

*Мальцев К. А., Талипова С. Н., Магзянов И. И., Сомов А. А., Мальцева Т. С.* Анализ точности эрозионного потенциала рельефа с использованием свободно распространяемых цифровых моделей рельефа. Цифровая география. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 2024. С. 35–38. Электронный ресурс: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/cifrovaya-geografiya.pdf> (дата обращения 29.04.2025).

*Buryak Z., Grigoreva O.* A Project-Based Approach to Reduce the Risk of Soil Erosion in Agricultural Landscapes of Small River Basins Using GIS Technologies. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: Surveying Geology and Mining Ecology Management, 2019. V. 19. No. 5-2. P. 19–26. DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.003.

*Buryak Z. A., Lisetskii F. N., Gusarov A. V., Narozhnyaya A. G., Kitov M.* Basin-Scale Approach to Integration of Agro- and Hydroecological Monitoring for Sustainable Environmental Management: A Case Study of Belgorod Oblast, European Russia. Sustainability, 2022. V. 14. No. 2. Art. 927. DOI: 10.3390/su14020927.

*Chatterjee A., Shah M. P.* Constructed Wetland for Metals: Removal Mechanisms and Analytical Challenges. Recent Trends in Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 31–41. DOI: 10.1007/978-981-99-2564-3\_2.

*Chen X., Zhou W., Pickett S. T. A., Li W., Han L.* Spatial-Temporal Variations of Water Quality and its Relationship to Land Use and Land Cover in Beijing, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016. V. 13. Art. 449. DOI: 10.3390/ijerph13050449.

*Deng Q., Zhang X., Zhang L., Shao X., Gu T.* The Impact Mechanism of Human Activities on the Evolution of Coastal Wetlands in the Liaohe River Delta. Frontiers in Ecology and Evolution, 2024. V. 12. Art. 1423234. DOI: 10.3389/fevo.2024.1423234.

*Edo G. I., Itoje-Akpokiniovo L. O., Obasohan P., Ikpekoru V. O., Samuel P. O., Jikah A. N., Agbo J. J.* Impact of Environmental Pollution from Human Activities on Water, Air Quality and Climate Change. Ecological Frontiers, 2024. V. 44. Iss. 5. P. 874–889. DOI: 10.1016/j.ecofro.2024.02.014.

*Hawker L., Uhe P., Neal J.* FABDEM Updates — FABDEM V1–2. Geomorphometry. Proceedings of International Conference. Zenodo, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.8101259.

*Haynes R. J., Zhou Y. F.* Retention of Heavy Metals by Dredged Sediments and Their Management Following Land Application. Advances in Agronomy, 2022. V. 171. P. 191–254. DOI: 10.1016/bs.agron.2021.08.004.

*Huang L.* LULC Dynamics and Carbon Sequestration in Major Iron Ore Regions of Russia and China. *Regional Geosystems*, 2024. V. 48. No. 4. P. 542–564. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-542-564.

*Huang W., Mao J., Zhu D., Lin C.* Impacts of Land Use and Land Cover on Water Quality at Multiple Buffer-Zone Scales in a Lakeside City. *Water*, 2020, V. 12. No. 1. Art. 47. DOI: 10.3390/w12010047.

*Kong T., Zhang K., Huang L., Di J., Wang Y., Zhang J.* Effects of Mixed Application of Microbial Agents on Growth and Substrate Properties of Alfalfa in Coal Gangue Matrix with Different Particle Sizes. *Journal of China Coal Society*, 2023. V. 48. No. S1. P. 241–251 (in Chinese). DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0615.

*Li S., Peng S., Jin B., Zhou J., Li Y.* Multi-Scale Relationship Between Land Use/Land Cover Types and Water Quality in Different Pollution Source Areas in Fuxian Lake Basin. *PeerJ*, 2019. V. 7. Art. e7283. DOI: 10.7717/peerj.7283.

*Lisetskii F. N., Buryak Z. A.* Runoff of Water and its Quality Under the Combined Impact of Agricultural Activities and Urban Development in a Small River Basin. *Water*, 2023. V. 15. No. 13. Art. 2443. DOI: 10.3390/w15132443.

*Nuruzzaman M., Bahar M. M., Naidu R.* Diffuse Soil Pollution from Agriculture: Impacts and Remediation. *Science of The Total Environment*, 2025. V. 962. Art. 178398. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178398.

*Pang X., Guan M.* Influence of Construction Works on Urban Streamflow Water Quality Variations. *Science of The Total Environment*, 2024. V. 955. Art. 176852. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176852.

*Park S. R., Lee S. W.* Spatially Varying and Scale-Dependent Relationships of Land Use Types with Stream Water Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020. V. 17. No. 5. Art. 1673. DOI: 10.3390/ijerph17051673.

*Qiu L. F., Zhu J. X., Pan Y., Dang Y. X., Wu S. H.* Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-Grain Production. *Huan Jing ke Xue*, 2023. V. 44. No. 5. P. 2829–2837 (in Chinese). DOI: 10.13227/j.hj.kx.202206190.

*Ren Z.* Biogeochemical Consequences of Grassland Degradation on Linked Soil, Stream, and Lake Ecosystems in Watersheds: A Short Review. *Watershed Ecology and the Environment*, 2022. V. 4. P. 202–210. DOI: 10.1016/j.wsee.2022.11.005.

*Rossi M. L., Kremer P., Cravotta III C. A., Seng K. E., Goldsmith S. T.* Land Development and Road Salt Usage Drive Long-Term Changes in Major-Ion Chemistry of Streamwater in Six Exurban and Suburban Watersheds, Southeastern Pennsylvania, 1999–2019. *Frontiers in Environmental Science*, 2023. V. 11. Art. 1153133. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1153133.

*Shen Z., Hou X., Li W., Aini G.* Relating Landscape Characteristics to Non-Point Source Pollution in a Typical Urbanized Watershed in the Municipality of Beijing. *Landscape and Urban Planning*, 2014. V. 123. P. 96–107. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.12.007.

*Shen S., Pu J., Xu C., Wang Y., Luo W., Wen B.* Effects of Human Disturbance on Riparian Wetland Landscape Pattern in a Coastal Region. *Fuxian Lake Basin*, 2022. V. 14. No. 20. Art. 5160. DOI: 10.3390/rs14205160.

*Shi P., Zhang Y., Li Z., Li P., Xu G.* Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Seasonal Water Quality at Multi-Spatial Scales. *Catena*, 2017. V. 151. P. 182–190. DOI: 10.1016/j.catena.2016.12.017.



- Singh B. R., Steinnes E.* Soil and Water Contamination by Heavy Metals. Soil Processes and Water Quality. CRC Press, 2020. P. 233–271. DOI: 10.1201/9781003070184.
- Song W., Zhang H., Li X., Song H., Niu B., Shi X., Li J.* Safe Utilization of Cultivated Land in High-Risk Areas of Soil Heavy Metal Pollution Based on Soil Resilience. *Frontiers in Environmental Science*, 2022. V. 10. Art. 889069. DOI: 10.3389/fenvs.2022.889069.
- Vera M. J. A., Engel B.* Multi-Scale Analysis of the Dependence of Water Quality on Land Use Using Linear and Mixed Models. *Water*, 2021. V. 13. No. 19. Art. 2618. DOI: 10.3390/w13192618.
- Whitmore T. J., Brenner M., Kolasa K. V., Kenney W. F., Riedinger-Whitmore M. A., Curtis J. H., Smoak J. M.* Inadvertent Alkalization of a Florida Lake Caused by Increased Ionic and Nutrient Loading to its Watershed. *Journal of Paleolimnology*, 2006. V. 36. P. 353–370. DOI: 10.1007/s10933-006-9000-2.
- Wu J., Lu J.* Landscape Patterns Regulate Non-Point Source Nutrient Pollution in an Agricultural Watershed. *Science of the Total Environment*, 2019. V. 669. P. 377–388. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.014.
- Yermolaev O. P., Lisetskii F. N., Marinina O. A., Buryak Z. A.* Basin and Eco-Regional Approach to Optimize the Use of Water and Land Resources. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2015. V. 12. No. S2. P. 145–158. DOI: 10.13005/bbra/2021.
- Yermolaev O. P., Mukharamova S. S., Maltsev K. A., Ivanov M. A., Ermolaeva P. O., Gayazov A. I., Lisetskii F. N.* Geographic Information System and Geoportal River Basins of the European Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018. V. 107. No. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012108.
- Zhang D., Huang R., Gao X. S.* Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain. *Huan Jing Ke Xue*, 2022. V. 43. No. 2. P. 946–956 (in Chinese). DOI: 10.13227/j.hjlx.202105139.
- Zhang X., Liu L., Chen X., Gao Y., Xie S., Mi J.* GLC\_FCS30: Global Land Cover Product with Fine Classification System at 30 m Using Time-Series Landsat Imagery. *Earth System Science Data*, 2021. V. 13. No. 6. P. 2753–2776. DOI: 10.5194/essd-13-2753-2021.
- Zhao J., Lin L., Yang K., Liu Q., Qian G.* Influences of Land Use on Water Quality in a Reticular River Network Area: A Case Study in Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015. V. 137 P. 20–29. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.12.010.

## REFERENCES

- Budarina V. A., Ignatenko I. M., Kosinova I. I.* Ecological and Geochemical Features of Aeration Zone in Rural Areas in Regions of Influence of Large Mining Facilities. *Gornyi Zhurnal (Mining Journal)*, 2024. No. 11. P. 103–108 (in Russian). DOI: 10.17580/gzh.2024.11.16.
- Buryak Z., Grigoreva O.* A Project-Based Approach to Reduce the Risk of Soil Erosion in Agricultural Landscapes of Small River Basins Using GIS Technologies. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: Surveying Geology and Mining Ecology Management*, 2019. V. 19. No. 5-2. P. 19–26. DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.003.
- Buryak Z. A., Lisetskii F. N., Gusarov A. V., Narozhnyaya A. G., Kitov M.* Basin-Scale Approach to Integration of Agro- and Hydroecological Monitoring for Sustainable Environmental Management: A Case Study of Belgorod Oblast, European Russia. *Sustainability*, 2022. V. 14. No. 2. Art. 927. DOI: 10.3390/su14020927.



*Chatterjee A., Shah M. P.* Constructed Wetland for Metals: Removal Mechanisms and Analytical Challenges. Recent Trends in Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 31–41. DOI: 10.1007/978-981-99-2564-3\_2.

*Chen X., Zhou W., Pickett S. T. A., Li W., Han L.* Spatial-Temporal Variations of Water Quality and its Relationship to Land Use and Land Cover in Beijing, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016. V. 13. Art. 449. DOI: 10.3390/ijerph13050449.

*Deng Q., Zhang X., Zhang L., Shao X., Gu T.* The Impact Mechanism of Human Activities on the Evolution of Coastal Wetlands in the Liaohe River Delta. Frontiers in Ecology and Evolution, 2024. V. 12. Art. 1423234. DOI: 10.3389/fevo.2024.1423234.

*Edo G. I., Itoje-Akpokiniovo L. O., Obasohan P., Ikpekoru V. O., Samuel P. O., Jikah A. N., Agbo J. J.* Impact of Environmental Pollution from Human Activities on Water, Air Quality and Climate Change. Ecological Frontiers, 2024. V. 44. Iss. 5. P. 874–889. DOI: 10.1016/j.ecofro.2024.02.014.

*Hawker L., Uhe P., Neal J.* FABDEM Updates — FABDEM V1–2. Geomorphometry. Proceedings of International Conference. Zenodo, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.8101259.

*Haynes R. J., Zhou Y. F.* Retention of Heavy Metals by Dredged Sediments and Their Management Following Land Application. Advances in Agronomy, 2022. V. 171. P. 191–254. DOI: 10.1016/bs.agron.2021.08.004.

*Huang L.* LULC Dynamics and Carbon Sequestration in Major Iron Ore Regions of Russia and China. Regional Geosystems, 2024. V. 48. No. 4. P. 542–564. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-542-564.

*Huang W., Mao J., Zhu D., Lin C.* Impacts of Land Use and Land Cover on Water Quality at Multiple Buffer-Zone Scales in a Lakeside City. Water, 2020, V. 12. No. 1. Art. 47. DOI: 10.3390/w12010047.

*Kiselev V. V., Kornilov A. G.* Assessing the Hydrochemical State of Small Rivers within Rural Areas of the Belgorod Region. Regional Geosystems, 2024. V. 48. No. 3. P. 368–381 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-3-368-381.

*Kong T., Zhang K., Huang L., Di J., Wang Y., Zhang J.* Effects of Mixed Application of Microbial Agents on Growth and Substrate Properties of Alfalfa in Coal Gangue Matrix with Different Particle Sizes. Journal of China Coal Society, 2023. V. 48. No. S1. P. 241–251 (in Chinese). DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0615.

*Kornilova E. A., Lisetskii F. N., Rodionova M. E.* Hydroecological Features of the Vorskla River in the Context of Natural and Economic Changes. Regional Geosystems, 2023. V. 47. No. 4. P. 550–568 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-550-568.

*Kotlov S. N., Tselishchev N. A., Sotnik E. A., Gilyazev D. H.* Geological and Hydrogeological Factors of Initiation of Water Inflow in Yakovlevo Mine. Gornyi Zhurnal (Mining Journal), 2023. No. 5. P. 108–113 (in Russian). DOI: 10.17580/gzh.2023.05.16.

*Li S., Peng S., Jin B., Zhou J., Li Y.* Multi-Scale Relationship Between Land Use/Land Cover Types and Water Quality in Different Pollution Source Areas in Fuxian Lake Basin. PeerJ, 2019. V. 7. Art. e7283. DOI: 10.7717/peerj.7283.

*Lisetskii F. N., Buryak Z. A.* Runoff of Water and its Quality Under the Combined Impact of Agricultural Activities and Urban Development in a Small River Basin. Water, 2023. V. 15. No. 13. Art. 2443. DOI: 10.3390/w15132443.

*Lisetskii F. N., Spesivtseva A. D., Huang L.* Features of Changes in Surface Waters in the Vorskla River Basin in the Dynamics of Iron Ore Production Development. Current Problems of Geology

and Hydrometeorology in a Changing World. Proceedings of IV International Scientific and Practical Conference, 2025. P. 133–139 (in Russian).

*Maltsev K. A., Talipova S. N., Magzyanov I. I., Somov A. A., Maltseva T. S.* Accuracy Analysis of LS-Factor Using Freely Available Digital Elevation Models. Digital Geography. Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, 2024. P. 35–38 (in Russian). Web resource: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/cifrovaya-geografiya.pdf> (accessed 29.04.2025).

*Nuruzzaman M., Bahar M. M., Naidu R.* Diffuse Soil Pollution from Agriculture: Impacts and Remediation. Science of The Total Environment, 2025. V. 962. Art. 178398. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178398.

*Pang X., Guan M.* Influence of Construction Works on Urban Streamflow Water Quality Variations. Science of The Total Environment, 2024. V. 955. Art. 176852. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176852.

*Park S. R., Lee S. W.* Spatially Varying and Scale-Dependent Relationships of Land Use Types with Stream Water Quality. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020. V. 17. No. 5. Art. 1673. DOI: 10.3390/ijerph17051673.

*Qiu L. F., Zhu J. X., Pan Y., Dang Y. X., Wu S. H.* Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-Grain Production. Huan Jing ke Xue, 2023. V. 44. No. 5. P. 2829–2837 (in Chinese). DOI: 10.13227/j.hj.kx.202206190.

*Ren Z.* Biogeochemical Consequences of Grassland Degradation on Linked Soil, Stream, and Lake Ecosystems in Watersheds: A Short Review. Watershed Ecology and the Environment, 2022. V. 4. P. 202–210. DOI: 10.1016/j.wsee.2022.11.005.

*Rossi M. L., Kremer P., Cravotta III C. A., Seng K. E., Goldsmith S. T.* Land Development and Road Salt Usage Drive Long-Term Changes in Major-Ion Chemistry of Streamwater in Six Exurban and Suburban Watersheds, Southeastern Pennsylvania, 1999–2019. Frontiers in Environmental Science, 2023. V. 11. Art. 1153133. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1153133.

*Shen Z., Hou X., Li W., Aini G.* Relating Landscape Characteristics to Non-Point Source Pollution in a Typical Urbanized Watershed in the Municipality of Beijing. Landscape and Urban Planning, 2014. V. 123. P. 96–107. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.12.007.

*Shen S., Pu J., Xu C., Wang Y., Luo W., Wen B.* Effects of Human Disturbance on Riparian Wetland Landscape Pattern in a Coastal Region. Fuxian Lake Basin, 2022. V. 14. No. 20. Art. 5160. DOI: 10.3390/rs14205160.

*Shi P., Zhang Y., Li Z., Li P., Xu G.* Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Seasonal Water Quality at Multi-Spatial Scales. Catena, 2017. V. 151. P. 182–190. DOI: 10.1016/j.catena.2016.12.017.

*Singh B. R., Steinnes E.* Soil and Water Contamination by Heavy Metals. Soil Processes and Water Quality. CRC Press, 2020. P. 233–271. DOI: 10.1201/9781003070184.

*Song W., Zhang H., Li X., Song H., Niu B., Shi X., Li J.* Safe Utilization of Cultivated Land in High-Risk Areas of Soil Heavy Metal Pollution Based on Soil Resilience. Frontiers in Environmental Science, 2022. V. 10. Art. 889069. DOI: 10.3389/fenvs.2022.889069.

*Vera M. J. A., Engel B.* Multi-Scale Analysis of the Dependence of Water Quality on Land Use Using Linear and Mixed Models. Water, 2021. V. 13. No. 19. Art. 2618. DOI: 10.3390/w13192618.

*Whitmore T. J., Brenner M., Kolasa K. V., Kenney W. F., Riedinger-Whitmore M. A., Curtis J. H., Smoak J. M.* Inadvertent Alkalization of a Florida Lake Caused by Increased Ionic and Nutrient Loading to its Watershed. *Journal of Paleolimnology*, 2006. V. 36. P. 353–370. DOI: 10.1007/s10933-006-9000-2.

*Wu J., Lu J.* Landscape Patterns Regulate Non-Point Source Nutrient Pollution in an Agricultural Watershed. *Science of the Total Environment*, 2019. V. 669. P. 377–388. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.014.

*Yermolaev O. P., Lisetskii F. N., Marinina O. A., Buryak Z. A.* Basin and Eco-Regional Approach to Optimize the Use of Water and Land Resources. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2015. V. 12. No. S2. P. 145–158. DOI: 10.13005/bbra/2021.

*Yermolaev O. P., Mukharamova S. S., Maltsev K. A., Ivanov M. A., Ermolaeva P. O., Gayazov A. I., Lisetskii F. N.* Geographic Information System and Geoportal River Basins of the European Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018. V. 107. No. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012108.

*Zhang D., Huang R., Gao X. S.* Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain. *Huan Jing Ke Xue*, 2022. V. 43. No. 2. P. 946–956 (in Chinese). DOI: 10.13227/j.hjxx.202105139.

*Zhang X., Liu L., Chen X., Gao Y., Xie S., Mi J.* GLC\_FCS30: Global Land Cover Product with Fine Classification System at 30 m Using Time-Series Landsat Imagery. *Earth System Science Data*, 2021. V. 13. No. 6. P. 2753–2776. DOI: 10.5194/essd-13-2753-2021.

*Zhao J., Lin L., Yang K., Liu Q., Qian G.* Influences of Land Use on Water Quality in a Reticular River Network Area: A Case Study in Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015. V. 137 P. 20–29. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.12.010.