

Пространственно-временные особенности гидроэкологических изменений в бассейне реки Ворсклы

Ф. Н. Лисецкий , А. Д. Спесивцева, П. А. Украинский, А. О. Полетаев

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Российская Федерация
(308015, г. Белгород, ул. Победы, 85)

Аннотация. Цель – определение гидроэкологических тенденций для речного бассейна региона КМА на основе комплексного анализа временных рядов по изменению климатических условий на водосборе, расходов и качества воды, а также оценки трансформации состава загрязнителей в донных отложениях р. Ворскла на всем ее протяжении.

Материалы и методы. Данные Росгидромета, включающие временные ряды по расходу воды, 20 показателям и удельному комбинаторному индексу загрязненности воды, были обработаны методом корреляционно-регрессионного анализа, авторские данные по содержанию 15 загрязнителей в донных отложениях были обобщены через суммарный показатель загрязнения с использованием величин ПДК и регионального фона.

Результаты и обсуждение. Выполнен сопряженный анализ изменения климатических показателей на водосборе и расходов воды р. Ворскла за 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг., а также установлена зависимость качества воды по 20 показателям от расхода воды для периода 2008-2022 гг., используя статистические методы. Представлены результаты расчета суммарного показателя загрязнения донных отложений с учетом содержания 15 загрязнителей относительно ПДК и величин регионального фона.

Выводы. Годовые величины расходов воды р. Ворскла уменьшились при сравнении двух 30-летних периодов на 17 %, а с 2009 г. отмечается устойчивая тенденция снижения водности. Климатическая обусловленность расходов воды резко понизилась в 1991-2020 гг. по сравнению с предшествующим периодом. Наиболее чувствительными индикаторами самоочищающей способности реки выступают сульфаты, цинк и химическое потребление кислорода, величины которых снижаются при повышенной водности. Из 15 загрязнителей донных отложений направленно уменьшение концентраций от истока к устью установлено по комплексу из 6 тяжелых металлов.

Ключевые слова: климатические изменения, расход воды, загрязнители вод, дренажные воды, шахтные воды, донные отложения.

Источник финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FZWG-2025-0006.

Для цитирования: Лисецкий Ф. Н., Спесивцева А. Д., Украинский П. А., Полетаев А. О. Пространственно-временные особенности гидроэкологических изменений в бассейне реки Ворсклы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2025, № 3, с. 84-92. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/84-92>

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние малых рек Центрального Черноземья характеризуется увеличением минерализации и общей жесткости воды, а также повсеместным превышением содержания общего железа, аммонийного и нитритного азота [13]. Эти проблемы усугубляются при расположении речных бассейнов в районах добычи минерального сырья. В последнее время активно разрабатывается концепция междисциплинарного понимания взаимодействия поверхностных и подземных вод (SW-GW) в целях моделирования и бассейнового управления водными ресурсами [19, 21, 17]. Такие вопросы, как изменение трендов климатических факторов, динамика водности рек, оценка вклада дренажных и шахтных вод в количество и качество поверхностных

вод, загрязнение незащищенных горизонтов подземных вод, поступление твердого стока с водосборов и заиление русел, очистка от донных отложений и ее влияние на качество вод формируют информационное поле для решения проблемы по созданию интегрированной системы рационального использования водных ресурсов на основе 3D моделирования. Гидрология, гидрохимия, качество воды малых рек, в особенности низких порядков, связаны с местными ландшафтообразующими и антропогенными процессами, в отличие от больших рек, режимы которых, экологическое состояние во многом обусловлены климатическими факторами. Закономерно, что малые реки наиболее уязвимы и восприимчивы к внешним, особенно антропогенным, влияниям, что проявляется в отступании верховий водотоков, заилении и



интенсивном их зарастании водной растительностью, ухудшении экологического состояния рек (активизации процесса эвтрофикации, изменении гидрохимического баланса и др.) [13]. Сопряженные экологические оценки воздействия паводковых отложений с водосборов на загрязнение тяжелыми металлами и мышьяком в поймах, степени загрязнения седиментов в реках указывают на необходимость проведения экологического мониторинга в парагенетических элементах бассейновой организации ландшафта [18]. Ранее, используя оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов и объемов поступающего с водосборов твердого стока к замыкающему створу, было установлено, что в реках Белгородчины преобладают процессы заиления [16]. Притом, что оценки темпов аккумуляции в днищах долин малых водосборов показали, что в зоне лесостепи из-за изменений климата за 1986-2015 гг. по сравнению с 1963-1985 гг. сокращение среднегодовых темпов аккумуляции составило 2,2 раза [2]. Широкое распространения эрозии в агроландшафтах бассейнов малых рек определяет необходимость использования эколого-гидрологического подхода при планировании и внедрении водохозяйственных и природоохранных мероприятий [5]. Принципиально важно, чтобы воспроизводство природного или близкого к нему состояния русел рек становилось завершающим этапом экологического оздоровления всего водосбора. Для почвоводоохранного обустройства агроландшафтов Белгородской области с 2012 г. была разработана и внедрялась бассейновая концепция природопользования [11], в рамках которой был разработан гидроэкологический блок проектов [10]. Применительно к бассейну р. Ворскла после разработки программы комплексного использования природных ресурсов [7], проектов геопланирования на бассейновых принципах для каждого муниципального образования на водосборе [1], были предложены новые подходы по организации гидроэкологического мониторинга [20].

Наряду с периодичностью, присущей природным процессам, антропогенные факторы трансформируют гидрологический и гидрохимический режимы водотоков, которые обуславливают их способность к саморегуляции, зависящей от объемов руслового стока. Расходы и объемы русловых вод той или иной обеспеченности, включая отклонения от величины экологического стока [4], определяют изменение геохимии донных отложений, как и они, в свою очередь, могут влиять на гидрохимический режим водных масс. При заилении русел рек их течение замедляется, при росте температуры воды понижается количество кислорода, снижается рыбохозяйственная ценность водоемов, а очистка русел от донных отложений может способствовать улучшению экологической и санитарно-эпидемиологической обстановки, уменьшению угроз подтопления территорий [14]. По инициативе губернатора Белгородской области с 2022 г. реализуется региональная программа «Наши реки». Приоритетные водные объекты для расчистки отдельных зон речных русел и акваторий водоемов были

определены местными жителями, используя онлайн голосование. В итоге, для исполнения программы были выбраны 740 объектов общей длиной более 2000 км и общей площадью около 5000 км². С 2022 г. НИУ БелГУ выполнен цикл работ, по которым были подготовлены отчеты НИР, где нашли отражение результаты оценок уровня высоких вод, загрязнения воды и донных отложений, обоснования мест карты намыва и реабилитационных мероприятий. К 2025 г. было обследовано более 640 га водных объектов, на которых запроектировано под очистку от донных отложений 589 тыс. м³ грунта, 656 тыс. м² от жесткой растительности [6]. Согласно программе «Наши реки», в 2025 г. планируется очистить 26 водных объектов, в том числе и на трех участках р. Ворскла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования выбран бассейн средней реки (р. Ворскла) в регионе Курской магнитной аномалии (КМА), где Яковлевским ГОКом проводится разработка железорудного месторождения (рис. 1). В пределах РФ (Белгородской обл.) площадь бассейна составляет 2481,6 км² (из 14700 км²), длина – 118 км (из 464 км). Для отслеживания аномалий глобального климата Всемирной метеорологической организацией рекомендовано рассчитывать многолетнее значение метеопараметров за 30-летний период. В работе годовые величины температуры воздуха (°C) и сумм осадков (мм) были обобщены по нормам метеопараметров, используя данные метеостанции Готня в бассейне Ворсклы. Сопряженные с метеоданными величины расхода воды получены по гидрологическому посту (ГП) I разряда Козинка в 116 км от истока реки. Качество воды оценивали по удельному комбинаторному индексу загрязненности воды (УКИЗВ), используя набор показателей (взвешенные вещества, растворенный кислород, окисляемость, хлориды, сульфаты, фосфаты, HCO₃, трифлуралин, фенолы, нефтепродукты, АСПАВ, БПК₅, NH₄, H₂SiO₃, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Ni) для периода 2008-2022 гг. (за 2023 г. данные отсутствуют). Суммарный показатель загрязнения для донных отложений рассчитан для двух вариантов: 1) по превышению содержания 15 загрязнителей относительно ПДК ($Z_{y(15)}$); 2) по превышению содержания тяжелых металлов над величинами регионального фона, установленного по данным из истоков трех рек региона ($Z_{y(10)}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Река Ворскла в приграничной зоне за период наблюдений с 1930 г. отличается значительной изменчивостью годовых расходов воды. Средние величины расходов уменьшились при сравнении двух 30-летних периодов (1961-1990 гг. и 1991-2020 гг.), с 5,97 м³/с до 5,11 м³/с. Хотя при расширении второго периода до диапазона 1978-2022 гг., как было установлено [9], расходы были больше на 10 % в сравнении с 1930-1977 гг. Межгодовая разница в экстремумах расходов за 1991-2020 гг. составляла 7,28 м³/с. Период повышенной водности наблюдался с середины 1990-х гг. до конца

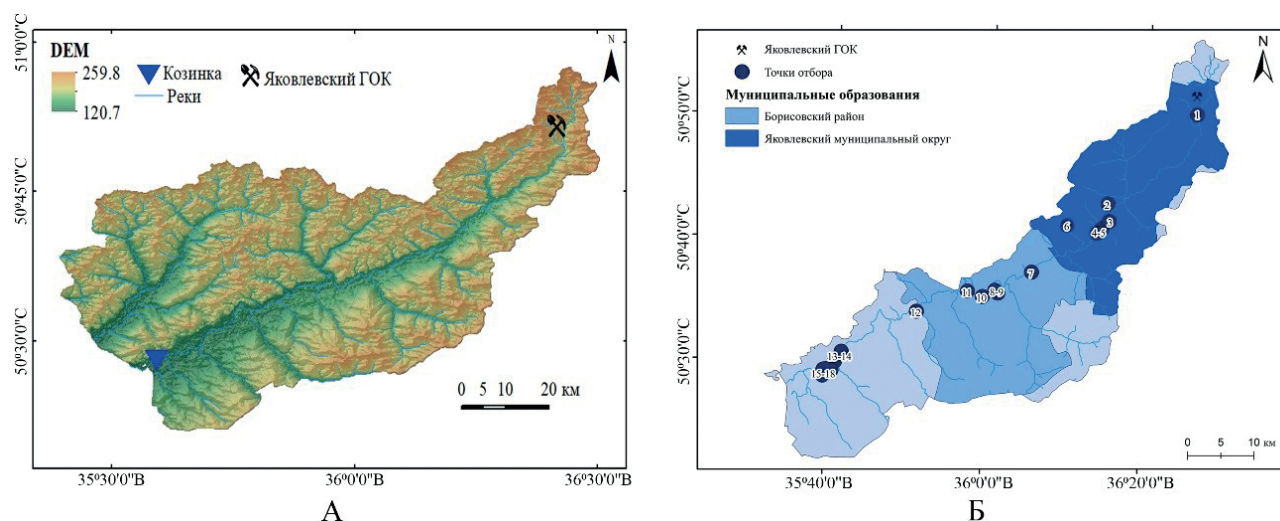


Рис. 1. Цифровая модель рельефа бассейна р. Ворскла (А) и точки отбора донных отложений в границах муниципальных образований Белгородской области (Б)

[Fig. 1. Digital relief model of the Vorskla River basin (A) and sampling points of bottom sediments within the boundaries of municipalities of the Belgorod region (B)]

2000-х гг. (за исключением 1999-2002 гг.). Начиная с 2009 г., отмечалась устойчивая тенденция снижения годовых расходов воды, которая по интегральной кривой маркируется 2013 г., с проявлением периода с рекордно низкими величинами 2,57 и 2,52 м³/с (2014 г. и 2015 г.). При этом следует отметить, что эта гидрологическая ситуация проходила при участии и наиболее устойчивого (с начала 2000-х гг.) сброса дренажных и шахтных вод при разработке Яковлевского рудника.

Водность рек зависит от совокупности климатических факторов, которые в последнее время с достаточно длительными периодами антициклональных атмосферных процессов не так очевидно, как ранее, определяют динамику расходов речной воды [8], а в целом, в современной обстановке изменяется генезис речного стока [3]. Приходная часть водного баланса бассейнов существенно зависит от изменений региональной климатической системы, особенно по динамике атмосферных осадков. На большей части Белгородской области, где мело-мергельные породы верхнемелового возраста выступают рельефообразующими породами, складываются благоприятные условия для инфильтрации атмос-

ферных осадков (50-80 мм), а величина питания водоносного горизонта атмосферными осадками составляет 5-8 % [15]. При проведении корреляционного анализа зависимости годовых величин расходов воды (Q , м³/с) и суммы осадков (O , мм) получено уравнение линейной регрессии, имеющее вид: $Q = 0,0123 \cdot O - 1,4846$ при средней тесноте связи между переменными ($r = 0,67$). В последующий период (1991-2020 гг.) связь между переменными очень слабая. При учете помимо условий увлажнения теплообеспеченности было установлено, что за период 1961-1990 гг. связь между осадками/температурой и расходом воды была значительно сильнее, чем в период 1991-2020 гг. (табл. 1). Таким образом, если в первый 30-летний период порядка 45 % изменений в годовой динамике расхода воды Ворсклы можно было объяснить изменениями температуры и осадков, то в 1991-2020 гг. климатическая обусловленность расходов воды резко снизилась, что в условиях пониженной водности определило более высокую стохастичность речного стока из-за перестройки атмосферной циркуляции.

Сравнительный анализ данных, полученных в 1998 г., с более ранними результатами оценок по пери-

Таблица 1

Статистическая оценка связи между осадками/температурой и расходом воды р. Ворскла по двум 30-летним периодам климатических норм, установленных Всемирной метеорологической организацией (1961-1990 гг. и 1991-2020 гг.)

[Table 1. Statistical assessment of the relationship between precipitation/temperature and water discharge of the Vorskla River for two 30-year periods of climate norms established by the World Meteorological Organization (1961-1990 and 1991-2020)]

Параметры статистики / Statistics Parameters	1961-1990	1991-2020
Множественный R	0,671	0,490
R-квадрат	0,450	0,240
Нормированный R-квадрат	0,408	0,184
Стандартная ошибка	1,816	1,577

одам 1963-1968 гг. и 1978-1983 гг. показал, что параметры, определяющие фоновый состав воды р. Ворскла (катионы кальция, магния, сульфат-ионов, хлорид-ионов, гидрокарбонат-ионов, временная, постоянная и общая жёсткость), остаются в многолетнем режиме сравнительно постоянными (с сезонными вариациями). Так, в 1998 г. в трех створах истока реки (левый и правый истоки и место их слияния у с. Покровка) вода прозрачная, без запаха и цвета, умеренно-жесткая, $pH = 7,0-7,8$, не содержит железа, нитритов и нитратов, концентрация хлоридов и сульфатов составляла 25 и 23 мг/л соответственно, при этом содержание фторид-иона варьировало от 0,65 до 0,82 мг/л (при нормативе от 0,7 мг/л). Как правило, даже в верховьях малых рек (например, р. Ворсколец – приток Ворсклы) из-за близости землепользований и населенных пунктов основными загрязнителями с кратностью превышения ПДК выступают нитриты и фосфаты. Ситуация с качеством воды и составом поллютантов значительно меняется после сброса дренажных и шахтных вод Яковлевского ГОКа через пруд-накопитель. Необходимость осушения месторождения при его разработке обусловлена сложными гидрогеологическими условиями, так как область оруденения перекрыта осадочной толщей (мощностью до 550 м), вмещающей семь водоносных горизонтов. В среднем, объемы сброса дренажных и шахтных вод соотносятся как 2,4 к 1. Пробы воды 1998 г., полученные в 1 км ниже по течению от места сброса дренажных и шахтных вод показали повышенное содержание фторид-иона (1,8-2,6 мг/л), трехвалентного железа (0,29-0,36 мг/л) и фосфора (до 5,5 мг/л). После каскада прудов ниже по течению снижалось содержание в речной воде фторид-ионов от 0,21 до 0,005 мг/л и сульфатов от 41-46 до 33 мг/л, но сохранялась первоначальная концентрация хлоридов (10-50 мг/л), меди и общего железа. Современные оценки качества воды в пограничном створе (ГП Козинка) показывают, что за период 2008-2022 гг. среднее содержание в воде сульфатов составляло 114 ± 5 мг/л, хлоридов – 60 ± 3 мг/л, фосфатов – $0,21 \pm 0,02$ мг/л,

меди – $1 \pm 0,2$ мг/л и общего железа – $0,08 \pm 0,01$ мг/л. Таким образом, самоочищающая способность р. Ворскла в замыкающем створе российского участка этой трансграничной реки не проявляется в отношении сульфатов, хлоридов, фосфора и (предположительно) фтора и бора.

Межгодовые изменения величины показателя УКИЗВ (данные ГП Козинка) показывают, что качество воды Ворсклы преимущественно относится к классу очень загрязненная (3б), а в 20 % случаев соответствует классу грязная (4а). Ранее [12] отмечено, что за 2008-2022 гг. возросло влияние селитебно-сельскохозяйственной нагрузки на качество речной воды. По данным ГП Козинка за период 2008-2023 гг. расход воды (Q) в р. Ворскла в среднем составлял $4,15 \pm 0,31$ ($2,52 \div 6,91$) м³/с, а для величины УКИЗВ оценки были следующие: $3,17 \pm 0,16$ ($2,01 \div 4,38$). Как показывает эмпирическая зависимость, представленная на рисунке 2, при увеличении расходов (м³/с) с 2,5 до 6,5 величина УКИЗВ снижается в 1,4 раза. Наиболее сенсорными индикаторами самоочищающей способности реки выступают три показателя: содержание сульфат-ионов, Zn и ХПК, концентрации которых снижаются при повышенной водности.

Согласно корреляционной матрице (рис. 3), для средних расходов воды в 2008-2022 гг. только для шести показателей качества воды (ХПК (COD), фенолы (Phen), растворенный кислород (O₂), SO₄⁻², Zn, Ni) из 20 исходных параметров наблюдается значимая попарная связь, при этом в 15 комбинациях установлена теснота связи сильнее, чем +0,4/-0,4. Среднегодовая величина расхода воды на уровне вероятности $p < 0,1$ имеет положительную корреляционную связь с содержанием растворенного кислорода и никеля, а отрицательную – с содержанием цинка и сульфатов. Содержание цинка и никеля в речной воде выступают антагонистами, в свою очередь, содержание цинка находится в антагонизме с содержанием кислорода (что проявляется при низких расходах воды), а содержание никеля (в условиях более высокой водности) – с химическим потреблением кислорода.

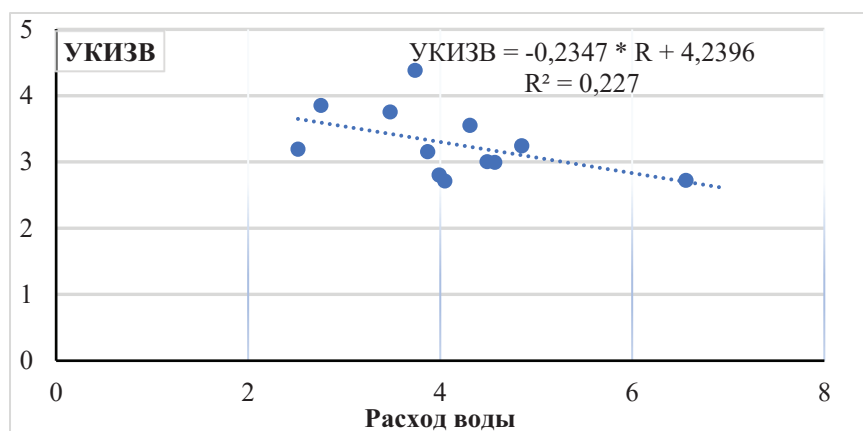


Рис. 2. Зависимость величины УКИЗВ от расходов воды (Q, м³/с) по данным ГП Козинка

[Fig. 2. Dependence of the value of the UKIZV on water consumption (Q, м³/с) according to data from the Kozinka hydrographic post]

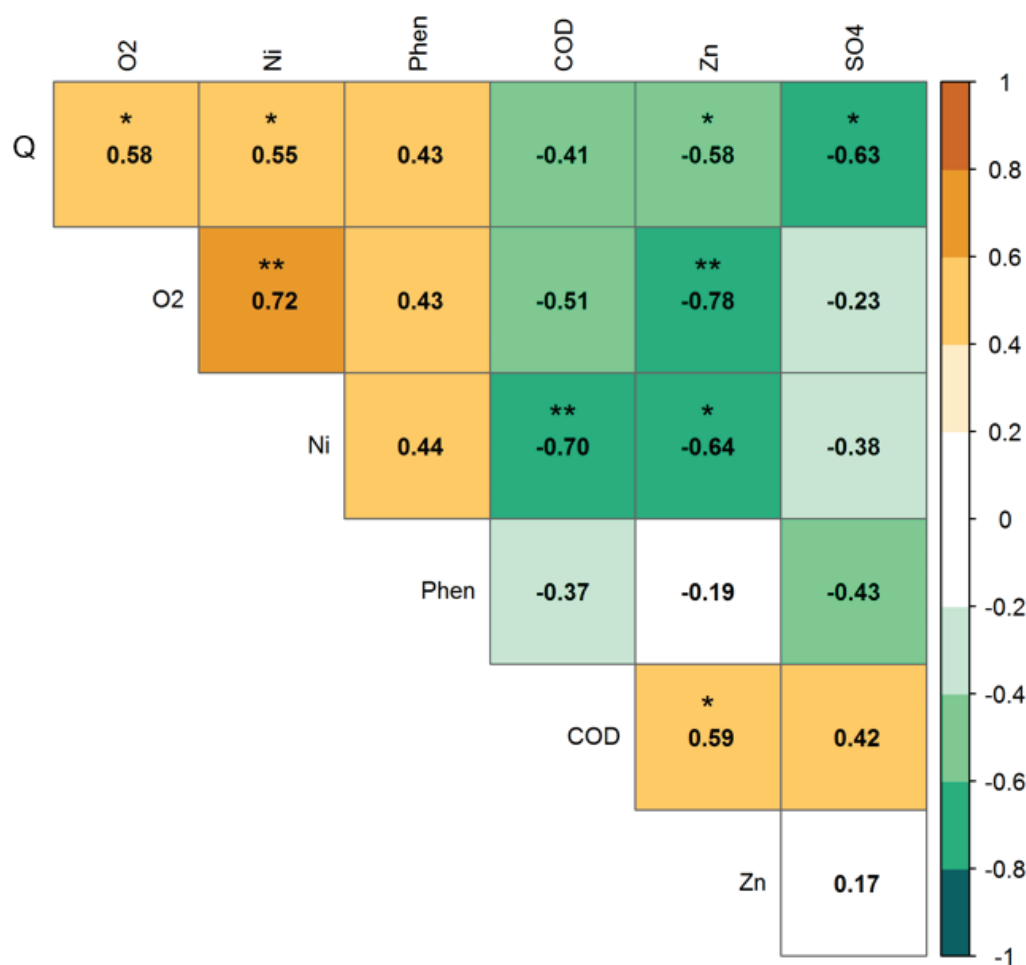


Рис. 3. Корреляционная матрица расходов воды (Q, м³/с) и шести информативных показателей качества воды (ГП Козинка). Обозначения p-значений: ** p<0,05, * p<0,1

[Fig. 3. Correlation matrix of water flow rates (Q, m³/s) and the six most informative water quality indicators (Kozinka hydrological post). p-values: ** p<0,05, * p<0,1]

Если сравнить гидрохимические данные из места сброса вод из прудов-отстойников в Ворсклу (102 км выше по течению) и по ГП Козинка, то в замыкающем створе содержание хлоридов и железа уменьшается в 8,2 и 2,8 раза соответственно, содержание сульфатов понижается лишь в 1,2 раза, однако содержание меди (0,95 мг/л) и цинка (1,53 мг/л) превышает экологический норматив (ПДК р.х.). В целом, можно заключить, что влияние сброса в два раза более минерализованных рудничных и дренажных вод из Яковлевского ГОКа по сравнению с речными водами ниже сброса прослеживается вплоть до пограничного створа по таким компонентам, как фтор, бор, сульфаты, хлориды. В то же время уже после 2-3 км от места сброса вод из прудов-отстойников железорудного производства происходит замещение структуры загрязнителей под воздействием хозяйственной деятельности на водосборе иного профиля (предприятий АПК, ЖКХ и др.). Примечательно, что в условиях более высокой водности реки за счет поступления дренажных и шахтных вод (3 млн м³ в год) на протяжении 10-15 км от места сброса отмечается понижение концентрации нитратов в р. Ворскла.

Состав загрязняющих веществ в донных осадках относительно первой зоны у истока и до влияния ГОКа по трем отрезкам русла реки формирует четыре группы со своими векторами изменения состава поллютантов на всем протяжении реки (табл. 2). Первая группа характеризуется направленным уменьшением концентрации загрязнителей по всей длине русла (со средним уменьшением коэффициентов превышений относительно первой зоны от 1,9 до 1,1 и 0,9): V, Zn, Ni, Cu, As, Fe₂O₃ и Zy (10). Вторая группа отличается тем, что уже с 5 км и на всем оставшемся протяжении коэффициенты превышений относительно первой зоны ниже, чем в первой зоне, по Cr, Co, нефтепродуктам и NO₂. Для третьей группы характерно превышение в устьевой зоне (106-115 км) относительно зоны 62-65 км величин показателей: карбонаты, Mn, Pb и NO₃. Четвертая группа, в противоположность третьей, включает те показатели, которые ниже 3 км от истока имеют более высокие значения, но в устьевой зоне их величины меньше, чем в зоне выше по течению (62-65 км): азот аммонийный и показатель загрязнения по 15 поллютантам (Zy(15)), как и его максимумы.

Распределение зон загрязнения донных отложений по длине русла р. Ворскла
 [Table 2. Distribution of bottom sediment pollution zones along the length of the riverbed in the Vorskla River]

Показатели / Indicators	Единица измерения / Unit of measurement		Величины / Values			
Расстояние от истока	км	Фон (0)	3	4,9–35,7	61,8–64,5	105,8–115,3
Cr	мг/кг	75,71	79,89	63,30	50,55	43,49
V	мг/кг	63,54	55,30	77,88	66,80	53,98
Zn	мг/кг	44,01	28,37	79,15	37,75	28,67
Ni	мг/кг	26,34	15,18	30,84	16,47	12,56
Cu	мг/кг	20,81	12,27	26,23	15,37	11,17
Pb	мг/кг	18,73	15,25	16,87	14,47	15,21
Co	мг/кг	15,75	13,86	6,83	9,44	9,74
As	мг/кг	6,84	6,51	7,52	4,94	4,16
Fe ₂ O ₃	%	3,03	2,49	4,37	2,68	2,23
Mn	мг/кг	349,52	98,00	425,28	215,01	318,54
Карбонаты	%	1,89	1,65	6,40	1,36	2,73
Азот аммонийный	мг/л	–	2,83	19,11	19,98	16,17
Нефтепродукты	мг/л	–	2,38	0,03	0,04	0,03
NO ₃	мг/л	–	1,51	4,99	4,69	4,77
NO ₂	мг/л	–	2,00	0,04	0,04	0,03
Z _{y(10)}	–	–	4,16	8,77	4,43	3,76
Z _{y(15)} / Z _{y(15)} max	–	–	27,50	39,27/44	39,85/43	31,90/42

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительным анализом климатической обусловленности среднегодовых расходов воды в замыкающем створе р. Ворскла за 30-летние периоды, определено, что в 1991–2020 гг. вклад климатических факторов в формирование водности реки снизился в 1,9 раза по сравнению с предшествующим периодом (1961–1990 гг.). Это можно объяснить, как изменением внутригодовой структуры поверхностного стока в теплый и холодный периоды (при резком сокращении вклада талого стока), так и определенной трансформацией земельных угодий на водосборной площади (к 2020 г. соотношение между пашней и экологическим фондом земель (леса, пастбища, сенокосы) составило 56 % на 40 %). Сравнение двух 30-летних периодов показало, что по сравнению с 1961–1990 гг. годовые величины расходов воды в р. Ворскла снизились в более поздний период на 17 %, а с 2009 г. наметилась устойчивая тенденция пониженной водности. В межгодовой динамике максимальный потенциал самоочищающей способности р. Ворскла в замыкающем створе ее верхнего течения определяется возможностью снижения величины удельного комбинаторного индекса загрязненности воды на 26 % при увеличении расхода воды в 2,6 раза. Результатами оценки изменения концентраций 15 загрязнителей в донных отложениях по трем участкам русла р. Ворскла на общем протяжении 115 км выявлено, что наиболее часто отмечалась закономерность направленного уменьшения коэффициентов превышений содержания загрязнителей относительно истока (до 2 раз в устьевой зоне) по ве-

личине суммарного показателя загрязнения тяжелыми металлами/металлоидами, в особенности за счет V, Zn, Ni, Cu, Fe и As.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бассейновый подход к организации природопользования в Белгородской области / Ф. Н. Лисецкий, А. В. Дегтярь, А. Г. Нарожная и др. Белгород: Константа, 2013. 89 с.
2. Голосов В. Н. Водная эрозия почв в условиях изменений климата и землепользования: современное состояние и прогноз // *Эрозия почв и русловые процессы*, 2024, № 1, с. 19–34.
3. Дмитриева В. А., Сушков А. И., Закусилов В. П. Климатическая обусловленность современных гидроэкологических процессов в речных потоках бассейна Верхнего Дона // *Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология*, 2022, № 2, с. 118–127.
4. Дмитриева В. А. Экологический сток в речных потоках // *Региональные геосистемы*, 2022, т. 46, № 3, с. 424–433.
5. Зайцева А. С. Обоснование лесомелиоративных мероприятий на водосборной площади (на примере малой реки, Белгородская область) // *Региональные геосистемы*, 2020, т. 44, № 3, с. 307–318.
6. Китов М. В., Нарожная А. Г. Экологическое восстановление водных объектов на территории Белгородской области // *Материалы X Международной научной конференции «Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах»*, 2023, с. 69–71.
7. Концепция и программа комплексного использования природных ресурсов «Эко Ворскла – 2005». Белгород-Борисовка: Крестьянское Дело, 1997. 74 с.
8. Корнилов А. Г., Лебедева М. Г., Решетников В. С. Тренды изменения годового и сезонного стока р. Северский Донец за период инструментальных гидрологических наблюдений (на территории Белгородской области) // *Региональные геосистемы*, 2017, т. 38, № 4 (253), с. 133–140.

9. 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.
10. Лисецкий Ф. Н., Китов М. В. Почвоводоохранное обустройство агроландшафтов при бассейновой организации природопользования // *Тридцатое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: доклады и краткие сообщения*, 2015, с. 168-170.
11. Обеспечение оптимальной водоохранной лесистости при бассейновой организации природопользования / Я. В. Кузьменко, Ф. Н. Лисецкий, Ж. А. Кириленко, О. И. Григорьева // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2013, т. 15, № 3-2, с. 652-657.
12. Оценка гидрохимического состояния малых рек Белгородской области в пределах сельских территорий / В. В. Киселев, А. Г. Корнилов, В. В. Киселев, А. А. Корнилов // *Региональные геосистемы*, 2024, т. 48, № 3, с. 368-381.
13. Прожорина Т. И., Куролап С. А., Нагих Т. В. Оценка экологического состояния малых рек Воронежской области // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*, 2018, т. 42, № 2, с. 272-280.
14. Сметанин В. И., Согин А. В., Согин И. А. Очистка водоемов и русел малых рек с помощью отечественных технических средств // *Экономические стратегии*, 2010, т. 12, № 7-8, с. 88-91.
15. Смольянинов В. М. *Подземные воды Центрально-Черноземного региона: условия их формирования, использование*. Воронеж: Истоки, 2003. 250 с.
16. Спесивый О. В., Павлюк Я. В., Полумордвинов Н. С. Оценка заиления рек Белгородской области // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*, 2018, т. 42, № 1, с. 80-88.
17. Delottier H., Schilling O. S., Therrien R. Assessing the impact of surface water and groundwater interactions for regional-scale simulations of water table elevation // *Journal of Hydrology*, 2024, 639, Art. No. 131641.
18. Ilinskiy A., Evsenkin K., Pavlov A. Examination of heavy metal input from flood sediments in agricultural landscapes // *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 592, Art. No. 06003.
19. Lewandowski J., Meinikmann K., Krause S. Groundwater-surface water interactions: Recent advances and interdisciplinary challenges // *Water*, 2020, vol. 12, no. 1, Art. No. 296.
20. 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, vol. 15, no. 13, Art. No. 2443.
21. Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges / M. M. Ntona, G. Busico, M. Mastrocicco, N. Kazakis // *Science of the Total Environment*, 2022, 846, Art. No. 157355.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 06.05.2025

Принята к публикации: 01.09.2025

LAND HYDROLOGY, WATER RESOURCES, HYDROCHEMISTRY

UDC 911.9+574.5

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/84-92>

Spatio-Temporal Features of Hydroecological Changes in the Vorskla River Basin

F. N. Lisetskii✉, A. D. Spesivtseva, P. A. Ukrainskiy, A. O. Poletaev

*Belgorod State National Research University, Russian Federation
(85, Pobedy Str., Belgorod, 308015)*

Abstract. The purpose is to determine hydroecological trends for the river basin from KMA based on an integrated analysis of time series on change in climatic conditions in the catchment area, water consumption and quality. It is also necessary to assess the transformation of the pollutants composition in the bottom sediments of the Vorskla River along its entire length.

Materials and methods. The Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring data, including time series for water consumption, 20 indicators and a specific combinatorial index of water pollution, were processed using the correlation-regression analysis method. The author's data on the content of 15 pollutants in bottom sediments were summarized through a total pollution indicator using the MAC values and regional background.

Results and discussion. The changes in climate indicators in the catchment area and water consumption of the Vorskla River for 1961-1990 and 1991-2020 as well as the dependence of water quality on 20 indicators on water consumption for the period 2008-2022, were revealed using statistical methods. The results of calculating the total pollution index of bottom sediments, taking into account the content of 15 pollutants relative to the MAC and regional background values, were presented.

© Lisetskii F. N., Spesivtseva A. D., Ukrainskiy P. A., Poletaev A. O., 2025

✉ Fedor N. Lisetskii, e-mail: fnliset@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Conclusion. The average annual value of water discharge of the Vorskla River decreased by 17 % when comparing two 30-year periods, and since 2009 there has been a steady trend towards decreasing water content. The climatic determinacy of water discharge has sharply decreased in 1991-2020 compared to the previous period. The most sensitive indicators of the self-purification capacity of the river are sulfates, zinc and chemical oxygen demand, the values of which decrease with increased water content. A targeted decrease in concentrations in bottom sediments from the source to the mouth of the river was found among 15 pollutants for a complex of 6 heavy metals.

Key words: climate change, water consumption, water pollutants, drainage water, mine water, bottom sediments.

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

For citation: Lisetskii F.N., Spesivtseva A.D., Ukrainskiy P.A., Poletaev A.O. Spatio-Temporal Features of Hydroecological Changes in the Vorskla River Basin. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografia. Geoekologia*, 2025, no. 3, pp. 84-92 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/84-92>

REFERENCES

1. *Bassejnovyj podhod k organizacii prirodopol'zovaniya v Belgorodskoj oblasti* [Basin approach to environmental management in the Belgorod region] / F.N. Lisetskii, A.V. Degtyar, A.G. Narozhnyaya i dr. Belgorod: Konstanta, 2013. 89 p. (In Russ.)
2. Golosov V.N. Vodnaya eroziya pochv v usloviyah izmenenij klimata i zemlepol'zovaniya: sovremennoe sostoyanie i prognoz [Water soil erosion under climate and land use change: current status and forecast]. *Eroziya pochv i ruslovyje processy*, 2024, no. 1, pp. 19-34. (In Russ.)
3. Dmitrieva V.A., Sushkov A.I., Zakusilov V.P. Klimaticheskaya obuslovlennost' sovremennykh gidroekologicheskikh processov v rechnykh potokakh bassejna Verhnego Dona [Climatic conditionality of modern hydroecological processes in the river flows of the Upper Don basin]. *Vestnik VGU. Seriya: Geografia. Geoekologia*, 2022, no. 2, pp. 118-127. (In Russ.)
4. Dmitrieva V.A. Ekologicheskij stok v rechnykh potokakh [Ecological Runoff in the River Streams]. *Regional'nye geosistemy*, 2022, vol. 46, no. 3, pp. 424-433. (In Russ.)
5. Zaytseva A.S. Obosnovanie lesomeliorativnykh meropriyatij na vodosbornoj ploshchadi (na primere maloj reki, Belgorodskaya oblast') [Justification of forestry measures in the catchment area (on the example of a small river, Belgorod region)]. *Regional'nye geosistemy*, 2020, vol. 44, no. 3, pp. 307-318. (In Russ.)
6. Kitov M.V., Narozhnyaya A.G. Ekologicheskoe vosstanovlenie vodnykh ob'ektov na territorii Belgorodskoj oblasti [Ecological restoration of water bodies in the Belgorod region]. *Materialy X Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Problemy prirodopol'zovaniya i ekologicheskaya situaciya v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh stranah»*, 2023, pp. 69-71. (In Russ.)
7. *Koncepciya i programma kompleksnogo ispol'zovaniya prirodnih resursov «Eko Vorskla-2005»* [Concept and Program for the Integrated Use of Natural Resources «Eco Vorskla-2005»]. Belgorod-Borisovka: Krest'yanskoe Delo, 1997. 74 p. (In Russ.)
8. Kornilov A.G., Lebedeva M.G., Reshetnikov V.S. Trendy izmeneniya godovogo i sezonnogo stoka r. Severskij Donec za period instrumental'nykh gidrologicheskikh nablyudenij (na territorii Belgorodskoj oblasti) [Trends in annual and seasonal runoff of the Severskiy Donets river for the period instrumental hydrological observations (in the Belgorod region)]. *Regional'nye geosistemy*, 2017, vol. 38, no. 4 (253), pp. 133-140. (In Russ.)
9. Kornilova E.A., Lisetskii F.N., Rodionova M.E. Gidroekologicheskie osobennosti reki Vorskly (rossijskij uchastok) v kontekste prirodno-hozyajstvennykh izmenenij [Hydroecological Features of the Vorskla River in the Context of Natural and Economic Changes]. *Regional'nye geosistemy*, 2023, vol. 47, no. 4, pp. 550-568. (In Russ.)
10. Lisetskii F.N., Kitov M.V. Pochvovodoohrannoe obustroystvo agrolandshaftov pri bassejnovoj organizacii prirodopol'zovaniya [Soil conservation of agrolandscapes at the basin organization of environmental management]. *Tridcatoe plenarnoe mezhvuzovskoe koordinacionnoe soveshchanie po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh processov: doklady i kratkie soobshcheniya, Naberezhnye Chelny, 06-08 oktyabrya 2015 goda*, 2015, pp. 168-170. (In Russ.)
11. Obespechenie optimal'noj vodoohrannoj lesistosti pri bassejnovoj organizacii prirodopol'zovaniya [Ensuring optimal water protection forest cover in the basin organization of environmental management] / Ya.V. Kuzmenko, F.N. Lisetskii, J.A. Kirilenko, O.I. Grigorieva. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2013, vol. 15, no. 3-2, pp. 652-657. (In Russ.)
12. Ocenka gidrohimicheskogo sostoyaniya malyh rek Belgorodskoj oblasti v predelakh sel'skikh territorij [Assessing the Hydrochemical State of Small Rivers within Rural Areas of Belgorod Region] / V.V. Kiselev, A.G. Kornilov, V.V. Kiselev, A.A. Kornilov. *Regional'nye geosistemy*, 2024, vol. 48, no. 3, pp. 368-381. (In Russ.)
13. Prozhorina T.I., Kurolap S.A., Nagih T.V. Ocenka ekologicheskogo sostoyaniya malyh rek Voronezhskoj oblasti [Estimation of environmental state small rivers of the Voronezh region]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2018, vol. 42, no. 2, pp. 272-280. (In Russ.)
14. Smetanin V.I., Sogin A.V., Sogin I.A. Ochistka vodoemov i rusel malyh rek s pomoshch'yu otechestvennykh tekhnicheskikh sredstv [Cleaning of reservoirs and small riverbeds with the help of domestic technical means]. *Ekonomicheskie strategii*, 2010, vol. 12, no. 7-8, pp. 88-91. (In Russ.)
15. Smolyaninov V.M. *Podzemnye vody Central'no-Chernozemnogo regiona: usloviya ih formirovaniya, ispol'zovanie* [Groundwater of the Central Chernozem region: conditions of their formation, use]. Voronezh: Istoki, 2003. 250 p. (In Russ.)
16. Spesiviy O.V., Pavlyuk Ya.V., Polumordvinov N.S. Ocenka zaileniya rek Belgorodskoj oblasti [Evaluation of siltation of the Belgorod oblast rivers]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2018, vol. 42, no. 1, pp. 80-88. (In Russ.)
17. Delottier H., Schilling O.S., Therrien R. Assessing the impact of surface water and groundwater interactions for regional-scale simulations of water table elevation. *Journal of Hydrology*, 2024, 639, Art. No. 131641.
18. Ilinskiy A., Evsenkin K., Pavlov A. Examination of heavy metal input from flood sediments in agricultural landscapes. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 592, Art. No. 06003.
19. Lewandowski J., Meinikmann K., Krause S. Groundwater-surface water interactions: Recent advances and interdisciplinary challenges. *Water*, 2020, vol. 12, no. 1, Art. No. 296.
20. 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, vol. 15, no. 13, Art. No. 2443.

21. Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges / M. M. Ntona, G. Busico, M. Mastrocicco, N. Kazakis. *Science of the Total Environment*, 2022, 846, Art. No. 157355.

Лисецкий Федор Николаевич

Доктор географических наук, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-1663-9346, e-mail: fnliset@mail.ru

Спесивцева Анна Дмитриевна

Студент кафедры природопользования и земельного кадастра Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Российская Федерация, ORCID: 0009-0003-7093-1353, e-mail: 1561869@bsuedu.ru

Украинский Павел Александрович

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник Государственного задания № FZWG-2025-0006 Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-7234-592X, e-mail: ukrainski@bsuedu.ru

Полетаев Арсений Олегович

Кандидат географических наук, инженер ФРЦ аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-2161-041X, e-mail: poletaev@bsuedu.ru

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

Received: 06.05.2025

Accepted: 01.09.2025

Fedor N. Lisetskii

Dr. Sci. (Geogr.), Prof. at the Department of Nature Management and Land Cadastre, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-1663-9346, e-mail: fnliset@mail.ru

Anna D. Spesivtseva

Student at the Department of Nature Management and Land Cadastre, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, ORCID: 0009-0003-7093-1353, e-mail: 1561869@bsuedu.ru

Pavel A. Ukrainskiy

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher of State Assignment No. FZWG-2025-0006, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-7234-592X, e-mail: ukrainski@bsuedu.ru

Arseniy O. Poletaev

Cand. Sci. (Geogr.), Engineer at the Federal Regional Centre of Aerospace and Surface Monitoring of the Objects and Natural Resources, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-2161-041X, e-mail: poletaev@bsuedu.ru