

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СКЛОНОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ БАЛАНСА НАНОСОВ В ЭРОЗИОННО-РУСЛОВОЙ СИСТЕМЕ АНТРОПОГЕННО ПРЕОБРАЗОВАННОГО БАССЕЙНА МАЛОЙ РЕКИ

Ж.А. Буряк¹, А.Д. Спесивцева²

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии, биотехнологии и природопользования,
Научно-исследовательская лаборатория «Баланс С»

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле,
кафедра прикладной геологии и горного дела

¹ Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук.; e-mail: buryakzh@gmail.com

² Лаборант; e-mail: 1561869@bsuedu.ru

В статье на примере бассейна малой реки (верховье р. Ворсклы площадью 1,85 тыс. км², Белгородская область) рассматривается пространственно-временная изменчивость склонового стока наносов и оценивается ее влияние на величину расхода взвешенных наносов на замыкающем гидропосту. По данным гидрологического поста с. Козинка – р. Ворскла (116 км от истока) проанализированы временные ряды среднегодовых расходов взвешенных наносов с 1960 по 2021 г. Для расхода наносов установлена высокая неоднородность – за рассматриваемый период он снизился в 6,7 раза (по средним значениям с 0,27 до 0,04 кг/с). Установлено, что в балансе взвешенных наносов преобладает склоновая (бассейновая) составляющая, которая на аграрных водосборах преимущественно представлена смытым с пашни почвенным материалом. Содержание взвешенных наносов в речном стоке находит больший отклик к изменению интенсивности эрозии от снеготаяния, чем ливневой. Однако критическое снижение слоя талого стока, вызванное климатическими изменениями последних десятилетий, привело к снижению вклада эрозии при снеготаянии в годовые почвенные потери и, как следствие, к сокращению расхода взвешенных наносов в створе гидропоста. Количественная оценка темпов эрозии от ливневых осадков по модели WaTEM/SEDEM показала, что основным источником наносов являются распаханная территория – ежегодно с пашни выносятся 228,8 тыс. т почвенного материала. При этом в речную сеть поступает 76 тыс. т, т. е. 66% мобилизованного ливневым стоком почвенного материала аккумулируется в пределах водосбора. Рассмотрена динамика зарегулированности речного стока прудами. К настоящему времени с 62% площади водосбора твердый сток перехватывается прудами. За последние 40 лет площадь перехвата твердого стока увеличилась на 30%, а объем поступающих наносов в незарегулированную речную сеть сократился на 47%. Пруды и вышележащая овражно-балочная сеть задерживают 61,4 тыс. т наносов, что составляет 81% от объема склоновой эрозии бассейна. Таким образом, климатически обусловленное уменьшение талого стока с водосбора в сочетании со снижением максимальных расходов воды в половодье и водохозяйственными мероприятиями по регулированию речного стока нашли отклик в резком падении расхода взвешенных наносов с 1980-х гг. и их дальнейшем постепенном снижении.

Ключевые слова: водная эрозия, перехват стока, расход взвешенных наносов, коэффициент доставки наносов, WaTEM/SEDEM

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.4.5

ВВЕДЕНИЕ

Бассейновые территориальные структуры определяются как единые природные и антропогенные системы, поскольку в их пределах происходит естественное движение вещества, энергии и информации от водораздела до речного устья. Опыт управления природопользованием на уровне бассейнов малых рек показывает эффективность такого подхода для решения задач проектирования и реализации почвенно-водозащитных мероприятий на обрабатываемых землях в рамках концепции бассейнового природопользования [Lisetskii, 2022].

В последнее время рассмотрение как самого процесса водной эрозии почв, так и экологических последствий проявления эрозионных процессов (дегумификация почв, нарушение земель, деградация малых рек и др.) стимулировали интеграцию результатов моделирования среднегодовых темпов склоновой эрозии с оценками доставки наносов, вынесенных за пределы агроландшафтов водосборного бассейна [Batista et al., 2021]. Такой подход реализован в модели *WaTEM/SEDEM*, сочетающей расчетные темпы смыва по *Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* с моделированием механиз-

ма доставки наносов с водосбора. Верификация данной модели полевыми исследованиями (почвенно-морфологическим [Zhidkin et al., 2023] и радиоцезиевым [Голосов и др., 2022] методами) показала удовлетворительные результаты в моделировании среднегодовых темпов водной эрозии. Помимо точности среднесуточных оценок потерь почвы, модель хорошо отражает пространственное расположение зон с разной интенсивностью смыва, а также учитывает перемещение почвенного вещества при механической эрозии [Голосов и др., 2022].

Для антропогенно преобразованных бассейнов лесостепной и степной зон Евразии площадью до 100 км² бассейновая (эрозионная) составляющая стока взвешенных наносов рек по отношению к русловой составляет порядка 80% [Мозжерин, 2012]. В таких бассейнах сток наносов определяется прежде всего морфологией склонов водосбора и видом землепользования (степенью распаханности и лесистости).

Соотношение между доставляемыми к устью наносами и суммарным объемом мобилизованного рыхлого материала выражается через коэффициент доставки наносов (*sediment delivery ratio*, *SDR*). *SDR* обратно пропорционален площади водосбора: чем она больше, тем меньше относительное количество материала, выносимое через устье. По результатам обобщения полевых оценок *SDR* для малых водосборов (до 10 км²), доля выносимого материала колеблется от 12 до 95% и значительно зависит от морфологии водосбора [Безухов и др., 2019]. С увеличением площади бассейна *SDR* снижается. Для бассейнов Волги и Дона лесостепной зоны площадью до 2 тыс. км он составляет в среднем 22%, а при увеличении площади до 5 тыс. км² и выше – снижается до 7% [Эрозионно-русловые..., 2017, с. 485]. Внутри крупных речных бассейнов звенья различных порядков будут поставлять наносы с различной интенсивностью, что обеспечивает высокую внутрибассейновую вариабельность *SDR*.

Цель данного исследования – на примере водосбора малой реки (верхнее течение р. Ворсклы) оценить пространственно-временную изменчивость склонового стока наносов и установить ключевые факторы, определяющие интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов, отраженных в *SDR* и величине расхода взвешенных наносов в речном устье.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Краткая характеристика бассейна р. Ворсклы.

Река Ворскла входит в речную систему Днепра и является его левым притоком. Общая протяженность до устья составляет 464 км. В исследовании рассматривается верхнее течение реки длиной 116 км от истока до гидрологического поста с. Козинка с

площадью бассейна 1,85 тыс. км². Ворскла является трансграничной рекой. Речная долина и большая часть исследуемого водосбора (92%) находится в России (Белгородская область), 8% – в Украине (рис. 1). В пределах Белгородской области водосбор расположен в Борисовском, Грайворонском и Яковлевском муниципальных районах. Рассматриваемая часть речной системы Ворсклы по площади водосбора (до 2 тыс. км²) позволяет отнести ее к категории малых рек. Густота современной речной сети составляет 0,22 км/км², длина отдельных притоков не превышает 30 км. Густота овражно-балочной сети в бассейне составляет 0,85 км/км². Разница абсолютных высот между истоком реки и створом гидропоста составляет 75 м, что определяет средний уклон реки 0,65‰. Бассейн расположен на юго-западе Среднерусской возвышенности и относится к подзоне южной лесостепи. Согласно климатической норме ВМО 1991–2020 гг., в год выпадает 598 мм осадков, среднегодовая температура воздуха составляет 7,3°. Почвенный покров представлен преимущественно черноземами, типичными и выщелоченными, а также комплексом черноземов оподзоленных и темно-серых лесных почв.

Особенностью бассейна является геоморфологическая асимметрия его речной долины, обусловленная тектоникой, что определяет различный характер интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на макросклонах водосбора [Лисецкий и др., 2018]. Территория водосбора активно распахиывается, агрогенная нагрузка на почвы за последние 60 лет существенно не изменилась [Корнилова и др., 2023]. По статистическим данным муниципалитетов, в середине 1960-х гг. доля пашни составляла 67% и со временем планомерно снижалась. В современной структуре землепользования бассейна она составляет 58%, занимая площадь 1,07 тыс. км². Пологий и слаборасчлененный рельеф левого макросклона создает благоприятные условия для земледелия: распаханность здесь достигает 68% при средней крутизне обрабатываемых склонов 1,5°. При этом лесистость этой части бассейна предельно низкая – с учетом лесных полос она составляет всего 5%. На правом макросклоне, где исторически произрастали леса, до сих пор сохранились реликтовые массивы, которые обеспечивают достаточно высокий показатель лесистости – 26%. Здесь распахиываются черноземы оподзоленные и темно-серые лесные почвы, имеющие относительно низкую противоэрозионную устойчивость. А в сочетании с сильно расчлененным рельефом, устанавливается повышенный риск водной эрозии почв на пашне, занимающей 42% площади этой части бассейна. Согласно оценкам темпов современной эрозии в речных бассейнах европейской части России

[Yermolaev et al., 2023], суммарные среднегодовые эрозионные потери почвы с пашни в сетке малых водосборов Ворсклы варьируют от 2,5 т/га в год на левом макросклоне до 5,5 т/га в год на правом. При

этом результаты среднемасштабного моделирования показывают, что потери от ливневой эрозии в 16 раз превышают потери от эрозии талого стока [Речные бассейны..., 2025].

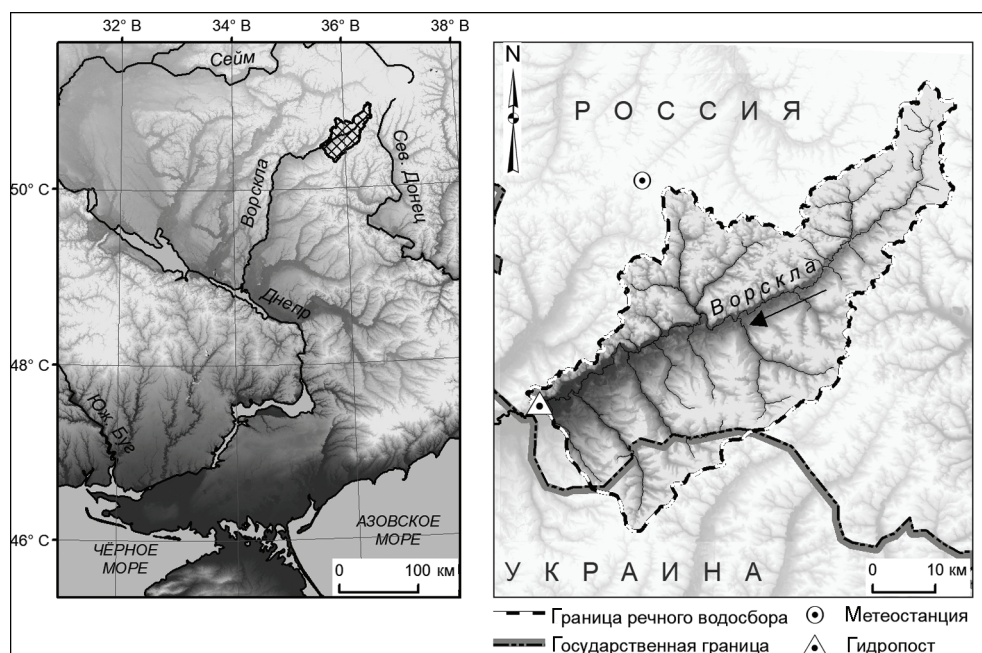


Рис. 1. Местоположение объекта исследования

Fig. 1. The location of the study area

Методы исследования. Данные о гидрологическом режиме реки получены по материалам Росгидромета (Центрально-Черноземное УГМС) по гидрологическому посту I разряда Козинка – р. Ворскла. Анализ временных рядов с 1960 по 2021 г. проводили для максимального расхода воды в период половодья ($Q_{\max}$, м³/с), когда формируется основной сток наносов, и среднегодового расхода взвешенных наносов (R , кг/с). Оценку однородности рядов многолетних гидрологических характеристик проводили для двух 31-летних интервалов по статистическим критериям Стьюдента (для средних значений) и Фишера (для дисперсий) с 5% уровнем значимости в соответствии с рекомендациями СТО ГГИ 58.08.41-2017. Климатические данные суточных наблюдений анализировали по ближайшей метеостанции Готня (34202), расположенной в 40 км к северо-востоку от гидропоста. Наблюдения за осадками здесь ведутся непрерывно с 1936 г. (за исключением 1941–1944 гг.). Данные брали из открытой базы ВНИИГМИ-МЦД [Булыгина и др., 2025].

Эрозионный потенциал ливневых осадков (ЭПО) рассчитывали по установленной [Канатьева и др., 2010] эмпирической зависимости между ЭПО и суммой осадков теплого периода более 10 мм, которые традиционно считаются потенциально эро-

зионно опасными. Она использовалась для расчета почвенных потерь последних десятилетий для ЕТР [Maltsev, Yermolaev, 2020] и имеет вид:

$$\text{ЭПО} = 3,19 \cdot e^{0,006 \times P10}, \quad (1)$$

где ЭПО – эрозионный потенциал ливневых осадков, МДж·мм·м⁻²·час⁻¹·год⁻¹; $P10$ – среднемноголетняя сумма слоя суточных осадков более 10 мм в теплое время года, мм (теплое время года определяется по моменту времени, когда среднесуточная температура воздуха выше 0°C).

Оценку темпов ливневой эрозии почв и объемов поступающих в речную сеть наносов выполняли по модели *WaTEM/SEDEM* v.2004 [Rompay van et al., 2001] с предварительной подготовкой пространственных данных ГИС-приложениях *ArcGIS* (модуль *SpatialAnalyst*) и *Whitebox GAT*. В основе модели лежит универсальное уравнение почвенных потерь *RUSLE*, дополненное расчетным блоком транспорта и аккумуляции наносов с учетом характерных параметров шероховатости для разных классов поверхностей в пределах водосбора. Таким образом, модель позволяет оценить баланс выносимых как с пашни, так и со всего водосбора наносов, с учетом структуры его угодий и противоэрозионной устойчивости почв.

Для расчета LS -фактора (длина и крутизна склона) [McCool et al., 1989] использовали глобальную цифровую модель рельефа *FABDEM V1-2* разрешением 30×30 м. Эрозионный индекс дождей осадков для территории исследования был принят $0,032 \text{ МДж} \cdot \text{мм}/(\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{год})$. Значения эродируемости разных типов почв брали из верифицированных данных для условий лесостепи Среднерусской возвышенности [Фомичева и др., 2024]: $35 \text{ кг в час}/(\text{МДж} \cdot \text{мм})$ для черноземов типичных, 38 – для черноземов оподзоленных, 52 – для темно-серых лесных. Почвозащитная роль возделываемых культур за ротацию севооборота относительно эродируемости чистого пара задана для всех посевных площадей единым значением $0,34$, полученным по результатам обобщения актуальных статистических данных о составе посевов Белгородской области [Buryak et al., 2022]. Структура землепользования бассейна была отвекторизована по материалам космической съемки высокого разрешения с ресурса *Google Earth*. Расчет почвенных потерь выполнен в двух вариантах. Первый – только для территории пашни по маске полей, что позволило оценить темпы агрогенной эрозии, рассчитать объем аккумулируемого и выносимого с пашни материала. Второй вариант расчета охватывал всю территорию водосбора с учетом пашни и конфигурации зон перехвата твердого стока на пути к речному руслу. Причем

второй вариант применялся как для всего водосбора, так и с учетом динамики площади перехвата твердого стока создаваемыми прудами. Картографирование динамики создания прудов выполняли по среднемасштабным картам масштаба $1:100\,000$ (1980–1990), материалам территориального землеустройства начала 1990-х гг., а также разновременным спутниковым снимкам с начала 2000-х гг. ресурса *Google Earth*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетняя динамика гидрологического режима р. Ворсклы. Взаимодействие движущихся водных масс и переносимых ими наносов является сложным нелинейным процессом. Несовпадение между расходом наносов и транспортирующей способностью потока приводит к неравновесности русловой системы и запускает процессы ее переформирования.

Многолетняя динамика гидрологических характеристик р. Ворсклы представлена на рис. 2. и в табл. 1. Анализ однородности гидрологических характеристик р. Ворсклы с 1960 по 2021 г. показал, что для периодов 1960–1990 и 1991–2021 гг. максимальный расход воды весеннего половодья $Q_{\max}$ и среднегодовой расход взвешенных наносов R достоверно оцениваются как неоднородные.

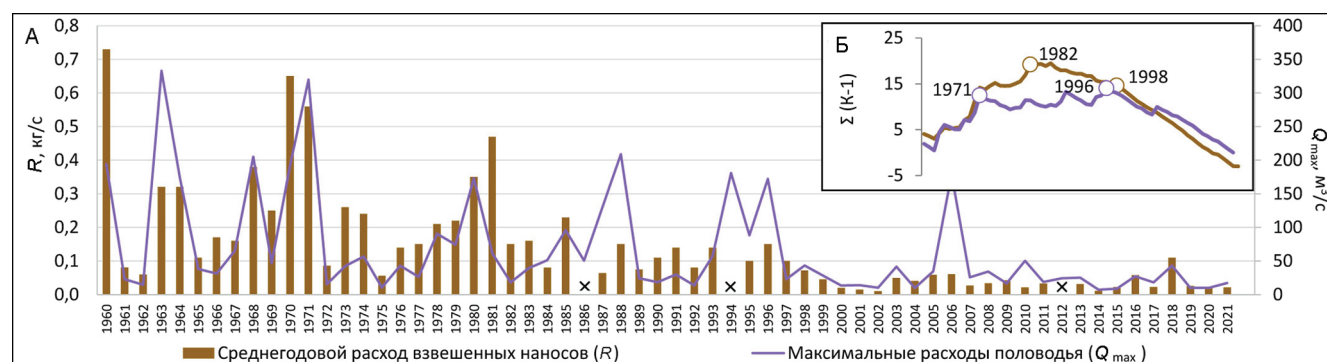


Рис. 2. Среднегодовые расходы взвешенных наносов (R , кг/с) и максимальные расходы воды в период половодья ($Q_{\max}$, $\text{м}^3/\text{с}$) р. Ворсклы (гидропост с. Козинка) с 1960 по 2021 г.: А – временной ряд абсолютных значений; Б – разностная интегральная кривая, где $\Sigma(K-1)$ – накопленная сумма отклонений от среднего

Fig. 2. Average annual discharge of suspended sediment (R , kg/s) and maximum flood water discharge ($Q_{\max}$, m^3/s) in the Vorskla River (Kozinka gauging station) from 1960 to 2021: А – time series of absolute values; Б – difference integral curve, where $\Sigma(K-1)$ is the accumulated sum of deviations from the average

Опираясь на график разностных интегральных кривых (см. рис. 2Б), можно выделить три периода формирования разного режима стока (см. табл. 1). Причем для максимального расхода воды половодья и среднегодового расхода взвешенных наносов границы периодов не синхронные, но с конца 1990-х гг. оба показывают общую тенденцию к

снижению относительно среднегодовых значений. До 1971 г. оба показателя показывают рост относительно среднегодового значения, с 1971 г., на фоне роста и последующего снижения расхода наносов, максимальный сток воды половодья показывает общее незначительное снижение с чередующимися пиками ($100\text{--}200 \text{ м}^3/\text{с}$) (см. рис. 2А). Для величин

ны стока взвешенных наносов наблюдается значительная статистически значимая нестационарность ряда. Для периода 1960–1982 гг. характерны максимальные значения R , которые в следующем периоде 1983–1998 гг. снижаются в 2,3 раза. В третьем периоде (1999–2021 гг.) тенденция к снижению ускоряется: средние значения R снижаются еще в 3 раза. В итоге расход взвешенных наносов снизился в 6,5 раз, а максимальный сток половодья – в 3,9 раза.

Для водосбора малой реки количественный вклад русловой эрозии в суммарный сток наносов оценить затруднительно, в отличие от крупных речных систем, где объем поступления наносов за счет русловых деформаций возможно рассчитать дешифрированием общедоступных данных дистанционного зондирования [Иванов, Чалов, 2021]. Естественные

процессы размыва и абразии берегов Ворсклы выражены слабо, а их проявление, ввиду малой ширины русла, практически невозможно отследить по материалами спутниковой съемки. Существенное влияние на русловую составляющую стока оказывает антропогенный фактор руслопереформирования. Проведение инженерно-строительных изысканий и дноуглубительных работ обеспечивает поступление наносов в речной сток. По картографическим источникам зафиксированы работы по спрямлению русла реки: в период с 1980 по 1990 г. насчитывается 10 трансформированных участков, с начала 1990-х гг. до настоящего времени – 7 участков. В 2022 г. проводились масштабные работы по расчистке русла Ворсклы от донных отложений в рамках областной программы «Наши реки».

Таблица 1

Периоды изменения величин максимальных расходов воды во время половодья и взвешенных среднегодовых расходов наносов в р. Ворскле с 1960 по 2021 г.

Максимальный расход воды в период половодья ($Q_{\max}$)			
	1960–1971 гг.	1972–1996 гг.	1997–2021 гг.
Среднее, м ³ /с	136,4	71,0	31,1
Стандартное отклонение	115,4	58,4	34,4
Коэффициент вариации, %	84,5	82,2	110,8
Среднегодовой расход взвешенных наносов (R)			
	1960–1982 гг.	1983–1998 гг.	1999–2021 гг.
Среднее, кг/с	0,27	0,12	0,04
Стандартное отклонение	0,19	0,05	0,03
Коэффициент вариации, %	70,0	39,2	77,0
Коэффициент корреляции r -Спирмена R с $Q_{\max}$	0,72	0,32*	0,43

Примечание. *Значение статистически незначимо ($p > 0,05$).

Вышеописанные мероприятия, хоть и являются источником избыточного поступления наносов в речной сток, однако не способны системно повлиять на зафиксированную неоднородность твердого стока в бассейне. Существенно большую роль в динамике твердого стока малой реки играют эрозионно-аккумулятивные процессы, протекающие на водосборной территории. Далее рассмотрим возможные причины наблюдаемой трансформации расхода взвешенных наносов в створе, обусловленные склоновой составляющей баланса наносов.

Влияние климатических факторов на изменчивость твердого стока. Сток взвешенных наносов имеет два источника происхождения – размыв берегов в результате русловых процессов и поступление с жидкими осадками смытого с территории

водосбора почвенного материала в результате водно-эрозионных процессов.

Самым изменчивым во времени и стохастическим фактором эрозии почв являются осадки, интенсивность и характер которых определяет величины почвенных потерь. Ниже рассмотрим зависимость расхода взвешенных наносов от эрозионного потенциала осадков отдельно для ливневой эрозии и эрозии талого стока.

Ливневая эрозия. Эрозионный потенциал ливневых осадков рассчитывается как произведение кинетической энергии дождевых капель, выпавших за дождь на единицу площади, на максимальную 30-минутную интенсивность дождя. Величины ЭПО подчиняются общим закономерностям климатических изменений. Установлено, что за последние

55 лет для условий лесостепи ЕТР наблюдается рост частоты эрозионно-опасных ливней [Chizhikova et al., 2022]. Для целей эрозионного моделирования используют среднемноголетнее значение ЭПО.

Нами была оценена изменчивость ЭПО по зависимости (1) по данным о суточных осадках теплого периода слоем более 10 мм. Также нами были учте-

ны экстремальные эрозионные события, где суточный слой осадков превышал 40 мм (рис. 3). Временной ряд ЭПО является статистически однородным с отдельными чередующимися максимумами, без выраженного тренда к росту или снижению. Однако последние три десятилетия наблюдается рост частоты ливней со слоем осадков >40 мм.

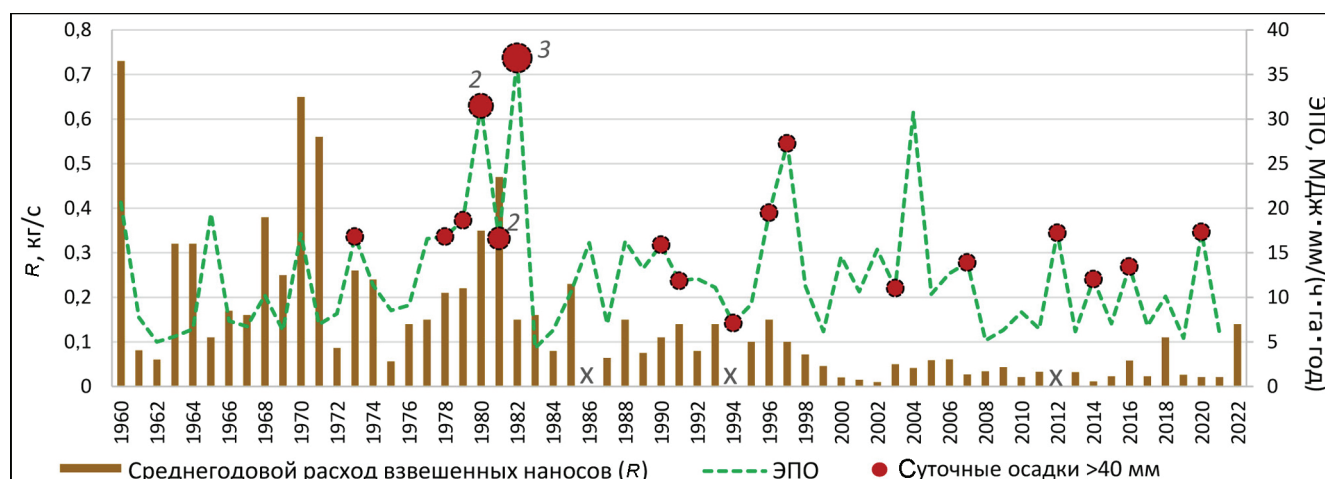


Рис. 3. Изменчивость эрозионного потенциала ливневых осадков и частота экстремальных ливней (непронумерованные точки соответствуют событию один раз в год)

Fig. 3. Variability of rainfall erosive potential and frequency of extreme rainfall events (unnumbered points correspond to a once-a-year event)

Величина расхода взвешенных наносов не связана ни с ЭПО, ни с наступлением экстремальных эрозионных событий – колебания ЭПО не находят статистически значимого ($p > 0,05$) отклика в величине R . Очевидно, что фактически данные факторы способствуют интенсивному смыву с водосбора, особенно с пашни. При интенсивном ливневом смыве наносы с водосбора доставляются в речные долины и аккумулируются в пойме либо пререотлагаются в русле, а их вынос происходит при высоких половодьях с одновременным размывом берегов и дна русел рек. Однако отклика в замыкающем створе реки данные процессы не находят. Вероятной причиной может являться снижение максимального стока воды в период весеннего половодья (см. рис. 2).

Эрозия при снеготаянии. Эрозия почв в результате снеготаяния, в отличие от ливневой эрозии, – событие, происходящее в весенний период один раз в год. Но несмотря на это при достаточных снегозапасах и прочих сопутствующих условиях в ЦЧР до 80–90% годового стока и смыва почвы формируется в результате весеннего снеготаяния. Лимитирующими факторами формирования талого стока являются глубина промерзания почвы, снегозапасы и влажность верхнего (до 30 см) слоя почвы. Эк-

периментально установлено [Барабанов, Петелько, 2023], что если глубина промерзания почвы менее 50 см, то сток не формируется вне зависимости от остальных факторов.

Для Белгородской области на фоне общего повышения среднегодовой температуры воздуха с 1960-х гг. прошлого века изменения в наибольшей степени проявились с января по март, что отразило известный факт «потепления по зимнему типу» [Lebedeva et al., 2019]. Сравнение средней температуры воздуха в регионе с января по март по нормам ВМО 1961–1990 и 1991–2020 гг. дает прирост на +7,2°C. При повышении температур воздуха и частых зимних оттепелях к наступлению периода снеготаяния глубина промерзания почвы может оказаться недостаточной для образования слоя стока.

Нами были проанализированы данные о температуре почвы на глубине 40 см в период снеготаяния (для Белгородской – вторая декада марта) по метеостанции Богородицкое-Фенино (в 100 км к северо-западу от территории исследования) за 35 лет с 1970 по 2004 г. Так, наблюдается выраженная тенденция к повышению температуры почвы: с начала 1980-х гг. уже на глубине 40 см отмечается скачек ниже нуля, и в последующем тренд роста сохра-

няется. Эти данные согласуются с долгосрочными наблюдениями на Новосильской ЗАГЛОС, которые показывают начало тенденции на снижение весеннего склонового стока с 1950-х гг. прошлого века, причем последние 25 лет сток практически отсутствует [Барабанов, Петелько, 2023]. Для рек юга Русской равнины с 80–90-х гг. прошлого века отмечается существенное сокращение слоя весеннего стока и максимального расхода воды в период половодья, что привело к установлению нового стационарного режима весеннего стока к началу XX в. [Гусаров, Шарифуллин, 2019; Кумани и др., 2021]. Резкое снижение половодного стока характерно и для объекта исследования – данные гидропоста р. Ворсклы, описанные выше, показывают снижение максимального расхода воды за 60 лет в 3,9 раза.

Описанные тенденции нашли отражение и в динамике расхода взвешенных наносов в исследуемом бассейне. Для рассматриваемых периодов формирования *R* (см. табл. 1) только для первого (до 1982 г.) сток наносов с пашни находил отклик в высоких среднегодовых значениях расхода взвешенных наносов в створе гидропоста, предположительно, за счет вклада весенней эрозии. Только в этом периоде наблюдается максимальная сила связи между наносами и расходом воды половодья, поскольку в период снеготаяния вместе со слоем талого стока в русло попадало значительное количество продуктов почвенной эрозии. Это связано, прежде всего, с тем, что формирование эрозионно-опасного талого стока – процесс сплошной для большей территории водосбора, когда эрозии подвержена вся пашня, а в овражно-балочной сети еще не успел сформироваться густой растительный покров, перехватывающий твердый сток. Резкое падение половодного стока может указывать на отсутствие поверхностного стока на пашне, а значит и собственно талого смыва.

Критическое сокращение слоя талого стока и уменьшение вклада эрозии от снеготаяния в суммарные годовые эрозионные потери с середины 80-х гг. XX в. привели к сокращению расхода взвешенных наносов в створе гидропоста. В последние 40 лет стокоформирующая роль перешла на жидкие осадки весенне-летнего периода, и склоновый твердый сток формируется главным образом за счет ливневой эрозии почв, темпы которой оценены далее.

Особенности перераспределения склонового стока в бассейне р. Ворсклы. Основным источником твердых наносов в бассейне являются распаханые угодья. Результаты эрозионного моделирования (рис. 4, табл. 2) показали, что ежегодный вынос почвенного материала с пашни (с учетом объема аккумулируемого на ней же материала) составляют

228,8 тыс. т. Среднегодовые темпы ливневой эрозии с 1 га пашни составляют 4,5 т/га в среднем по водосбору (без учета аккумуляции). Полученные величины согласуются с осредненными оценками эрозии регионального уровня (3,5 т/га в год) [Buryak et al., 2022], а также сопоставимы с расчетами по аналогичной модели [Козлов и др., 2019] на участке к 120 км к северу от бассейна Ворсклы (4,2 т/га в год), находящимся в схожих геоморфологических условиях. На 53% площади пашни темпы смыва превышают 2,5 т/га в год, а на 13% превышают 10 т/га в год, что определяет высокий эрозионный потенциал агроландшафтов бассейна.

Согласно оценке суммарных эрозионных потерь со всей площади водосбора, 97% образующихся наносов обеспечивают распаханые территории, что ожидаемо, при такой высокой агрогенной освоенности в сочетании со сложным рельефом. Результаты моделирования эрозионно-аккумулятивных процессов на пашне показали, что при объеме мобилизованного ливневым стоком почвенного материала с пашни в 484,2 тыс. т в ее же пределах аккумулируется 53% наносов (табл. 3), что согласуется с обобщенными оценками доли намывных почв на пашни в 45% [Эрозионно-русовые..., 2017, с. 223]. Зоны аккумуляции занимают 7,4% от общей площади пашни. Это связано со специфическим рельефом водосбора: на пашне повсеместно развита ложбинная сеть, при этом на левом макросклоне бассейна распространены продольно-вогнутые склоны, в нижней части которых происходит аккумуляция почвенного материала (см. рис. 4).

Наносы с пашни поступают в разветвленную овражно-балочную сеть, а далее, влекомые временными водными потоками – в речную сеть. На то, какой объем наносов достигнет речного русла, влияет рельеф и структура землепользования, а именно стокозадерживающая и нанософильтрующая способность отдельных видов землепользования и естественных ландшафтов. Согласно расчетам для всего водосбора, речной сети достигает 76,0 тыс. т наносов, а 86% их аккумулируется в пределах водосбора. Перехватчиками выступают геоморфологические «ловушки» на пашне, прибалочные лесные полосы, древесно-кустарниковые массивы в овражно-балочной и долинной сети, застроенные территории.

Дальнейший механизм транспортировки наносов в речном русле связан с гидравлическими процессами, а главный лимитирующий фактор при этом – степень зарегулированности речного стока прудами. Поэтому для корректного сопоставления данных стационарных наблюдений за расходом взвешенных наносов в устье бассейна необходимо учитывать области перехвата твердого стока.

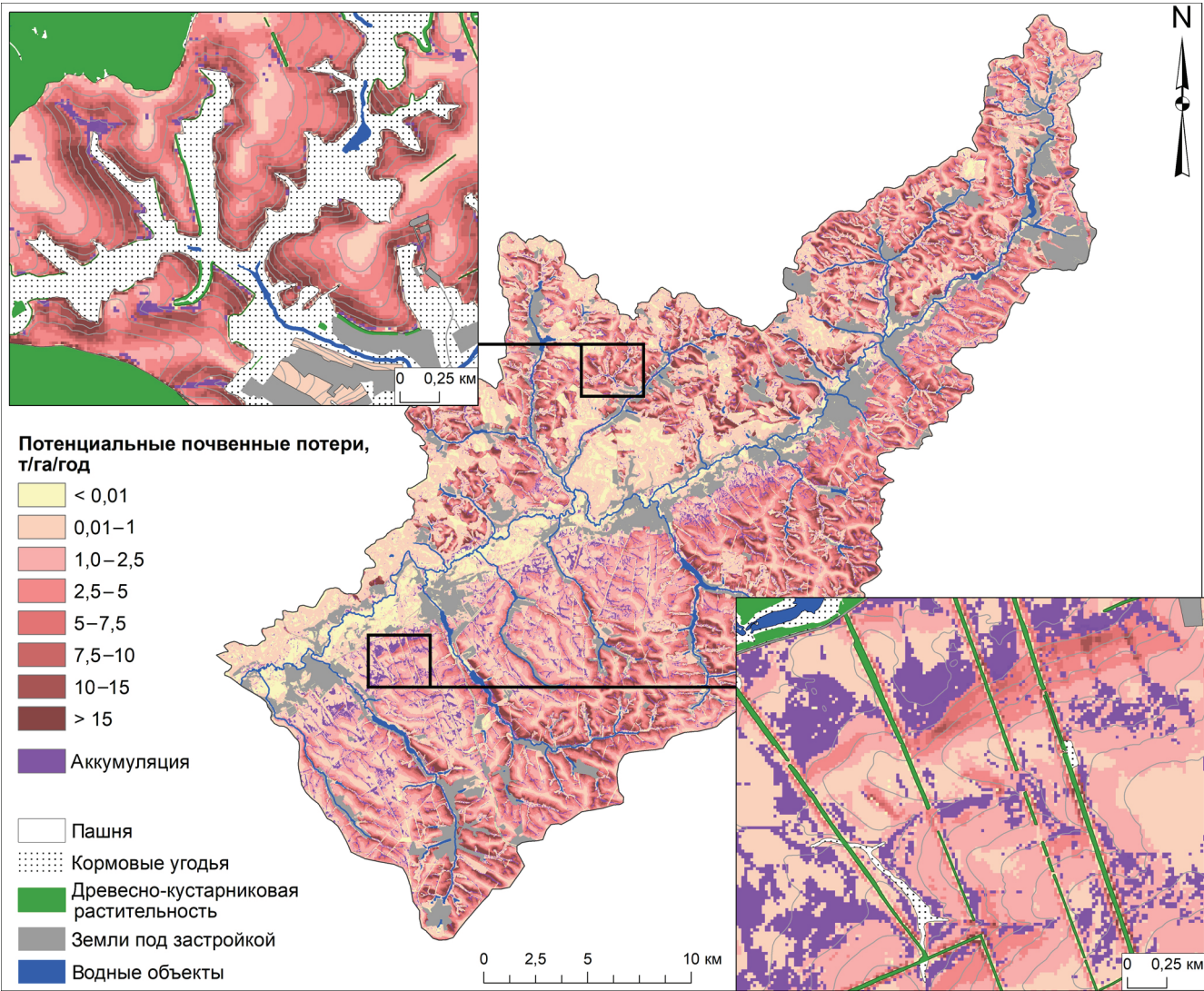


Рис. 4. Темпы водной эрозии в бассейне р. Ворсклы по модели *WaTEM/SEDEM*
Fig. 4. Rates of water erosion in the Vorskla River basin according to the *WaTEM/SEDEM* model

Таблица 2

Распределение площадей пашни бассейна р. Ворсклы по расчетным темпам ливневой эрозии

Параметр	Среднегодовые потенциальные эрозионные потери, т/га в год				Аккумуляция, т/га в год
	<2,5	2,6–5,0	5,1–10,0	>10,0	
Площадь пашни, км²	429,1	229,5	195,1	138,3	79,1
Доля пашни, %	40,1	21,4	18,2	12,9	7,4

Таблица 3

Расчетные значения объемов, выносимых водной эрозией с территории бассейна наносов (без учета транспортировки в речном русле)

Территория	Площадь, км²	Объемы перемещаемых наносов, тыс. т в год		
		Эрозия	Аккумуляция	Вынос в речную сеть
Пашня	1071,1	484,2	255,4	228,8
Водосбор (включая пашню)	1861,2	544,8	468,8	76,0

Изменения в зарегулированности твердого стока с водосбора. Сток речной сети бассейна Ворсклы сильно зарегулирован прудами. К настоящему времени в исследуемой части бассейна находится 183 пруда с гидротехническими сооружениями (рис. 5). До 1981 г. было создано 86 прудов. В последующем темпы создания прудов снижались: с 1981 по 1990 г. – 54 пруда, с 1991 по

2010 г. – 35 прудов, с 2011 по 2020 г. – 8 прудов. Причем пруды размещены преимущественно на притоках Ворсклы, а в главном русле организовано всего два пруда в верховьях. Первый пруд-накопитель при Яковлевском ГОКе создан в промежутке 1990–1995 гг. в 10 км от истока, в 2011 г. в 7 км ниже по течению организовано Крапивненское водохранилище.

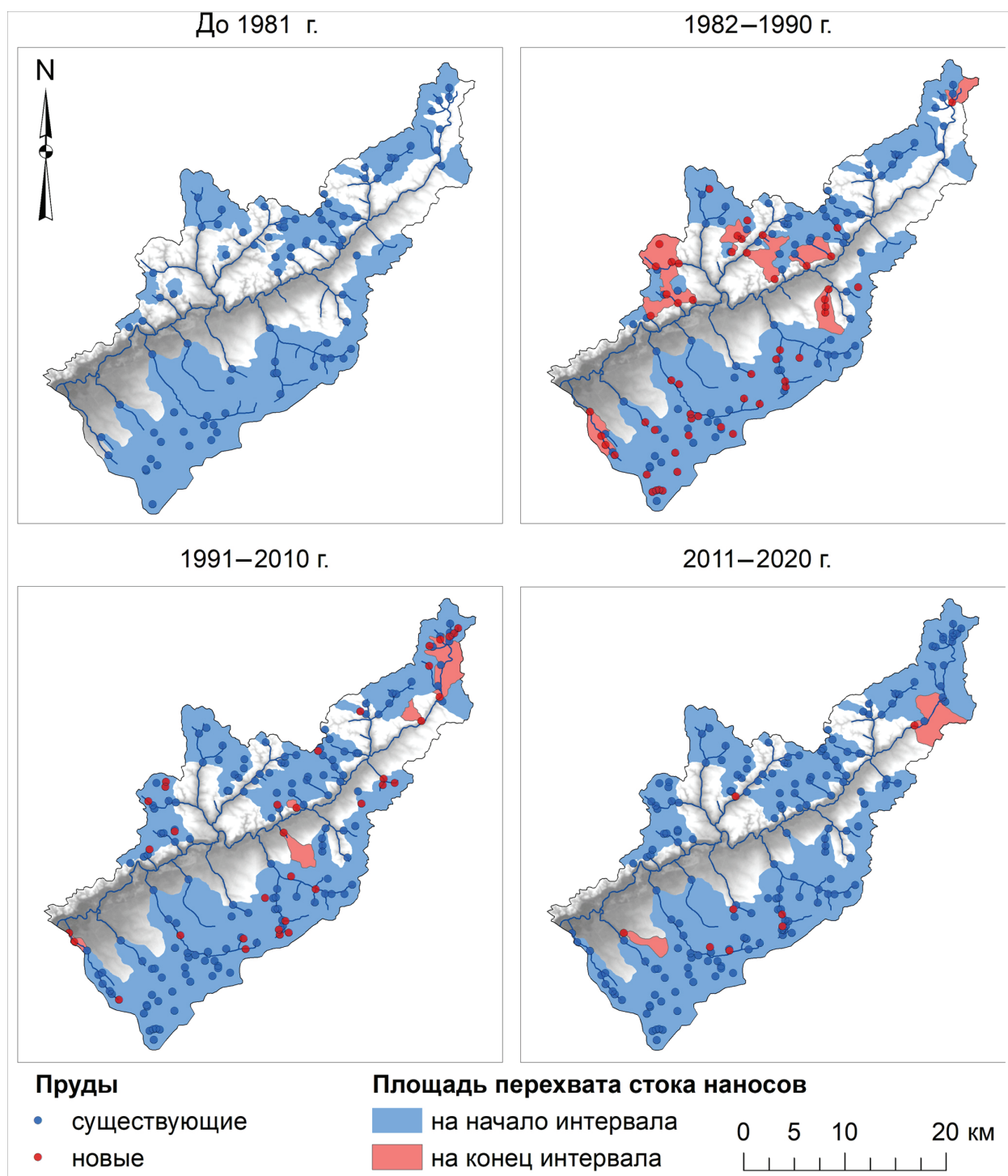


Рис. 5. Динамика создания прудов и расширение области перехвата твердого стока бассейна р. Ворсклы с 1980 по 2020 г.

Fig. 5. Dynamics of ponds creation and expansion of intercepting sediment runoff area in the Vorskla River basin from 1980 to 2020

Таким образом, бо́льшая протяженность главной реки остается «открытой» для поступления наносов с водосбора, а пруды на притоках определяют площадь перехвата твердого стока (табл. 4).

К настоящему времени с 62% площади водосбора твердый сток практически полностью перехватывается прудами. За последние 40 лет площадь перехвата увеличилась в 1,3, при росте количества прудов в 2,1 раза. Такая диспропорция объясняется тем, что новые пруды, как правило, создавали выше уже существующих, регулируя сток в балочной сети с непостоянными водотоками (см. рис. 5). Сейчас пруды являются барьером для 61,4 тыс. т наносов, которые переотлагаются в вышележащей овраж-

но-балочной сети или аккумулируются в донных отложениях самих прудов. Это составляет 81% от объема склоновой эрозии бассейна. Рассчитанный по фактическим данным расхода наносов коэффициент доставки наносов до 1981 г. ($SDR = 0,043$) (см. табл. 4) приблизительно согласуется с расчетными данными, опирающимися на морфометрию водосбора ($SDR = 0,065$) [Безухов и др., 2019]. Уменьшение водосборной области закономерно приводит к снижению твердого стока в устье, а величина SDR при этом должна оставаться относительно стабильной. Однако практически полное отсутствие талого стока привело к резкому падению расходов взвешенных наносов, что сократило SDR в 4 раза до 0,011.

Таблица 4

Изменение характеристик склоновой составляющей стока наносов в бассейне р. Ворсклы

Показатель	До 1981 г.	1982–1990 гг.	1991–2010 гг.	2011–2020 гг.
Пруды, шт.	86	140	175	183
Прирост прудов, шт.	–	+54	+35	+8
Площадь перехвата, км ²	892	1039	1100	1150
Прирост площади перехвата, км	–	+147	+61	+50
Доля площади перехвата твердого стока, %	48	56	59	62
Почвенные потери, тыс. т в год	200,5	152,2	134,3	122,7
Объем поступающих наносов в речную сеть, тыс. т в год	27,5	18,7	16,2	14,6
Объем наносов в створе, тыс. т в год (расчетный)*	15,50	9,25	7,75	6,81
Объем наносов в створе, тыс. т в год (измеренный)**	8,57	4,02	2,01	1,37
SDR	0,043	0,026	0,015	0,011

Примечания. *На основе расчета доставки наносов с пашни по модели WaTEM/SEDEM в створе гидропоста. **На основе инструментальных измерений Росгидромета в створе гидропоста.

Создание прудов и рост площади зон перехвата твердого стока отразились и на величинах бассейновой эрозии (моделируемых). За рассматриваемый период в 40 лет, благодаря стокорегулирующим мероприятиям, площадь перехвата твердого стока увеличилась на 258 км² (в 1,3 раза), а поступление наносов с водосбора в речную сеть сократилось в два раза (см. табл. 4). Создаваемые пруды-перехватчики располагались преимущественно на правом макросклоне бассейна, который характеризуется более высоким, в сравнении с левым, эрозионным потенциалом рельефа и слабой противозэрозионной устойчивостью почв. Следовательно, компенсация удельных эрозионных потерь на таких территориях выше. Вместе с тем расход взвешенных наносов в замыкающем створе (фактически измеренный) с начала 1980-х гг., когда заметно снизилась роль талого стока в сочетании с уменьшением расходов воды в половодье, к настоящему времени сократился в три

раза. Смоделированные значения годового объема наносов на основе доставки с пашни превышают измеренные на гидропосту. Из этих данных следует, что расчет поступления наносов с площади водосбора в постоянные водотоки завышает реальный сток наносов, что связано, скорее всего, с недоучетом переотложения наносов в днищах балок и пойме. Также свой вклад может вносить и собственно завышение расчетных величин темпов смыва на пашне. Примечательно, что разница смоделированных и измеренных значений увеличивается с ростом площади перехвата стока. Так соотношение расчетных величин с фактическим стоком наносов для периодов до 1981 и 1981–1990 гг. находится примерно в соотношении 1:2, тогда как для периодов 1991–2010 и 2011–2020 гг. как 1:3,9 и 1:5,0 соответственно (см. табл. 4). Учитывая, что расчеты талого смыва не проводились, а ошибки расчетов ливневого смыва и доставки наносов в русла за раз-

ные интервалы времени сопоставимы, то различия в соотношениях в основном связаны с вкладом талого смыва в сток наносов реки до 1990 г. и отсутствием этого вклада в последние три десятилетия.

ВЫВОДЫ

Для малой реки Ворсклы за последние 60 лет наблюдается неоднородность расхода взвешенных наносов, за рассматриваемый период он снизился в 6,5 раз. Проведенный анализ возможных причин этих изменений позволил сделать следующие выводы:

1. Роль русловой составляющей в стоке взвешенных наносов рассматриваемого участка р. Ворсклы незначительная. Естественные процессы размыва и абразии берегов выражены слабо, особенно на фоне значительного снижения максимальных расходов воды в период весеннего половодья. Периодически проводимые инженерно-строительные изыскания и дноуглубительные работы не способны системно повлиять на зафиксированную неоднородность твердого стока. В балансе наносов преобладает склоновая (бассейновая) составляющая – продукты эрозионной работы временных водных потоков на водосборе.

2. Содержание взвешенных наносов в речном стоке в большей степени связано с изменением интенсивности эрозии от снеготаяния, чем ливневой. Однако критическое снижение слоя талого стока, вызванное климатическими изменениями последних десятилетий, привело к снижению вклада эрозии при снеготаянии в годовые почвенные потери и, как следствие, к сокращению расхода взвешенных наносов в створе гидропоста. В последние 40 лет стокоформирующая роль перешла на жидкие осадки весенне-летнего периода, и склоновый твердый сток формируется главным образом за счет ливневой эрозии почв.

3. Несмотря на высокие темпы ливневого смыва почв с пашни (4,5 т/га в год), они не находят отклика в величине расхода взвешенных наносов в русле. Моделирование транспорта наносов со склонов показало, что 86% мобилизованного ливневым стоком почвенного материала аккумулируется в пределах водосбора. Согласно моделированию, при современной картине зарегулированности стока в речную сеть поступает порядка 76,0 тыс. т почвенного вещества в год, а с учетом переотложения в русле замыкающего створа достигает 6,8 тыс. т. Однако стоит учитывать, что смоделированные данные годового объема наносов в створе гидропоста в пять раз завышены, в сравнении с фактически измеренными, что говорит о недостатке блока модели, касающегося механизма транспорта наносов в днищах балок и пойме.

4. Водохозяйственные мероприятия по регулированию речного стока бассейна прудами обеспечили дополнительный перехват взвешенных наносов. За последние 40 лет площадь перехвата увеличилась на 30%, а объем поступающих наносов в незарегулированную речную сеть сократился на 47%. Коэффициент доставки наносов бассейна снизился в 4 раза.

Таким образом, климатически обусловленное снижение талого стока с водосбора в сочетании с водохозяйственными мероприятиями по регулированию речного стока прудами отразились в резком снижении расхода взвешенных наносов в замыкающем створе. При этом пространственная организация землепользования компенсирует высокие значения смыва почв от ливневой эрозии, что лишним раз подчеркивает важность стокорегулирующих мероприятий на водосборе.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FZWG-2025-0006 (анализ гидрологических характеристик), а также за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (моделирование эрозионных процессов, оценка динамики прудов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барабанов А.Т., Петелько А.И. Факторы склонового весеннего стока на серых лесных почвах в Центральной лесостепи // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 4. С. 18–27. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.2.
- Безухов Д.А., Голосов В.Н., Панин А.В. Оценка коэффициента доставки наносов малых водосборов в лесостепных и степных районах Восточно-Европейской равнины // Известия РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 73–84. DOI: 10.31857/S2587-55662019473-84.
- Голосов В.Н., Жидкин А.П., Петелько А.И. и др. Полевая верификация эрозионных моделей на основе исследований малого водосбора в бассейне р. Воробжи (Курская область) // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1321–1338. DOI: 10.31857/S0032180X22100045.
- Гусаров А.В., Шарифуллин А.Г. Современная эрозия и сток взвешенных наносов на степном юго-востоке Русской равнины (бассейн р. Самары) // Известия РАН. Сер. геогр. 2019. № 1. С. 37–51. DOI: 10.31857/S2587-55662019137-51.
- Иванов В.А., Чалов С.Р. Оценка баланса наносов рек Обь и Енисей // Геоморфология. 2021. Вып. 52. № 3. С. 79–89. DOI: 10.31857/S0435428121030056.
- Канатьева Н.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Современные изменения климатических факторов эрозии в Северном Приволжье // Эрозия почв и русловые про-

- цессы. Вып. 17 / под ред. Р.С. Чалова. М.: МГУ, 2010. С. 14–28.
- Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И. Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 100. С. 5–35. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35.
- 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.
- Кумани М.В., Шульгина Д.В., Киселев В.В. Многолетняя динамика основных элементов стока рек в пределах Центрального Черноземья // Региональные геосистемы. 2021. Т. 45. № 4. С. 617–631. DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-617-631.
- Лисецкий Ф.Н., Буряк Ж.А., Маринина О.А. Геоморфологическая асимметрия разнорядковых речных бассейнов (на примере Белгородской области) // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. Естеств. науки. 2018. Т. 160. Кн. 3. С. 500–513.
- Мозжерин В.В. Расчленение стока взвешенных наносов рек Северной Евразии на русловую и бассейновую составляющие и его геоморфологическая интерпретация // Региональные исследования природно-территориальных комплексов; под ред. В.В. Сироткина, Р.Р. Денмухаметова. Казань: Мед-док, 2012. С. 93–100.
- Фомичева Д.В., Жидкин А.П., Комиссаров М.А. Полимасштабные оценки варьирования эродируемости почв в условиях высокой неоднородности почвенного покрова Северной лесостепи среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2024. № 2. С. 345–358. DOI: 10.31857/S0032180X24020116.
- Эрозионно-русловые системы / под ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М.: ИНФРА-М, 2017. 697 с.
- Batista P.V., Laceby J.P., Davies J. et al. A framework for testing large-scale distributed soil erosion and sediment delivery models: Dealing with uncertainty in models and the observational data, *Environmental Modelling & Software*, 2021, vol. 137, art. 104961, DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.104961.
- Buryak Z.A., Narozhnyaya A.G., Gusarov A.V. et al. Solutions for the spatial organization of cropland with increased erosion risk at the regional level: A case study of Belgorod Oblast, European Russia, *Land*, 2022, vol. 11, no. 9, art. 1492, DOI: 10.3390/land11091492.
- Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V. et al. Changes in the regime of erosive precipitation on the European Part of Russia for the period 1966–2020, *Geosciences*, 2022, vol. 12, art. 279, DOI: 10.3390/geosciences12070279.
- Lebedeva M.G., Lupo A.R., Chendev Y.G. et al. Changes in the atmospheric circulation conditions and regional climatic characteristics in two remote regions since the mid-20th century, *Atmosphere*, 2019, vol. 10, no. 1, art. 11, DOI: 10.3390/atmos10010011.
- Lisetskii F. Water resources of rivers and erosion-accumulation processes, *Biosc. Biotech. Res. Comm.*, 2022, vol. 15, no. 4, p. 1–3, DOI: 10.21786/bbrc/15.4.1.
- Maltsev K., Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia, *Catena*, 2020, vol. 195, art. 104726, DOI: 10.1016/j.catena.2020.104726.
- McCool D.K., Foster G.R., Mutchler C.K. et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation, *Transactions of the ASAE*, 1989, vol. 32, no. 5, p. 1571–1576, DOI: 10.13031/2013.31192.
- Rompay van A., Verstraeten G., Oost van K. et al. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, vol. 26, no. 11, p. 1221–1236, DOI: 10.1002/esp.275.
- Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Maltsev K.A. et al. Geography and geoecology of Russia in the mosaic of river basins, *Geography and Natural Resources*, 2023, vol. 44, no. 3, p. 208–214, DOI: 10.1134/S1875372823030046.
- Zhidkin A., Gennadiyev A., Fomicheva D. et al. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary, *Geoderma*, 2023, vol. 430, art. 116322, DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116322.
- Электронные ресурсы**
- Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н. и др. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. URL: <http://meteo.ru/data/basic-parameters/> (дата обращения 03.02.2025).
- Речные бассейны Европейской России. URL: <https://bassapr.kpfu.ru/mapbender/application/bassepr> (дата обращения 03.02.2025).

Поступила в редакцию 20.05.2024

После доработки 25.11.2024

Принята к публикации 20.05.2025

VARIABILITY OF THE SLOPE COMPONENT OF SEDIMENT BALANCE FOR THE EROSION-CHANNEL SYSTEM IN ANTHROPOGENICALLY TRANSFORMED BASIN OF A SMALL RIVER

Zh.A. Buryak¹, A.D. Spesivtseva²

¹ Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management, Research Laboratory "Balance C"

² Belgorod State National Research University, Institute of Earth Sciences, Department of Applied Geology and Mining

¹ Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: buryakzh@gmail.com

² Assistant; e-mail: 1561869@bsuedu.ru

The paper presents the study of spatiotemporal variability of surface sediment flow and the assessment of its influence on suspended sediment yield in the outlet section of a small river basin, i.e. the upper part of the Vorskla River (Belgorod Oblast), with an area of 1,85 thousand km². Time series of average annual suspended sediment yield from 1960 till 2021 were analyzed according to the data for the Kozinka – Vorskla gauging station (116 km from the river source). High heterogeneity of the sediment yield was found, during the period under review it decreased by 6,7 times (according to average values, from 0,27 to 0,04 kg/s). It was found that the surface (basin) component predominates in the sediment balance, which is predominately soil matter eroded from the arable lands of the agriculturally developed catchment areas. The content of suspended sediment in river runoff has a greater response to changes in the intensity of snowmelt erosion than the rainfall one. However, a critical decrease in the snowmelt runoff layer caused by the climate changes of recent decades has led to a decrease in the contribution of snowmelt erosion to annual soil losses. As a result, suspended sediment yield in the outlet section of the river has decreased. A quantitative assessment of rainfall erosion rates using the WaTEM/SEDEM model showed that the main source of sediment is plowed areas; annually 228,8 thousand tons of soil matter are removed from the arable lands. At the same time, 76 thousand tons enter the river network, i. e. 66% of soil material mobilized by rainfall runoff accumulates within the catchment area. The dynamics of river flow regulation by ponds is considered. To date, sediment yield from 62% of the catchment area is intercepted by ponds. Over the past 40 years, the interception area of solid runoff has increased by 30%, and the volume of sediments entering the unregulated river network has decreased by 47%. The ponds and the upper-lying gully network hold 61,4 thousand tons of sediments, which is 81% of the surface erosion in the basin. Thus, the climate-related decrease in snowmelt runoff from the catchment area, combined with the reduction of water yield during floods and the water management measures to regulate river flow by ponds, has resulted in a sharp reduction of suspended sediment discharge since the 1980-s and their further gradual decline.

Keywords: water erosion, runoff interception, suspended sediment yield, sediment delivery coefficient, WaTEM/SEDEM

Acknowledgements. The study was financially supported by the RF Ministry of Science and Higher Education under the State Assignment FZWG-2025-0006 (analysis of hydrologic parameters), and by the Strategic Academic Leadership Program "Priority 2030" of the Kazan Federal University (modeling of erosion processes and pond dynamics assessment).

REFERENCES

- Barabanov A.T., Petelko A.I. Faktory sklonovogo vesennego stoka na serykh lesnykh pochvakh v Tsentral'noi lesostepi [Factors of slope spring runoff on gray forest soils in the central forest-steppe], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, vol. 78, no. 4, p. 18–27, DOI: 10.55959/10.55959/msu0579-9414.5.78.4.2. (In Russian)
- Batista P.V., Laceby J.P., Davies J. et al. A framework for testing large-scale distributed soil erosion and sediment delivery models: Dealing with uncertainty in models and the observational data, *Environmental Modelling & Software*, 2021, vol. 137, art. 104961, DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.104961.
- Bezukhov D.A., Golosov V.N., Panin A.V. Otsenka koeffitsienta dostavki nanosov malykh vodosborov v lesostepnykh i stepnykh raionakh Vostochno-Evropeiskoi ravniny [Evaluation of the sediment delivery ratio of small watersheds in forest-steppe and steppe regions of the Russian plain], *Izv. Rossiiskoi akademii nauk, Ser. geograficheskaya*, 2019, no. 4, p. 73–84, DOI: 10.31857/S2587-55662019473-84. (In Russian)
- Buryak Z.A., Narozhnyaya A.G., Gusarov A.V., Beylich A.A. Solutions for the spatial organization of cropland with increased erosion risk at the regional level: A case study of Belgorod Oblast, European Russia, *Land*, 2022, vol. 11, no. 9, art. 1492, DOI: 10.3390/land11091492.
- Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V. et al. Changes in the regime of erosive precipitation on the European Part of Russia for the period 1966–2020, *Geosciences*, 2022, vol. 12, art. 279, DOI: 10.3390/geosciences12070279.
- Eroziionno-ruslovyye sistemy* [Fluvial systems], R.S. Chalov, A.Yu. Sidorchuk, V.N. Golosov (eds.), Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 697 p. (In Russian)

- Fomicheva D.V., Zhidkin A.P., Komissarov M.A. Multiscale estimates of soil erodibility variation under conditions of high soil cover heterogeneity in the northern forest-steppe of the Central Russian Upland, *Eurasian Soil Science*, 2024, vol. 57, no. 2, p. 325–336, DOI: 10.1134/S1064229323602895.
- Golosov V.N., Zhidkin A.P., Petelko A.I. et al. Field verification of erosion models based on the studies of a small catchment in the Vorobzha River Basin (Kursk oblast, Russia), *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, no. 10, p. 1508–1523, DOI: 10.1134/s1064229322100040.
- Gusarov A.V., Sharifullin A.G. Sovremennaya eroziya i stok vzveshennykh nanosov na stepnom yugo-vostoke Russkoi ravniny (bassein r. Samara) [Contemporary erosion and suspended sediment yield within river basins in the steppe of the southeastern part of the Russian Plain: A case study of the Samara River basin], *Izv. Rossiiskoi akademii nauk, Ser. geograficheskaya*, 2019, no. 1, p. 37–51, DOI: 10.31857/S2587-55662019137-51. (In Russian)
- Ivanov V.A., Chalov S.R. Otsenka balanso nanosov rek Ob' i Enisei [Sediment budget assessment of the Ob and the Yenisei rivers], *Geomorfologiya*, 2021, vol. 52, no. 3, p. 79–89, DOI: 10.31857/S0435428121030056. (In Russian)
- Kanatueva N.P., Krasnov S.F., Litvin L.F. [Recent changes of climate factors of erosion in Northern Povolzie], *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy* [Soil Erosion and Channel Processes], R.S. Chalov (ed.), Moscow, MSU Publ., 2010, vol. 17, p. 14–27. (In Russian)
- Kornilova E.A., Lisetskii F.N., Rodionova M.E. Gidroekologicheskie osobennosti reki Vorskly (rossiiskii uchastok) v kontekste prirodno-khozyaistvennykh izmenenii [Hydroecological features of the Vorskla River (Russian section) in the context of natural and economic changes], *Regional'nye geosistemy*, 2023, vol. 47, no. 4, p. 550–568, DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-550-568. (In Russian)
- Kozlov D.N., Zhidkin A.P., Lozbenov N.I. Tsifrovoe kartografirovaniye erozionnykh struktur pochvennogo pokrova na osnove imitatsionnoi modeli smyva (severnaya lesostep' Srednerusskoi vozvyshennosti) [Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern forest-steppe of the Central Russian Upland)], *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*, 2019, vol. 100, p. 5–35, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35. (In Russian)
- Kumani M.V., Shulgina D.V., Kiselev V.V. Mnogoletnyaya dinamika osnovnykh elementov stoka rek v predelakh Tsentral'nogo Chernozem'ya [Long-term dynamics of the main elements of river flow within the Central Chernozem region], *Regional'nye geosistemy*, 2021, vol. 45, no. 4, p. 617–631, DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-617-631. (In Russian)
- Lebedeva M.G., Lupo A.R., Chendev Y.G. et al. Changes in the atmospheric circulation conditions and regional climatic characteristics in two remote regions since the mid-20th century, *Atmosphere*, 2019, vol. 10, no. 1, art. 11, DOI: 10.3390/atmos10010011.
- Lisetskii F. Water resources of rivers and erosion-accumulation processes, *Biosc. Biotech. Res. Comm.*, 2022, vol. 15, no. 4, p. 1–3, DOI: 10.21786/bbrc/15.4.1.
- Lisetskii F.N., Buryak Zh.A., Marinina O.A. Geomorfologicheskaya asimetriya raznoporyadkovykh rechnykh basseinov (na primere Belgorodskoi oblasti) [Geomorphological asymmetry of river basins belonging to different orders (based on the Belgorod region)], *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta, Seriya Estestvennyye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 3, p. 500–513. (In Russian)
- Maltsev K., Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia, *Catena*, 2020, vol. 195, art. 104726, DOI: 10.1016/j.catena.2020.104726.
- McCool D.K., Foster G.R., Mutchler C.K. et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation, *Transactions of the ASAE*, 1989, vol. 32, no. 5, p. 1571–1576, DOI: 10.13031/2013.31192.
- Moszhherin V.V. [Division of suspended sediment runoff from rivers of Northern Eurasia into channel and basin components and its geomorphological interpretation], *Regional'nye issledovaniya prirodno-territorial'nykh kompleksov* [Regional studies of natural-territorial complexes], V.V. Sirotkin, R.R. Denmukhametov (eds.), Kazan, Med-doc Pybl., 2012, p. 93–100. (In Russian)
- Rompay van A., Verstraeten G., Oost van K. et al. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, vol. 26, no. 11, p. 1221–1236, DOI: 10.1002/esp.275.
- Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Maltsev K.A. et al. Geography and geoecology of Russia in the mosaic of river basins, *Geography and Natural Resources*, 2023, vol. 44, no. 3, p. 208–214, DOI: 10.1134/S1875372823030046.
- Zhidkin A., Gennadiyev A., Fomicheva D. et al. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary, *Geoderma*, 2023, vol. 430, art. 116322, DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116322.

Web sources

- Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N. et al. Opisan-
iye massiva srochnykh dannykh ob osnovnykh meteoro-
logicheskikh parametrah nastantsiyakh Rossii [Descrip-
tion of the array of urgent data on the main meteorological
parameters at stations in Russia], URL: [http://meteo.ru/
data/basic-parameters/](http://meteo.ru/data/basic-parameters/) (access date 03.02.2025).
- Rechnyye basseiny Yevropeyskoy Rossii [River basins of
European Russia], URL: [https://bassapr.kpfu.ru/map-
bender/application/bassepr](https://bassapr.kpfu.ru/map-bender/application/bassepr) (access date 03.02.2025).

Received 20.05.2024

Revised 25.11.2024

Accepted 20.05.2025