

УДК 551.435.118, 551.4.023

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЛОКАЛЬНОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БОКОВОЙ ЭРОЗИИ Р. ОКИ

А.Ю. Воробьев<sup>1</sup>, А.С. Кадыров<sup>1</sup>, Д.С. Локтеев<sup>2</sup>, Е.В. Бургов<sup>3,4</sup>,  
А.А. Балобина<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, г. Рязань, Россия;

<sup>2</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии;

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия;

<sup>4</sup>Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, г. Москва, Россия;

<sup>5</sup>Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

*a.vorobyov90@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.02.2025

После доработки 19.02.2025

Принята к публикации 06.03.2025

**Аннотация.** Приводятся результаты работы геоморфологического стационара на нижнем крыле излучины р. Оки у с. Костино Рязанской области. Полевые наблюдения за скоростью эрозии берега на этой учетной площадке свидетельствуют о ежегодном отступании надводной части берега на 1.67 м. За два года мониторинга весенние половодья полностью затапливали стационар. В 2023 г. максимальная водность потока составляла примерно 4700 м<sup>3</sup>/с и превышала прошлогоднее значение на 62%. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволило получить растры поверхности высокого разрешения и скоординировать линейные, площадные и объемные метрики эрозии. Отклик рельефа на повышенную энергию половодья во втором году наблюдений выразился в почти двукратном ускорении разрушения откоса (на 95%). Его участки, сложенные песками и супесями, в ряде мест претерпели особенно интенсивные размывы, что подтверждается съемкой дна русла. В ходе геодезической съемки по сезонам гидрологического года нами установлено, что эрозия берега не прекращается летом и осенью, хотя и достигает всего 20% от объема за год.

**Ключевые слова:** река Ока, боковая эрозия русла, геоморфологический стационар, половодье, морфометрия, БПЛА, цифровая модель рельефа (ЦМР)

DOI: [10.71367/3034-4638-2025-2-1-73-95](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2025-2-1-73-95)

### ВВЕДЕНИЕ

В центральной части Русской равнины для пойменно-русловых рельефообразующих процессов характерна сезонность максимальных проявлений, обусловленная последовательной и ежегодной сменой фаз водного режима. Начало XXI в. было отмечено множеством примеров нарушения устоявшегося, как казалось в прошлом столетии, годового распределения расходов на водотоках бассейна р. Волги (Георгиади, Коронкевич, Барабанова и др., 2019; Воробьев, Кадыров, 2020; Воробьев, Кривцов, Кадыров, 2021; Горбаренко, Варенцова, Киреева, 2021). Среди них р. Ока выделяется слабо зарегулированным стоком, высокой степенью освоенности прилегающих территорий и значительными

объемами добычи донных отложений (Беляков, Беркович, 2005; Беркович, 2020). Перечисленные особенности природно-антропогенных ландшафтов окской долины особенно характерны для Рязанской области, в которой р. Ока преодолевает 535 км водного пути (треть от всей своей длины). Исторически весенние половодья были одним из основных рельефообразующих процессов в средней части окского бассейна (между устьями рек Москвы и Мокши) (Кривцов, Правкин, 2015; Воробьев, Пузаков, 2017). Исследования геоморфологических, эдафических и биоценологических последствий затопления поймы велись здесь еще с конца XIX в. (Лазаренко, 1964). В последние годы вследствие

колебаний водности р. Оки, бурного развития строительной отрасли и обновления инфраструктуры агропромышленного комплекса резко возрос интерес административного аппарата и представителей бизнеса к природным ресурсам и процессам староосвоенной окской поймы (Команда экспертов..., 2023; Опубликован эскиз моста-дублера..., 2023). Последняя занимает почти центральное положение в Рязанской области, и игнорировать состояние природно-антропогенных геокомплексов дна долины в современных условиях становится просто невозможно.

Река Ока в среднем течении является крупным водотоком со среднегодовым расходом более 500 м<sup>3</sup>/с. Ведущим рельефообразующим процессом в ее пойме является эрозионно-аккумулятивная работа русла. Документированы разрушения берегов со смещением откосов на 10–15 м вглубь поймы, в том числе при прорывах шеек меандров (Лазаренко, 1964; Воробьев, Пузаков, 2017). К наиболее опасным последствиям боковой эрозии относится медленный подмыв коренных бортов окской долины, подготавливающий реализацию собственных напряжений массивов пород (Коробкин, Передельский, 2013; Kimiaghali, Goharrokhi, Clark et al., 2015; Zong, Xia, Zhou et al., 2017). Ярким тому примером являются многочисленные генерации оползневых тел и долинных педиментов у сел Константиново и Дядьково (Кривцов, Правкин, 2015). В пределах региона оползневые процессы, инспирированные весенним подтоплением основания террасовых склонов, за последнюю тысячу лет приводили к исчезновению культурных и религиозных построек (Воробьев, Пузаков, 2017). Но и последствия литодинамики берегов широкопойменного русла являются нежелательным геоморфологическим процессом, который ежегодно приводит к необратимым потерям земельного фонда. Улицы нескольких крупных сел в Рязанской области выходят непосредственно на участки центральной поймы с высоким эрозионным риском. В подобных случаях прогрессирующий размыв берегов окского русла приобретает социально-экономическое значение. Уничтожение генераций зрелой поймы приводит к сокращению площади пастбищ, сенокосов и залежных земель — потенциальных территорий для развития и расширения сельскохозяйственной, селитебной и транспортной инфраструктуры. Пространственно-хронологическая динамика рельефа дна речной долины, который Ю.Г. Симонов выделял в качестве самостоятельной морфолитосистемы (Симонов, 2005), таким образом, рассматривается как процесс, проявления которого имеют выраженное прикладное значение.

В условиях бассейна р. Оки эрозионный риск, казалось бы, должен иметь четко выраженную периодичность и приуроченность к весенним половодьям и пропуску руслоформирующих расходов. Однако за последние полвека приведено множество примеров преобразования морфологии речных берегов (в том числе и низких) не только флювиальной, но и антропогенной, биогенной, склоновой и суффозионной литодинамикой (Баровский, 2005; Karmaker, Dutta, 2013; Егоров, 2017; Masoodi, Noorzad, Majdzadeh et al., 2018; Рысин, Осипов, 2021). Вклад этих альтернативных агентов рельефообразования в ежегодные горизонтальные русловые деформации в границах средней части окского бассейна остается слабоизученным вопросом. Очевидно, что на реках, подобных р. Оке по водному режиму, половодный размыв должен вносить основной вклад в отступление берегов; роль же субэрозальных процессов может рассматриваться в качестве дополнительной. В 2010-е гг. доля весеннего стока (март — май) в среднем течении р. Оки снизилась до 43–45% вместо обычных значений 55–60% (Георгиади, Коронкевич, Барабанова и др., 2019; Горбаренко, Варенцова, Киреева, 2021). Для отдельных лет (например, 2014, 2019, 2020 гг.) зафиксирован максимум водности зимой, летом или осенью, что обусловлено возросшей меридиональностью мезоклимата окского бассейна и неустойчивой предвесенней и весенней погодой. Стратегии, разработанные для землепользования в поймах ряда крупных рек Евразии и Северной Америки, предусматривают фиксацию любых, даже второстепенных рельефообразующих процессов (Lagasse, Zewenbergen, Spitz et al., 2004; Karmaker, Dutta, 2013; Yu, Wei, Wu, 2015). В настоящем исследовании мы задались вопросом: может ли субэрозальная эрозия за теплое время года приводить к потере значительных территорий и заметному экспорту отложений из берегов, либо берега остаются практически стабильными? Осуществленные на протяжении 2014–2020 гг. исследования деформации фронтов размыва берегов р. Оки (территориальный охват 5.6 км русла) основывались на методе реперов (эрозионных штифтов) (Воробьев, Кадыров, 2020). Несмотря на получение первичной информации о скорости отступления берега, оценка сезонной составляющей эрозии оказалась неполной, в первую очередь, из-за дискретной природы полученных позиционных данных.

Локальная информация о топографии земной поверхности в последние 30–35 лет все чаще добывается с помощью фотограмметрии, аэрофотосканирования и лазерных локаторов (Lawler, 1993; Hamshaw, Bryce, Rizzo et al., 2017; Jugie, Goba,

Virmoux et al., 2018; Masoodi, Noorzad, Majdzadeh et al., 2018). Использование современных достижений геодезии в речных поймах, прежде всего, предполагает возможность составления крупномасштабных цифровых моделей рельефа (ЦМР) для классификации его форм и выделения единиц геоморфологического районирования. Кроме того, систематическая съемка берегов рек на этапе расширения технологических возможностей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет хронологически фрагментировать ход морфолитодинамики, вплоть до привязки отдельных рельефообразующих процессов к сезонам гидрологического года. Обе задачи были успешно решены в настоящей работе, главной целью которой являлось определение скорости боковой эрозии (параметр  $U$ ) и ее объемов (параметр  $V$ ) на надводной части берега р. Оки в границах геоморфологического стационара.

Стационарные исследования рекомендованы в динамической геоморфологии для мониторинга периодических процессов и построения сценариев развития той или иной территории (Симонов, 2005; Егоров, 2017). При этом наиболее благоприятные условия для заложения учетных площадок связаны с динамичными объектами, трансформация топографии которых очевидна уже в течение нескольких лет. По данным ресурса Global Surface Water Explorer (Global Surface Water..., 2023), самой активной эрозией в Рязанском расширении поймы р. Оки (743–662 км от устья) отличается фронт размыва на Марковской излуцине. Наша оценка стабильности плановых очертаний водотока, выполненная в первом приближении с использованием карт Атласа Менде, определила нижнее крыло меандра как неустойчивый участок русла с высоким эрозийным риском (Воробьев, Пузаков, 2017). За 160 лет увеличение длины прогиба стрелы излуцины достигло порядка 300 м, средняя скорость боковой эрозии — 1.9 м/год. Тот же вывод можно сделать по результатам полевого мониторинга смещения пойменной бровки с помощью метода эрозионных штифтов (Воробьев, Кадыров, 2020).

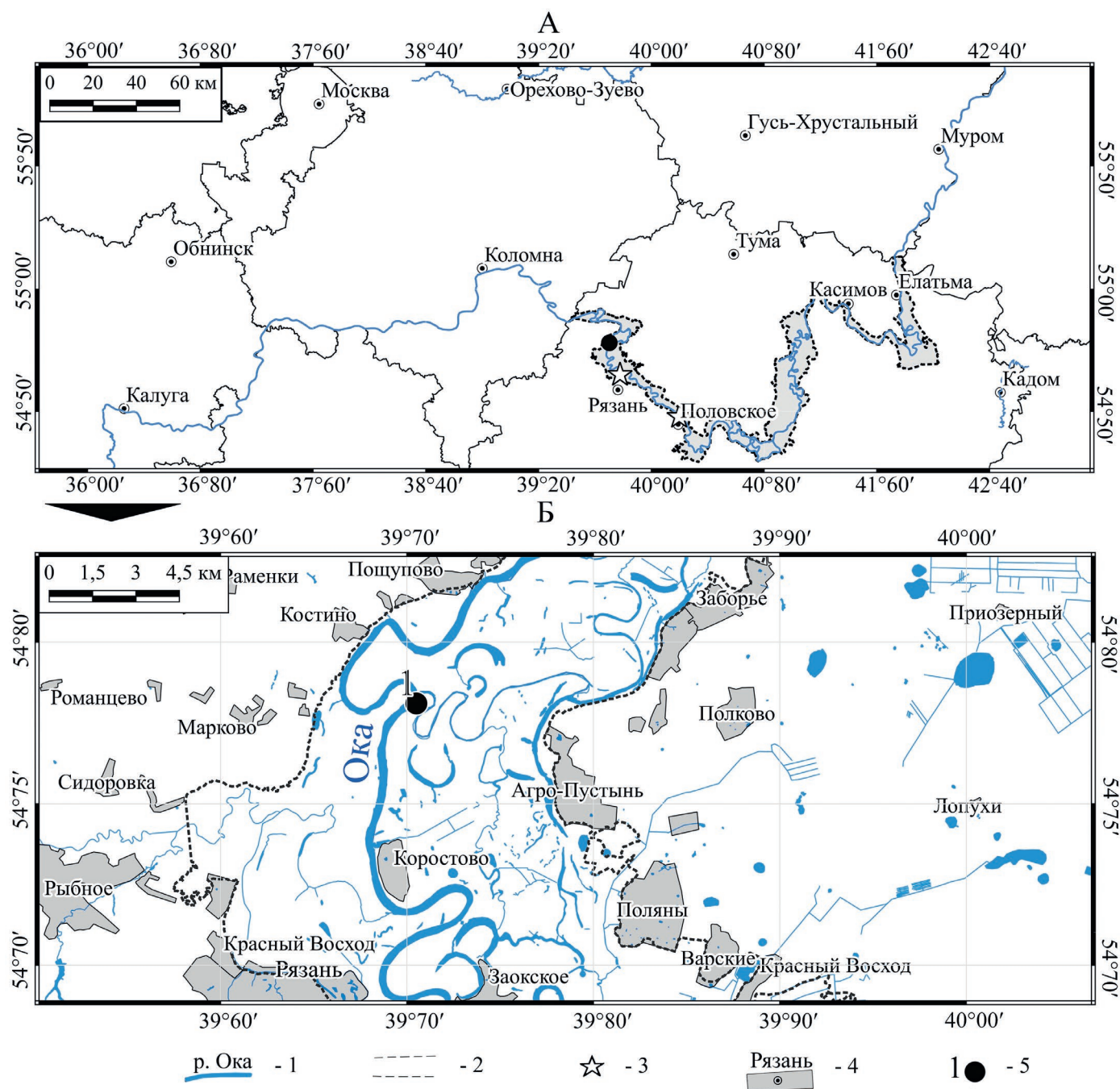
Геоморфологические последствия прохождения половодий 2022–2023 гг. запечатлены на упомянутом участке с помощью наземной геодезической съемки и применения современных технологий. В границах стационара «Костино» с динамично развивающимся рельефом осуществлена количественная ежесезонная оценка боковой эрозии, позволяющая оценить геоморфологический риск для местных геоконплексов. Дистанционные и историко-географические данные позволяют предполагать, что актуальная скорость отступления берега в границах учетной площадки несколько

выше, чем в среднем по Рязанскому расширению. Ежегодные значения всех параметров эрозии будут, по всей видимости, соответствовать верхней границе интенсивности возможной морфолитодинамики на прочих фрагментах окских берегов в его пределах. Протяженность стационара вдоль пойменной бровки определяется необходимостью наблюдений противозерозийной устойчивости хотя бы нескольких характерных элементов рельефа сегментно-гвивистой поймы, ширина которых чаще всего колеблется от 10 до 50 м.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ключевой участок исследования, расположенный на нижнем крыле Марковской излуцины (рис. 1), представлен 400-метровым выделом фронта размыва меандра, подрезающего генерацию сегментно-гвивистой поймы. Геологическое строение пойменного массива двучленное: маломощная (в среднем 2.4 м) пойменная фация аллювия (aIVp) залегает на песчано-супесчаном пакете пойменно-русловых отложений (aIVrg). Механический состав грунтов aIVp суглинистый, мощность почвенно-растительного слоя (ПРС) достигает 0.5 м. Стационар является характерным примером учетной площадки на комплексе сегментно-гвивистого рельефа локального уровня, причем двучленная фациальная схема осложнена, по крайней мере, тремя старичными линзами (aIVs), соответствующими межгвивным ложбинам. Положение нижней границы русловой фации неизвестно, но обычно на подобных молодых комплексах рельефа она переходит в плейстоценовые озерно-аллювиальные и аллювиальные отложения песчано-гравийного состава (Лазаренко, 1964). Стационар имеет форму сложного прямоугольника шириной до 60 м, из которых (в зависимости от конкретного года) 2–7 м приходится на бичевник. Среднее превышение дневной поверхности поймы над меженным уровнем, абсолютные отметки которого 92.5 м, составляет 6.3 м.

К пойменной части стационара прилегает фрагмент русла р. Оки в 726 км от ее устья, имеющий угол разворота излуцины 110–140°. Сама излуцина имеет степень развитости  $l/L = 3.4$ , русло приближается к значению показателя формы  $r/b_p = 2.7$ , когда становится возможным нарушение безотрывного обтекания фронта размыва (Эрозионно-русловые..., 2017). Русло сужено ( $b_p = 157$  м), что на 54 м меньше, чем среднее значение для Рязанского расширения окской поймы. Учитывая, что  $L/h = 0.7$ , излуцину следует классифицировать как заваленную синусоидальную (Кондратьев, Попов, Снисценко, 1982; Эрозионно-русловые..., 2017).



**Рис. 1.** А – пойменная часть долины р. Оки в ее среднем течении. Б – расположение наблюдаемого участка берега Марковской излучины р. Оки. 1 – реки и водоемы; 2 – пойма р. Оки в Рязанской обл.; 3 – гидропосты Рязань и Половское; 4 – населенные пункты; 5 – стационар «Костино»

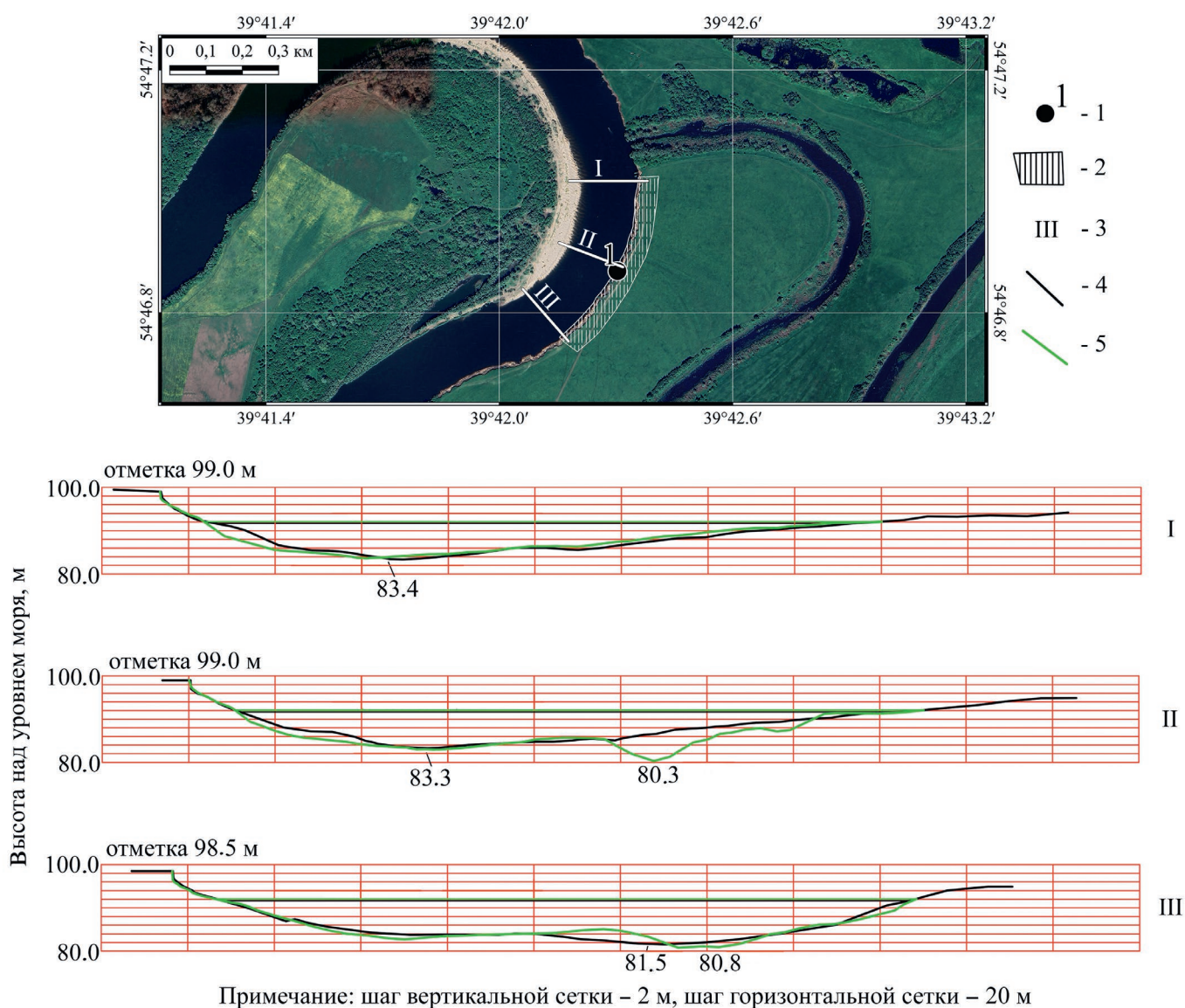
**Fig. 1.** А – floodplain of the Oka River valley in its middle part. Б – location of the monitoring of the bank of the Markovskaya bend of the Oka River. 1 – rivers and water bodies; 2 – floodplain of the Oka River in the Ryazan Oblast; 3 – gauging stations 'Ryazan' and 'Polovskoye'; 4 – settlements; 5 – geomorphological stationary site 'Kostino'

На этапе рекогносцировки местности и анализа лоцманских карт (Лоцманская карта..., 1956) нами было установлено, что особенностью излучины в ее нижнем крыле является наличие глубокого плёса (до 11–12 м). Около стационара находится, веро-

ятно, самый глубокий участок р. Оки в пределах Рязанского расширения. Поскольку устойчивость берега реки в значительной степени обусловлена морфометрией и литологией его подводной части (Кораблева, Чернов, 2008; Deng, Xia, Zhou et al.,

2018; Jugie, Goba, Virmoux et al., 2018; Беркович, 2020), нами были предприняты гидрометрические работы. Они включали измерения глубины русла по трем промерным створам (рис. 2), впоследствии позволившие разделить русловые сечения на 20-метровые интервалы. Моделирование рельефа русла и поймы выполнено в AutoCAD, модуль Civil 3D. Геодезические расчеты стали основой для составления трех поперечных сечений меженного потока: на входе и выходе русла из стационара и в срединной его части.

Основная информация о динамике рельефа ключевого участка основывается на использовании двух подходов к получению пространственных данных, распространенных в геодезии и маркшейдерии: непосредственного перемещения оператора по берегу с GNSS-приемником (Тикунов, 1997) и сканирования неровностей земной поверхности камерой беспилотного летательного аппарата (БПЛА) (Hamshaw, Bryce, Rizzo et al., 2017; Лучников, Ляхин, Лепихин, 2018; Masoodi, Noorzad, Majdzadeh et al., 2018). Множество дискретных точек позициони-



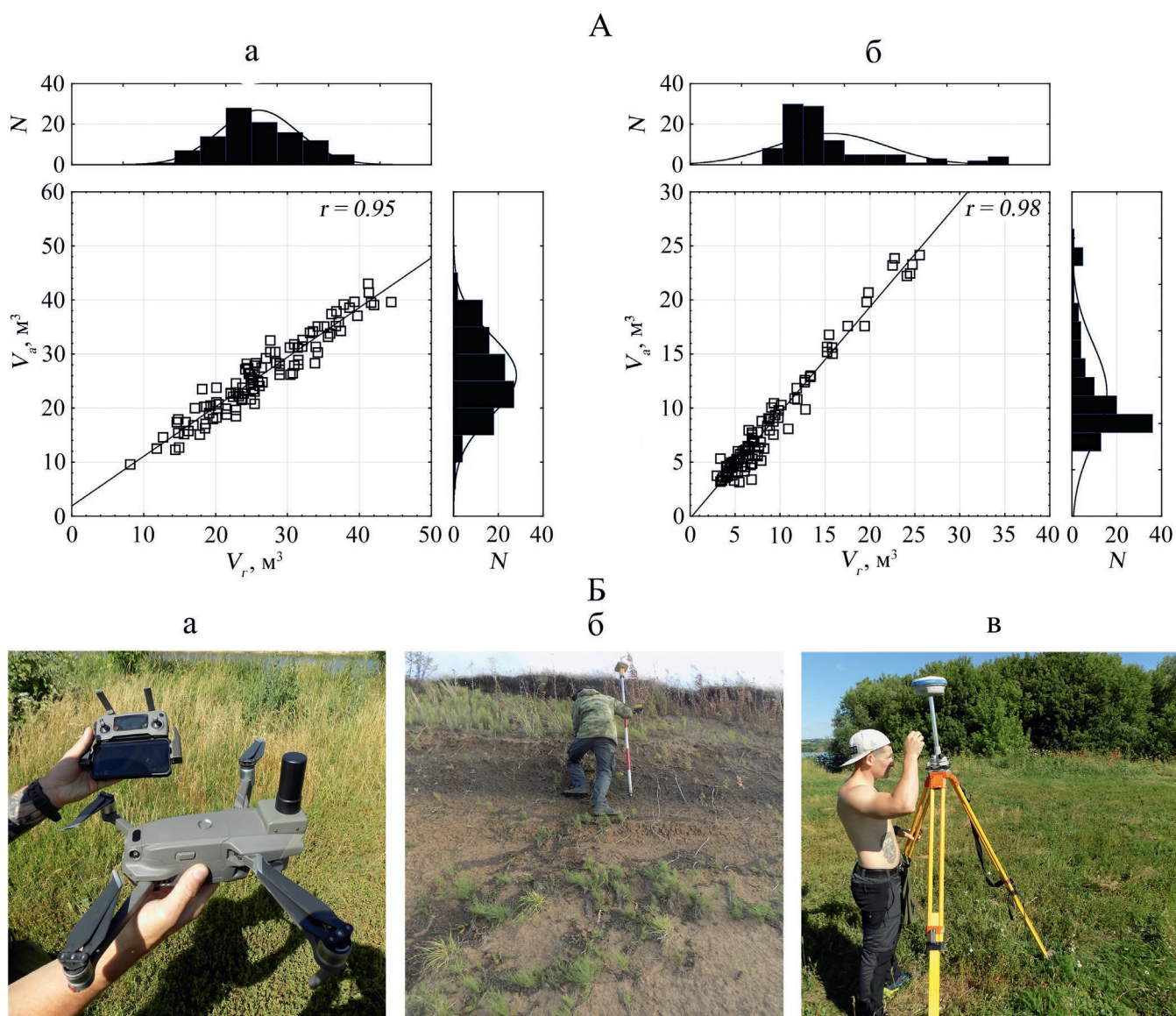
**Рис. 2.** Стационар «Костино»: 1 – центр учетной площадки; 2 – ее границы; 3 – номера поперечных сечений; 4 – контуры сечений в 2022 г.; 5 – контуры сечений в 2023 г.

**Fig. 2.** Geomorphological stationary 'Kostino': 1 – centre of the accounting site; 2 – its boundaries; 3 – numbers of cross sections; 4 – contours of sections in 2022; 5 – contours of sections in 2023

рования как самой бровки откоса, так и плоскости уступа было получено с помощью геодезической съемки модельного объекта GNSS-приемниками Topcon GR-5 и EFT M4 GNSS (рис. 3). По итогам каждой съемки создавалась нерегулярная сеть из 2300–2700 точек, ставшая в дальнейшем основой для построения итоговой ЦМР методом триангуляции. Полевая съемка частично выполнена в режиме RTK (Real-Time Kinematic – кинематика в реальном

времени) с использованием двух приемников для ускорения выполнения поставленной задачи. Для обеспечения точности измерений производилась привязка к местной системе координат и к Балтийской системе высот 1977 г.

Гораздо более обширные облака точек (до 30 млн объектов) с координатами были сформированы путем аэрофотосканирования поверхности стационара и примыкающих областей. Первая



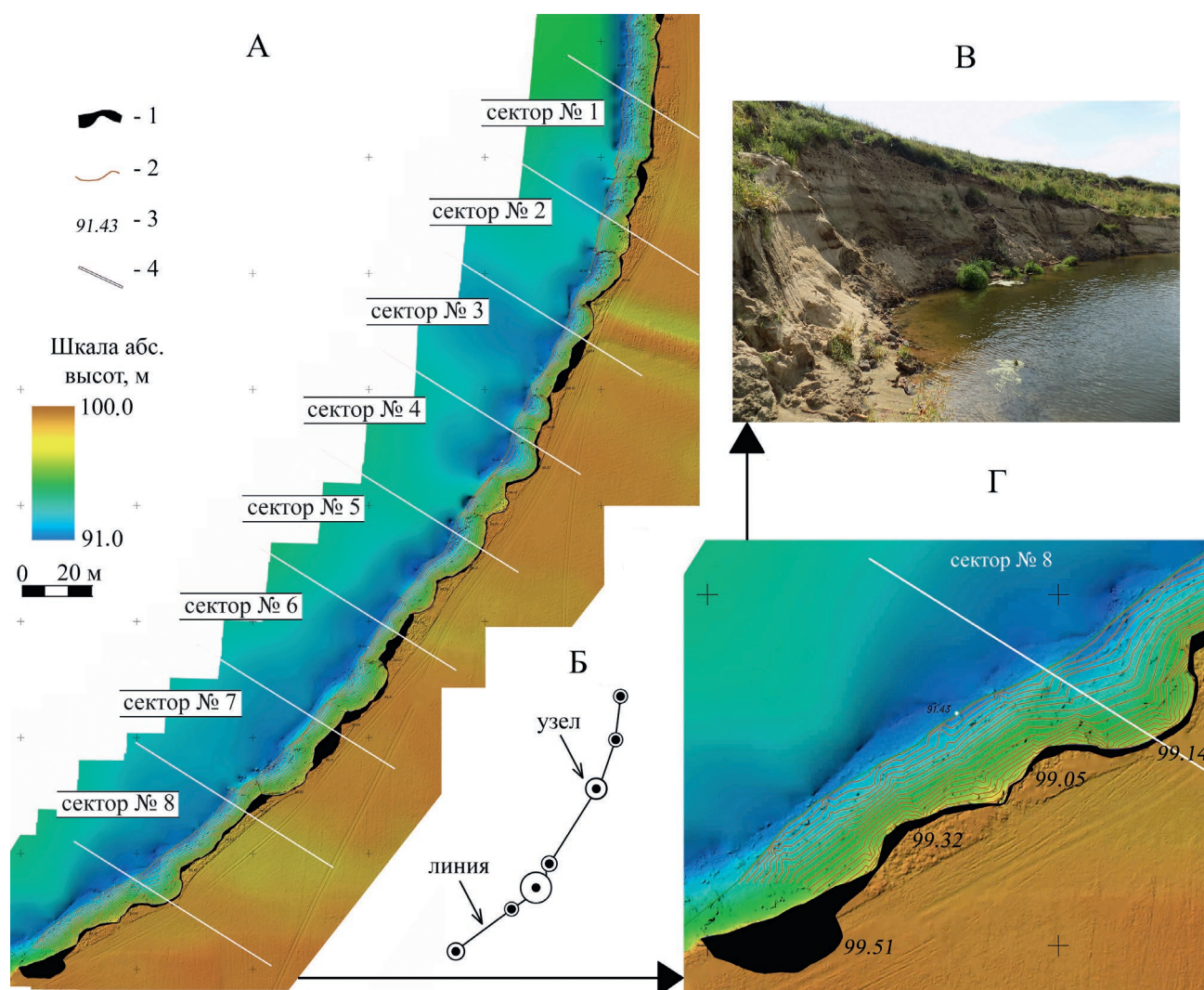
**Рис. 3.** Корреляция данных наземной съемки (объем размыва  $V_r$ ) и БПЛА-съемки (объем размыва  $V_a$ ), выполненных зимой – весной 2022 г. (а), летом – осенью 2022 г. (б),  $N$  – число наблюдений (А). Использованное геодезическое оборудование (Б: а – «дрон» DJI Mavic 2 перед аэрофотосъемкой; б – съемка средней части берегового откоса; в – «база» – второй стационарный GNSS-приемник на секторе № 1)

**Fig. 3.** Correlation of geodetic survey data (volume of erosion  $V_r$ ) and UAV survey data (volume of erosion  $V_a$ ) performed in winter – spring 2022 (a), summer – autumn 2022 (б),  $N$  – number of observations (A). Used geodetic equipment (Б: а – ‘drone’ DJI Mavic 2 before aerial survey; б – survey of the middle part of the coastal slope; в – ‘base’ – second stationary GNSS receiver on sector No. 1)

съемка была проведена в ноябре 2021 г., две последующие — в начале июня и в конце октября 2022 г. Основная часть работ на наших учетных площадках приходилась на период май — октябрь.

Воздушная фотограмметрия, ввиду оперативности полевых работ и высокой пространственной полноты моделей, широко применяется для отслеживания сезонных деформаций берегов рек во многих странах мира (Hamshaw, Bryce, Rizzo et al.,

2017; Лучников, Ляхин, Лепихин, 2018; Masoodi, Noorzad, Majdzadeh et al., 2018). Геоэкологическая напряженность (Рысин, Осипов, 2021), эрозия аллювиальных почв (Couper, Maddock, 2001), роль различных эрозионных агентов (Егоров, 2017, Jugie, Goba, Virmoux et al., 2018) и пространственное распределение скорости эрозии (Кораблева, Чернов, 2008; Завадский, Лобанов, Петухова и др., 2010; Эрозионно-русловые..., 2017; Van Dijk,



**Рис. 4.** Линейно-узловые плановые очертания боковой эрозии берега р. Оки после половодья 2023 г. А — цифровая модель рельефа, смещение пойменной бровки с осени 2022 г. до весны 2023 г.: 1 — размыв во время половодья 2023 г.; 2 — изогипсы; 3 — отметки высот; 4 — границы секторов стационара. Б — линейно-узловая модель эрозии. В — крупный фестон в песчаном уступе после половодья 2023 г. Г — распределение боковой эрозии в окрестности границы стационара

**Fig. 4.** Linear-nodal plan outlines of lateral erosion of the Oka River bank after the flood of 2023. A — digital elevation model of relief, displacement of floodplain edge from autumn 2022 to spring 2023: 1 — scour during the 2023 flood; 2 — isohypses; 3 — elevation marks; 4 — stationary sector boundaries. Б — linear-nodal model of erosion. В — large festoon in the sandy concave bank after the 2023 flood. Г — distribution of lateral erosion in the vicinity of the stationary sector boundary

Mastbergen, Van den Ham et al., 2018) считаются референтными качественно-количественными показателями в стационарных исследованиях по отмеченной тематике. Главным результатом БПЛА-съемки, тем не менее, является сам растр ЦММ (цифровой модели местности) — современный цифровой продукт, пригодный для визуализации и классификации форм рельефа (рис. 4). Нами использовался БПЛА DJI Mavic Pro, а также DJI Mavic 2, оснащенный собственным GNSS-приемником. Во втором случае «дрон» является ровером и автоматически записывает координаты, считывая фотособытие. Камера со CMOS-матрицей 4/3 и разрешением  $4000 \times 2500$  пикселей фиксирует положение опорных знаков на пойме, в качестве которых использовались картонные метки.

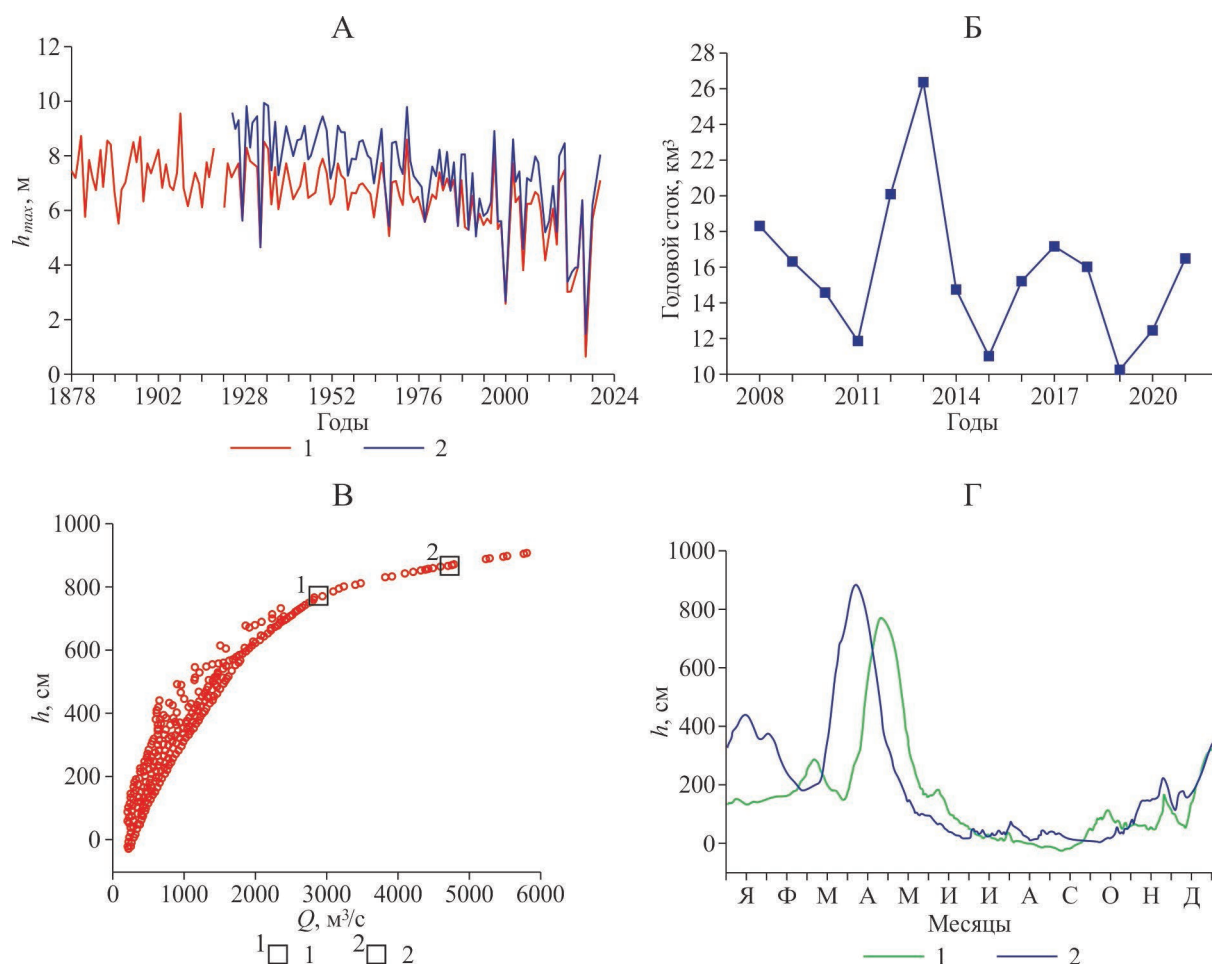
В программе Agisoft Metashape были сформированы ортофотопланы и привязаны к карте высот. Пространственное разрешение их растров составило 1.3 см, что позволило проследить разрушение пойменного яра в теплое время года, осуществляемое склоновыми, биогенными и антропогенными процессами, ливневым размывом и паводковыми подмывами откоса. Переход от ЦММ к ЦМР происходил в автоматическом режиме, хотя и требовал контроля оператора. В первую очередь отбраковываются некорректно позиционированные точки. Построение точной ЦМР основывается на определении соотношения площадей участков без растительности и ареалов разнотравно-злаковых и древесно-кустарниковых биоценозов. Отметим, что стационар «Костино» лишен деревьев-крупномеров, встречаются отдельные экземпляры *Salix alba*, *Acer negundo* и *Alnus incana* высотой до 3–5 м. Верификация моделей на участках, покрытых травянистой растительностью, сопровождалась наземной съемкой на свежих укосах в летнее время.

Наземная съемка (см. рис. 3) сыграла решающую роль в поддержании работы стационара в 2023 г., весенняя и зимняя модели рельефа в данный период были сформированы без участия «дронов». Вступление в силу Постановления Губернатора Рязанской области № 134-пг от 7 ноября 2022 г. «О реализации Указа Президента Российской Федерации от 19 октября 2022 года № 757» (Официальное опубликование..., 2023) привело к прекращению БПЛА-контроля литодинамики учетных площадок. Осенняя ЦМР 2022 г., последняя по времени создания, стала основой для размещения контуров изолиний, актуальных на начало июня и ноября 2023 г. Во всех случаях совмещение поверхностей, созданных точечной геодезической съемкой и аэрофотосканированием, и расчет объемов эрозии (параметр  $V$ ) осуществлялись в модуле Civil

3D. Весь 400-метровый стационар для удобства количественного описания был фрагментирован на восемь 50-метровых отрезков (сектора № 1–8) (рис. 4). Установлена хорошая сходимости данных  $V_r$  (расчетов по наземным моделям) и  $V_a$  (расчетов по БПЛА-съемке) для зимне-весенней эрозии 2021–2022 гг. и для летне-осенней литодинамики 2022 г. Определение коэффициента корреляции Спирмена ( $r$ ) в условиях данной задачи и прочие статистические операции выполнены в программе Statistica 10.0 по известному (Вуколов, 2008) алгоритму (см. рис. 3).

Нами обособлены летне-осенний и зимне-весенний сезоны функционирования стационара (рис. 5). Первый из них соответствует фазе летне-осенней межени гидрологического года, а второй — фазам зимней межени и весеннего половодья. Водность первого сезона (ноябрь — май) в последние годы несколько перераспределена (Горбаренко, Варенцова, Киреева, 2021) за счет усиления зимних паводков, но максимум все равно приходится на весенние месяцы. Для периода мониторинга известны не только расходы воды в границах стационара, но и их значения на г.п. Половское в 2022–2023 гг. На данном створе осуществляется круглогодичный контроль уровней р. Оки и расходов воды, на створе г.п. Рязань, всего в 34 км ниже по руслу от стационара, — только уровней. Кривая, составленная по данным АИС ГМВО для г.п. Половское (за 2008–2021 гг.), связывает характерные уровни и расходы в пойменно-руслевом сечении (рис. 5). В соответствии с графиком приводятся интервальные оценки максимальной водности р. Оки на пике половодья ( $Q_{\max}$ ) и ее стока за 14 лет (календарные годы). Гидрологическая информация заимствована из открытых массивов данных (АИС ГМВО, 2023).

Морфология рельефа может являться самостоятельным предметом исследования (Тикунов, 1997; Симонов, 2005; Завадский, Лобанов, Петухова и др., 2010; Hamshaw, Bryce, Rizzo et al., 2018), однако оценки устойчивости речных берегов обычно неполны без представлений об их механическом составе. Многие склоновые рельефообразующие процессы (осыпание, земляные обвалы, оползни) также в явном виде зависят от преобладающей литологии отложений, слагающих откосы (Yu, Wei, Wu, 2015; Zong, Xia, Zhou et al., 2017; Van Dijk, Mastbergen, Van den Ham et al., 2018). Теоретически нефлювиальная литодинамика может вносить заметный вклад в эрозию берегов на протяжении теплого сезона года (июнь — октябрь) (Lawler, 1993; Couper, Maddock, 2001; Беркович, 2020). Состав аллювиальных отложений, дневной и погребенной почвы рассмотрен нами на опорных



**Рис. 5.** Динамика водного режима р. Оки в районе исследования. А – максимальные уровни 1878–2023 гг.: 1 – г.п. Рязань; 2 – г.п. Половское. Б – годовой сток по г.п. Половское. В – кривые  $Q = f(H)$  по г.п. Половское: 1 –  $\sim Q_{\max}$  в 2022 г.; 2 –  $\sim Q_{\max}$  в 2023 г. Г – ход уровней по г.п. Половское: 1 – в 2022 г.; 2 – в 2023 г.

**Fig. 5.** Dynamics of the Oka River water regime in the study area. А – maximum levels 1878–2023: 1 – Ryazan gauging station; 2 – Polovskoye gauging station. Б – Annual runoff for the gauging station of Polovskoye. В – curves  $Q = f(H)$  for Polovskoye settlement: 1 –  $\sim Q_{\max}$  in 2022; 2 –  $\sim Q_{\max}$  in 2023. Г – data about of the water level of Polovskoye gauging station: 1 – in 2022; 2 – in 2023

шурфах и зачистках (рис. 6). С шагом 0.5 м по вертикали были отобраны пробы почвогрунтов, гранулометрический анализ которых в дальнейшем позволил определить границы русловой, пойменной и старичной фаций. Ранее, несмотря на наличие специальных исследований по литологии осадков поймы р. Оки в ее среднем течении (Лазаренко, 1964), механический состав берегов на Марковской излучине не становился предметом рассмотрения. Координация сезонной динамики и стратиграфии рельефа на фронте размыва осуществлена нами с учетом распределения  $U$  в ареалах экспонирования осадочных фаций на русловом склоне.

Непараметрические тесты (рис. 7) Фишера и Краскелла – Уоллиса (Вуколов, 2008) и графическая визуализация (двухосевые графики, графики

«ящички с усами») использовались для подтверждения либо опровержения гипотез об однородности мощности рельефообразования в зависимости от тех или иных параметров. К числу последних, помимо фациального состава, относилась высота позиции над урезом р. Оки (параметр  $h$ ) и расположение на том или ином секторе стационара. Средний диаметр частиц грунта ( $d_{50}$ ), используемый в прогнозах горизонтальных русловых деформаций речных русел (Беркович, 2012; Karmaker, Dutta, 2013; Yu, Wei, Wu, 2015; Deng, Xia, Zhou et al., 2018), позволил оценить гранулометрический состав надводной части берега (рис. 8). Крупномасштабное моделирование рельефа стало основой для оценок экспорта отложений из модельного участка фронта размыва по интервалам высот (через каждые

0.5 м высоты). Предпринята также координация фактических результатов мониторинга с формулой К.М. Берковича и Б.Н. Власова (Беркович, 2020) по расчету плановых деформаций русла и с коэффициентом устойчивости русла Н.И. Маккавеева (Кондратьев, Попов, Снисченко, 1982; Эрозионно-русловые..., 2017), рекомендованными (Савичев, 2013) для прогнозов скорости смещения свободных излучин.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фациальная архитектура днища окской долины в районе исследования рутинна для молодых генераций окской поймы, но подвержена латеральной изменчивости, в частности, амплитуда мощности осадков аIVр составляет 1.4–3.3 м. Ложе водотока врезано в древние песчаные отложения, однако и субаэральный рельеф в значительной мере сложен частицами псаммитовой размерности. Средний  $d_{50}$  надводной части берега составляет 0.2 мм, причем литологические различия между фациями хорошо заметны —  $d_{50} = 0.08$  мм для аIVр и  $d_{50} = 0.28$  мм для аIVрг (рис. 6). Обнаружены лишь три крупные старичные линзы, вертикальная мощность которых может достигать 1.6 м в реликтовых понижениях палеорельефа. В среднем же она составляет всего 0.9 м на тех секторах учетной площадки, где значительная площадь занята межгрядными ложбинами, частично перекрытыми наложенными прирусловыми валами. Старичные суглинки существенно не отличаются от пойменных, их  $d_{50}$  равен 0.06 мм, есть значительная примесь песка. Различия между крупностью пойменных и донных осадков, напротив, велики и составляют, в первом приближении, 3–6 раз. На аккумулятивном берегу излучины ежегодно фиксируется накопление крупного (0.5–1.0 мм) и грубого (1.0–2.0 мм) песка (Воробьев, Кривцов, Кадыров, 2021), пристрежневая субфация, видимо, несколько обогащена гравием. Наши данные по литологии фронтальной части прирусловой отмели и подводного склона на фронте размыва свидетельствуют о преобладании песчаных частиц диаметром 0.35–1.2 мм. Общие же оценки  $d_{50}$  руслового ложа р. Оки на западе Рязанской области колеблются в широком диапазоне (0.4–1.0 мм) (Беляков, Беркович, 2005).

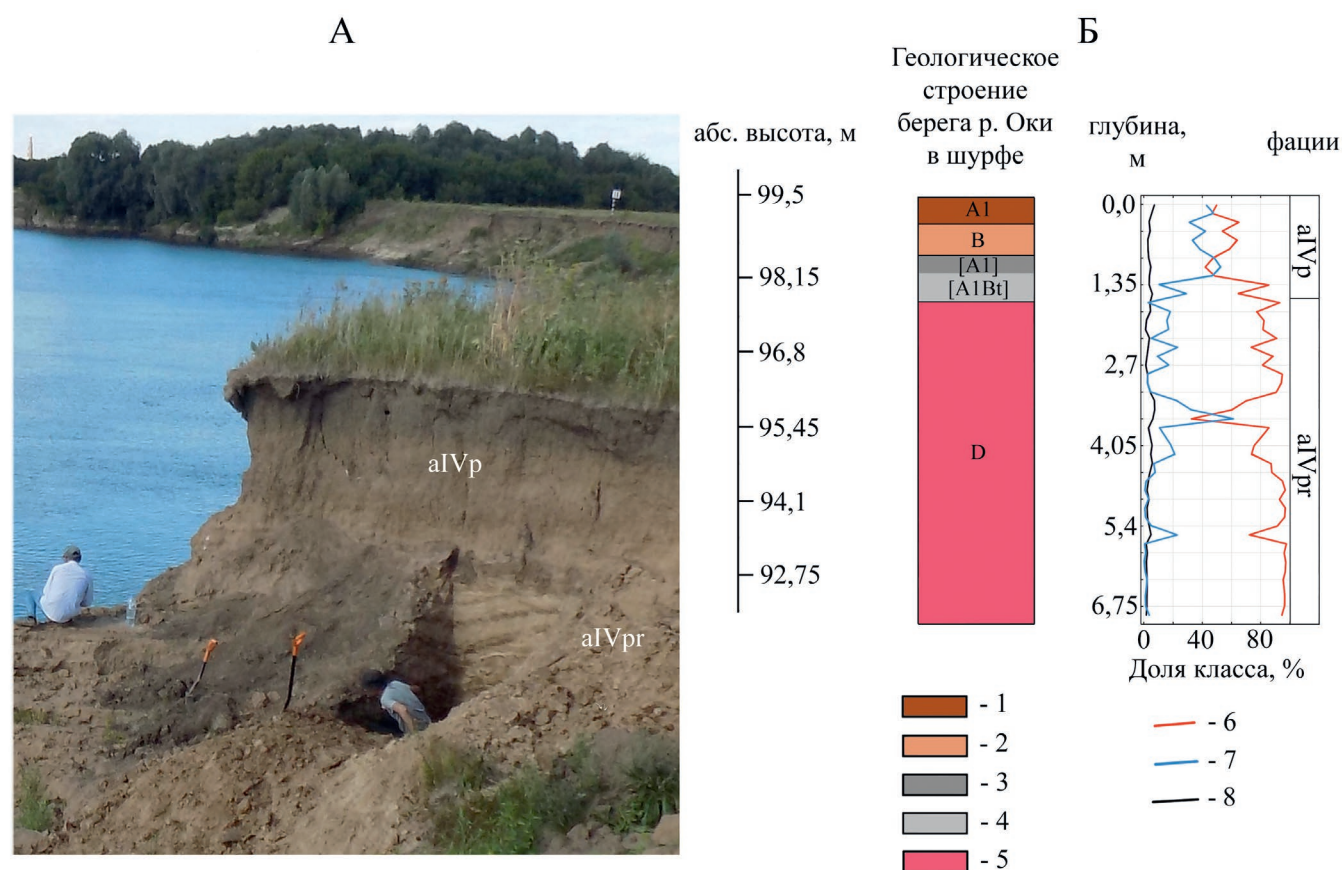
Для рек с песчаным дном характерно интенсивное перемещение гряд (Кондратьев, Попов, Снисченко, 1982; Савичев, 2013; Zong, Xia, Zhou et al., 2017). На поперечных сечениях окского русла около стационара четкие контуры даже крупнейших из них установить не удалось. Тем не менее выделяются поднятия дна реки относительной высотой до

1.5 м и шириной до 20–25 м. Для фиксации более достоверной морфологии ложа необходима более высокая пространственная полнота позиционной информации. Теоретически распознанные неровности дна могут относиться к грядам групп Б и В (по Н.И. Алексеевскому (Эрозионно-русловые..., 2017)) или мезоформам (по Р.С. Чалову (Эрозионно-русловые..., 2017)). Они тяготеют к подводной части прирусловой отмели, однако частично выполняют и эрозионный склон русла ниже уровня воды. Высота этой части откоса составляет порядка 8 м на всех трех сечениях, перепад высот между плёсом и пойменной бровкой достигает 15–18 м. Подтверждены приводящиеся в литературе повышенные местные значения максимальной глубины русла — до 11.6 м. Такие глубины в верхнем течении р. Оки маркируют русловые карьеры (Беркович, 2020). Донный рельеф на стационаре «Костино» имеет, главным образом, естественное происхождение. Так, плёс глубиной до 11–12 м (перевал «Волынский») на нижнем крыле меандра существовал еще в 1956 г. (Лощманская карта..., 1956). Отмеляя часть потока плавно переходит в выпуклый берег излучины. Однако в окрестностях створа III прирусловая отмель узкая и непосредственно сообщается с прирусловым валом высотой до 3.5 м. Наличие относительно высокого противоположного берега на выходе реки из стационара создает предпосылки для повышения скорости потока в половодье до начала перелива воды на высокую пойму (Эрозионно-русловые..., 2017). Это способно вызвать ускоренную эрозию на фронте размыва при водности, соответствующей нижнему интервалу руслоформирующих расходов, поскольку поток оказывается стесненным в русловом ложе.

Сохранность рельефа секторов № 6–8 и фрагментов берега еще ниже по течению оказывается «под угрозой» из-за увеличения здесь пропускной способности русла. Судя по батиметрическим данным, поток имеет две динамические оси, промежутки между которыми четко выделяется на створе III. Площадь поперечного сечения на этом створе достигает 1060 м<sup>2</sup>, гидравлический радиус — 6.58 м; на поперечнике I у секторов № 1 и № 2 данные параметры равны 710 м<sup>2</sup> и 4.52 м соответственно. При неустановившемся движении потока во время половодья пиковые расходы могут резко возрастать (Барышников, 2012; Karmaker, Dutta, 2013). Н.Е. Кондратьев с соавторами (Кондратьев, Попов, Снисченко, 1982) убедительно показали возрастание скорости деформаций берегов реки с увеличением ее глубины на примере р. Дон. Предпринимаются попытки нивелировать высокий эрозионный риск на секторах № 4–8 путем проведения дноуглу-

бительных работ. Регулирование глубины русла приурочено к выпуклому берегу Марковской излучины и имеет целью перераспределение расходов и образование обратной асимметрии поперечного сечения. Наши повторные гидрометрические измерения 2023 г., осуществленные сразу после работы землесоса, зафиксировали прорезь шириной до 25–30 м и глубиной 4.5–6.0 м на створах II и III. Абсолютные отметки тальвега прорези соответствуют 80.3–80.8 м. Подобные работы проводятся на исследованном участке русла регулярно, о чем может свидетельствовать расположение линии максимальных глубин в виде широкой ложбины на створе III в пределах фронтальной зоны прирусловой отмели.

Модификация водного пути в целом, оправданная на ключевом участке исследования, осуществляется без учета пространственного распределения ежегодных размывов на подводном склоне пойменного массива. На секторах № 1–5 половодье 2023 г. привело к его отступанию на 2–7 м, наиболее существенные преобразования затронули участок в окрестностях створа I. Линия максимальных глубин в данном случае приблизилась к берегу на 10 м. Заложение подводного склона практически не изменилось (около 1:5), но сформировался единый уклон, объединяющий надводную и подводную части берега. При этом почти не зафиксировано размыва откоса на створе III, хотя его подводный участок круче, с



**Рис. 6.** Стратиграфия и гранулометрический состав почвогрунтов в одном из опорных шурфов на стационаре. А — опорный разрез пойменной гривы; Б — геологическое строение разреза. Генетические горизонты почвенного профиля: 1 — гумусово-аккумулятивный A1; 2 — переходный B; 3 — гумусово-аккумулятивный серый лесной палеопочвы A1; 4 — иллювиально-гумусовый серый лесной палеопочвы A1Bt; 5 — подстилающие грунты D. Доля размерных классов частиц грунта: 6 — песок; 7 — алеврит; 8 — ил. Фации аллювия: aIVp — пойменная; aIVr — пойменно-русловая

**Fig. 6.** Stratigraphy and granulometric composition of soil in one of the reference outcrops at the stationary. А — reference outcrop of the floodplain ridge; Б — geological structure. Genetic horizons of the soil profile: 1 — humic A1; 2 — transitional B; 3 — humic of the palaeosol A1; 4 — illuvial of the palaeosol A1Bt; 5 — underlying soils D. Proportion of size classes of soil particles: 6 — sand; 7 — aleurite; 8 — silt. Alluvium facies: aIVp — overbank fines; aIVr — laminated sands

заложением 1:3.8. Поток лишь углубил на 0.8–1.3 м основание склона, создав (или возобновив?) вторую линию максимальных глубин. Вся подводная часть 400-метрового фрагмента русла высотой 8 м за половодье теряет, по грубым подсчетам, около 11 700 м<sup>3</sup> грунта, который превратился во влекомые наносы. Максимальные потери русловой фации аллювия и более древних отложений на один погонный метр достигают около 50 м<sup>3</sup>.

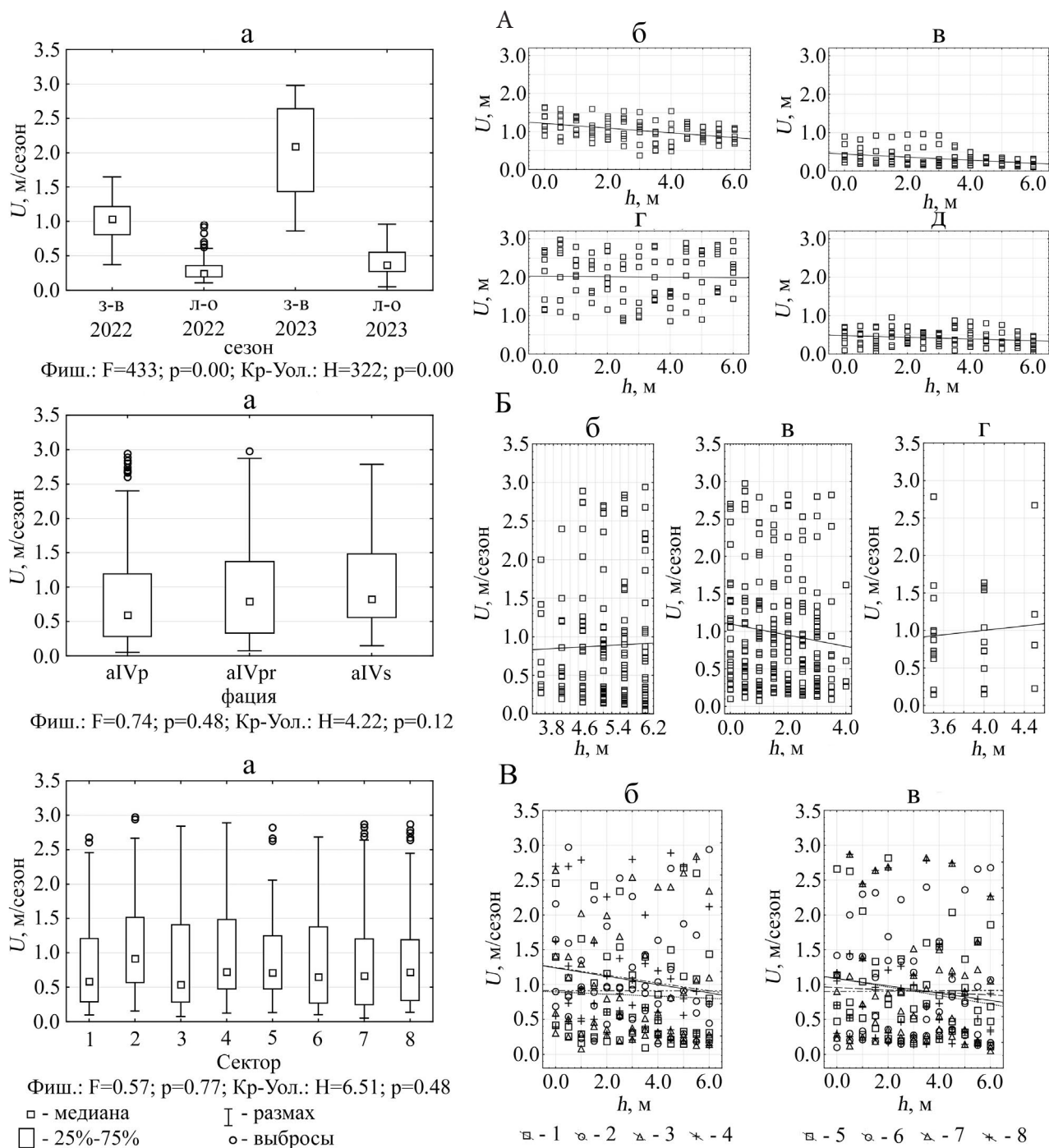
Пойменная фация аллювия занимает 35% надводной части откоса учетной площадки, ее наибольшая мощность приурочена к секторам № 3 и 4. На секторах № 1, 6 и 7 в отдельных местах слой скрытослоистых суглинков вместе с почвенно-растительным слоем редуцирован до 1.1–1.3 м. Совокупная площадь старичных почвогрунтов, экспонированных в границах пойменного яра, достигает всего 6.7% от общей склоновой поверхности учетной площадки. Остальная часть берега представлена песками и супесями осадков aIVrg с пологонаклонной и косоволнистой слоистостью, иногда в них встречаются и алевроитовые прослои. Вклад фаций в геологическое строение стационара соразмерен их роли в боковой эрозии (рис. 8). Отложения aIVrg, занимающие нижнюю часть толщи грунтов, разрушаются на 4% быстрее, чем можно было бы предположить, исходя только лишь из стратиграфического строения пойменного массива. Отметим, что в границах стационара почти повсеместно нижняя часть пойменной фации аллювия выполнена горизонтами погребенной дерновой почвы (рис. 6). По гранулометрическому составу фракций она, в целом, конформна пакету aIVr и не оказывает положительного либо отрицательного влияния на устойчивость откоса в интервале высот 4.5–5.5 м над урезом реки.

Статистически достоверные отличия в скорости экспорта грунтов из трех основных фаций отсутствуют: уровень значимости тестов Фишера и Краскелла — Уоллиса равен 0.48 и 0.12 соответственно (рис. 7). Индифферентность общего размыва к фациальной принадлежности грунтов во многом обусловлена преобладающей ролью половодного потока и затухиванием вклада остальных геоморфологических агентов. В теплое время года рельефообразующие процессы, согласно своей сущности, способны избирательно подвергать те или иные отложения разрушению. Так, биогенная эрозия приурочена, главным образом, к кровле aIVrg, поскольку ласточки-береговушки (*Riparia riparia*) предпочитают осадки легкого гранулометрического состава для заложения нор. Волнобой от проплывающих судов действует на основание пойменного яра (Егоров, 2017), а ливневые осад-

ки способны эродировать любые почвогрунты. В отличие от субаэральных агентов, размыв берега в половодье 2022–2023 гг. заведомо осуществлялся по всей высоте откоса. По данным г.п. Рязань (АИС ГМВО, 2023), превышение уровня воды при пиковых расходах над пойменной бровкой в 2022 г. составляло 0.3 м, в 2023 г. — 1.1 м. На двухосевом графике параметр  $U$  имеет равномерное распределение по  $d_{50}$ , что является свидетельством одинаковой интенсивности боковой эрозии на всех осадочных породах, препарированных ею.

Наклон линейного тренда зависимости  $U$  и высоты берега  $H_0$  для 2022 г. свидетельствует о слабой отрицательной связи между ними, не зафиксированной и на аналогичной диаграмме для 2023 г. Максимальные усредненные на 50 м длины и 1 м высоты откоса значения  $U$  между двумя фазами повышенной водности различаются почти вдвое (1.8 м/сезон и 3.0 м/сезон). Наряду с двукратным превышением средних скоростей размыва в зимне-весенний сезон во втором году исследований относительно первого (2.0 м/сезон против 1.0 м/сезон) на итоговой ЦМР можно видеть 6 крупных обрушений берега (см. рис. 4). В то же время по длине стационара «Костино» берег размывается относительно равномерно — не выявлены статистически достоверные отличия между усредненными значениями  $U$  по восьми секторам (рис. 7). Медианные значения  $U$  центрируют выборки в интервале 0.6–0.9 м/сезон (фактически, это отступление берега за полугодие). Выбросы на диаграмме «ящики и усы», расположенные в интервале 2.5–3.0 м/сезон, также встречаются на большинстве 50-метровых участков берега.

Определяющим фактором колебаний мощности эрозионного процесса является ежегодная изменчивость стока воды (Баровский, 2005; Замышляев, 2010; Kimiaghali, Goharrokhi, Clark et al., 2015; Эрозионно-русловые..., 2017; Jugie, Goba, Virmoux et al., 2018). Региональный мониторинг деформаций русла в 2014–2017 гг., когда половодья по водности соответствовали крупным осенним паводкам, неоднократно регистрировал практически стабильные участки окского русла. Смещение пойменной бровки на них было в пределах погрешности измерений (до 0.1 м/год). Среднемаксимальный  $Q_{\max}$  р. Оки возрастает на участке русла от г. Калуги до г. Муром с 4800 м<sup>3</sup>/с до 9050 м<sup>3</sup>/с (Беляков, Беркович, 2005). Пиковая водность потока по кривой связи уровни-расходы в 2023 г. достигала примерно 4700 м<sup>3</sup>/с, в то время как в 2022 г. — всего 2900 м<sup>3</sup>/с (рис. 5). Несмотря на то, что за два года мониторинга весенние половодья не вышли на среднемаксимальный уровень



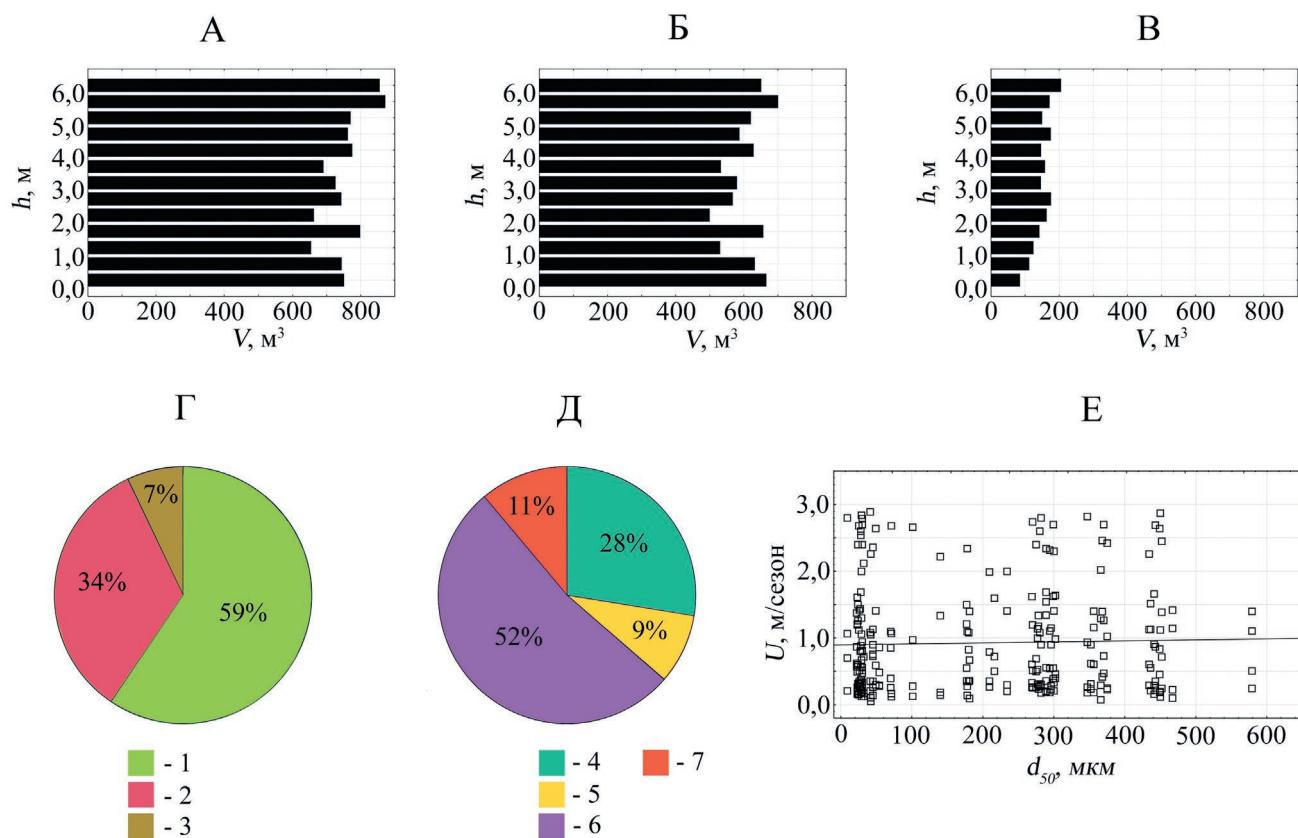
**Рис. 7.** Распределение скорости боковой эрозии ( $U$ ) по сезонам гидрологического года (А), межгрупповые различия этого параметра по сезонам (а), распределение значений  $U$  по высоте берегов зимой — весной 2022 г. (б), летом — осенью 2022 г. (в), зимой — весной 2023 г. (г), летом — осенью 2023 г. (д). Распределение эрозии по фациям осадочных отложений (Б), межгрупповые различия между фациями (а), связь сезонных значений  $U$  с высотой берега для грунтов aIVp (б), то же для грунтов aIVpr (в), то же для грунтов aIVs (г). Эрозия на секторах стационара (В), межгрупповые различия по секторам (а), на секторах № 1–4 (б), на секторах № 5–8 (в); цифрами обозначены порядковые номера секторов

**Fig. 7.** Distribution of lateral erosion rate ( $U$ ) by season of the hydrological year (A), inter-group differences of this parameter by season (a), distribution of  $U$  values by bank height in winter- to spring 2022 (б), summer- to autumn 2022 (в), winter- to spring 2023 (г), summer- to autumn 2023 (д). Distribution of erosion by sediment facies (Б), inter-group differences between facies (а), relationship of seasonal  $U$  values to bank height for aIVp soils (б), same for aIVpr soils (в), same for aIVs soils (г). Erosion on stationary sectors (В), intergroup differences by sectors (а), on sectors No. 1–4 (б), on sectors No. 5–8 (в); numbers denote serial numbers of sectors

по водности, приближение к данному пороговому значению привело к учащению резких проявлений рельефообразования. Поток,  $Q_{\max}$  которого в 2023 г. увеличился на 61%, сформировал новые фестоны и нивелировал мысы на секторах № 1, 3, 5–7. Четыре из шести обрушений произошли на пойменных гривах, и лишь два — на межгивных понижениях, частично выполненных осадками aIVs. Латеральная селективность боковой эрозии на сегментно-гривистых поймах и геодинамическая «уязвимость» отложений грив по сравнению с тонкодисперсными осадками в разделяющих их ложбинах хорошо известны (Couper, Maddock,

2001; Кораблева, Чернов, 2008; Рысин, Осипов, 2021). Крупнейший фестон на стационаре «Костино» образовался за пределами учетной площадки в песках и ожелезненных песчаниках aIVrg, отчасти aIVr (см. рис. 4).

Ключевой причиной появления фестонов и выемок, наряду с равномерным радиальным распределением  $U$ , в 2023 г. стало формирование полноценного пойменно-руслового потока, пересекающего пойменную бровку. В первом году мониторинга было всего 6 дней с ее затоплением, а в следующем — уже 18 дней. Взаимодействие водных масс русла и поймы в форме, по-видимо-



**Рис. 8.** Результаты расчетов объемов эрозии берега (А–Д) и зависимость скорости его отступления от среднего диаметра частиц грунта  $d_{50}$  (Е). А — объем эрозии ( $V$ ) за 2022–2023 гг., распределенный по высоте берегов ( $h$ ); Б — то же за зимне-весенние сезоны; В — то же за летне-осенние сезоны; Г — распределение объема эрозии ( $V$ ) по осадочным фациям; Д — то же по сезонам 2022–2023 гг. Объем эрозии по типам отложений: 1 — aIVpr; 2 — aIVp; 3 — aIVs. Объем эрозии по сезонам года: 4 — половодье 2022 г.; 5 — лето — осень 2022 г.; 6 — половодье 2023 г.; 7 — лето — осень 2023 г.

**Fig. 8.** Results of calculations of bank erosion volumes (A–Д) and dependence of its retreat rate on the average diameter of soil particles  $d_{50}$  (E). A — erosion volume ( $V$ ) for 2022–2023, distributed by bank height ( $h$ ); Б — the same for winter-spring seasons; В — the same for summer-autumn seasons; Г — distribution of erosion volume ( $V$ ) by sediment facies; Д — the same for 2022–2023 seasons. Erosion volume by sediment types: 1 — aIVpr; 2 — aIVp; 3 — aIVs. Volume of erosion by season of the year: 4 — flood 2022; 5 — summer- to autumn 2022; 6 — flood 2023; 7 — summer- to autumn 2023

му, расходящегося течения (Барышников, 2012) вызвало увеличение скоростей и расходов в основном русле и, как следствие, усиление боковой эрозии. Особенно пострадали участки береговой линии с положительной продольной кривизной по отношению к окскому руслу (выступы). Во время трехнедельного руслонаполнения в 2023 г. их взаимодействие с водными массами не ограничивалось фронтальной зоной, но распространялось и на боковые поверхности. При низком сцеплении песков и супесей aIVp, сопровождаемом интенсивной грунтовой фильтрацией, основания откосов быстро потеряли устойчивость. Суглинистые отложения пакетов aIVp сохранились в виде отдельных блоков на склоне и бичевнике до летних паводков или даже до следующего половодья.

Эрозия речных берегов является во многом интегральным процессом и в действительности складывается несколькими компонентами. Например, земляные обвалы могут происходить как вследствие сдвиговых напряжений, создаваемых водными массами по отношению к берегу, так и на спаде половодья из-за увеличения удельного веса грунтового массива при разгрузке верховодки (Yu, Wei, Wu, 2015; Егоров, 2017; Deng, Xia, Zhou et al., 2018). Для разделения весеннего сезона рельефообразования на подобные краткие этапы геодезическая съемка должна быть ежедневной, но опасная гидрологическая обстановка делает ее сопряженной с угрозами эксплуатации оборудования. Сосредоточив внимание на распределении эрозионного риска по более продолжительным метеорологическим сезонам, мы выявили достоверные отличия между ними по скорости боковой эрозии берега. Медианы выборок  $U$ , соответствующих летне-осенним месяцам 2022–2023 гг., в 2–4 раза меньше, чем для зимне-весеннего периода. Оба непараметрических критерия показали уровень значимости между выборками  $p < 0.01$ . Определяющая роль половодий в моделировке рельефа русловых откосов проявляется в увеличении экспорта наносов из них. Если по итогам половодий надводная часть стационара «Костино» теряет 2780–5430 м<sup>3</sup> почвогрунтов, то за июнь – октябрь – всего 890–1130 м<sup>3</sup>. Расхождения между  $V_r$  и  $V_a$  в 2022 г. незначительны, коэффициент корреляции Спирмена составил 0.95–0.98; корреляции значимы при  $p < 0.01$ . Систематические ошибки больше для зимне-весенней эрозии из-за сложности учета микрорельефа откоса в ходе проведения наземной съемки (рис. 8). Ежегодный объем переработки рельефа учетной площадки на 1 пог. м длины откоса оценен в 12.8 м<sup>3</sup>. За гидрологический 2023 г. соотношение эрозии подводного

и надводного фрагментов склона р. Оки составило примерно 1.0/0.5.

Высокоточный мониторинг горизонтальных русловых деформаций выводит на первый план проблему информативности локальных наблюдений для прогнозов динамики пойменного рельефа. Главным недостатком стационарного мониторинга физико-географических процессов являются затруднения при экстраполяции полевых данных на участки за границами учетной площадки (Lawler, 1993; Couper, Maddock, 2001; Симонов, 2005; Лучников, Ляхин, Лепихин, 2018). В настоящее время нам неизвестны иные крупномасштабные оценки параметров  $U$  и  $V$ , произведенные в среднем течении р. Оки для рельефа ее размываемых берегов. Оценка репрезентативности данных за отдельные годы может основываться и на соответствии прогнозных и фактических значений скорости эрозии. Большинство формул для количественных расчетов параметра  $U$  определяют его для одиночных створов. При этом меандрирование русла обычно происходит по двум видам плановых деформаций излучин – продольным и поперечным (Кондратьев, Попов, Снисченко, 1982; Lagasse, Zewenbergen, Spitz et al., 2004; Эрозионно-русловые..., 2017). Стационарные наблюдения продолжительностью в несколько лет не предполагают их специальной дифференциации, поскольку доминирование того или иного вида во многом зависит от морфодинамической позиции стационара. Геодинамические (Коробкин, Передельский, 2013; Kimiaghali, Goharrokh, Clark et al., 2015) и геоэкологические изыскания (Lagasse, Zewenbergen, Spitz et al., 2004; Рысин, Осипов, 2021) также выделяют плановые деформации русла как единый опасный рельефообразующий процесс.

За два года стационарного контроля эрозии было зафиксировано уничтожение 1388 м<sup>2</sup> поймы, более половины (64.9%) вклада осуществлено половодьем 2023 г. Для сравнения, в 2022 г. поток размыв 314 м<sup>2</sup> территории, или 22.6% от итоговой суммы. В июне – октябре на стационаре, в среднем, утрачивается 86.3 м<sup>2</sup> территории, причем за теплый сезон, начавшийся после более мощного половодья, было уничтожено на 12 м<sup>2</sup> поймы меньше, чем за лето – осень 2022 г. Ежегодные потери площади поймы на стационаре наиболее велики в границах секторов № 1, 3, 6–7, максимумы приурочены к «залповой» эрозии при появлении фестонов и выемок. Потери территорий, как и экспорт грунтов, распределены неравномерно, усредненные линейные оценки по  $U$  и  $V$  предоставляют только общую информацию. Так осуществляется дискретная

природа русловых процессов (Кораблева, Чернов, 2008; Егоров, 2017), ярко выраженная в позициях—средоточиях реализованной геоморфологической опасности. Отмеченные позиции пространственно обособляются как «узлы» в границах новообразованных отрицательных форм флювиального рельефа, разделенные «линиями» с более медленным отступанием берега (см. рис. 4). Протяженность последних колеблется в интервале 15–100 м и, очевидно, коррелирует с литологией грунтов и исходной продольной кривизной пойменной бровки, но количественные оценки этих соотношений пока отсутствуют.

Такую пространственную модель боковой эрозии речного берега можно обозначить как линейно-узловую, задачи картографирования объектов и процессов с подобной топологией успешно решаются (Тикунов, 1997; Перькова, 2017) в общественной географии, экономике, геоматике и технических науках. Между тем неясно, насколько типичным является линейно-узловой рисунок эрозии. Наиболее вероятно, что он становится морфологически четко выраженным только при приближении  $Q_{\max}$  к средним многолетним значениям (или при превышении их), когда поток приобретает достаточную мощность для дестабилизации геологических тел или их значительных фрагментов. Еще одним условием линейно-узловой топологии эрозии можно считать ее приуроченность к сегментно-гивистым поймам с чередованием характерных литологических разностей по длине фронта размыва. Максимальное расстояние смещения пойменной бровки в пределах крупнейшего фестона в 2023 г. составило 10.8 м, в границах прочих «узлов» — 7.9 м. Отступление берега в границах «линий» не превышает 1.8 м, что свидетельствует о наличии двух количественных компонентов эрозии — ожидаемого и стохастического. Ожидаемые значения близки к данным, полученным путем геоинформационного реанализа по Атласу Менде

(Воробьев, Пузаков, 2017), и к результатам регионального гидролого-морфодинамического анализа (Баровский, 2005). Тем не менее открытым вопросом остается потенциал их прогнозирования, исходящий из гидравлических параметров русла и изменчивости стока.

Для прогнозов скорости размывов пойменных берегов успешно используется формула К.М. Берковича (Баровский, 2005; Эрозионно-русловые..., 2017):

$$U = k \frac{Q^2 I}{d H_6}, \quad (1)$$

где  $Q$  — среднемаксимальный расход воды,  $I$  — уклон,  $d$  — средний диаметр наносов ( $d_{50}$ ),  $H_6$  — высота берега над меженью,  $k$  — безразмерный коэффициент, объединяет структурно-морфологические и гидравлические параметры системы «пойма—русло». Река Ока в контурах Марковской излуины фактически течет в сторону, обратную направлению днища долины, поэтому уклоны здесь минимальны (0.02 ‰). Коэффициент  $k$  при расчетах взят равным 0.00034, как и на других реках со среднегодовым расходом более 500 м<sup>3</sup>/с, но менее 5000 м<sup>3</sup>/с. Сценарии горизонтальных деформаций, разработанные нами (табл. 1) в отсутствие исчерпывающих данных о литологии дна, построены на интервальной оценке  $d_{50} = 0.4$ –1.2 мм. Используя имеющиеся данные о среднем диаметре донных отложений на участке русла с. Кузьминское — г. Рязань (Беляков, Беркович, 2005) — 0.75 мм и заменив среднемаксимальный  $Q$  на значения  $Q_{\max}$  2022–2023 гг., мы рассчитали значения  $U$ , которые, очевидно, завышены.

Фактические значения скорости разрушения берега параметризуют  $k$  примерно на порядок меньшим, чем принято в рекомендациях (Савичев, 2013), даже если считать  $Q_{\max}$  2023 г. завышенным. Подбор оптимального  $k$  стал возможен при использовании коэффициента стабильности русла Н.И. Маккавеева:

**Таблица 1.** Параметры формулы К.М. Берковича (1) и результаты расчета скорости боковой эрозии на стационаре «Костино»

**Table 1.** Parameters of K.M. Berkovich's formula (1) and results of calculation of lateral erosion rate at the stationary 'Kostino'

| $d_{50}$ | $U_{2022}$<br>$k = 0.00034$ | $U_{2023}$<br>$k = 0.00034$ | $U_{2022}$<br>$k = 0.000034$ | $U_{2023}$<br>$k = 0.000034$ |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 0.4      | 23.8                        | 62.58                       | 2.38                         | 6.24                         |
| 0.6      | 15.8                        | 41.72                       | 1.58                         | 4.16                         |
| 0.8      | 11.9                        | 31.29                       | 1.19                         | 3.12                         |
| 1.0      | 9.52                        | 25.03                       | 0.95                         | 2.50                         |
| 1.2      | 7.93                        | 20.86                       | 0.79                         | 2.08                         |

$$K_c = 100 d/b_p I, \quad (2)$$

учитывающего только структурно-морфологические критерии руслового ложа. Если принять  $d_{50} = 1.0$  мм, то  $K_c = 31$ , что в 3 раза больше, чем усредненные значения для Кузьминско-Рязанского участка р. Оки (Беляков, Беркович, 2005). При относительно высокой стабильности русла, таким образом, все равно наблюдаются интенсивные размывы берега. Теоретическое моделирование, выполненное В.И. Замышляевым (Замышляев, 2010), позволяет объяснить отмеченное противоречие малым радиусом кривизны Марковской излучины. Благоприятный «угол атаки» потока на берег учетной площадки, согласно аргументации Н.Е. Кондратьева (Кондратьев, Попов, Сنيщенко, 1982), также способствует неустойчивости плановых очертаний меандра. Зависимость, предложенная в работе (Беркович, Злотина, 2003), позволяет связать  $U$  и коэффициент устойчивости русла:

$$U = 15,6 K_c^{-0,65} \quad (3)$$

В нашем случае  $U = 1.67$ , и обнаруживается хорошая сходимость прогноза с усредненными значениями за 160 лет и с масштабами реально наблюдаемой литодинамики берега. Опираясь на прочими количественными связями, можно получить дополнительную информацию и о подводном рельефе. Так, по зависимости  $K_c$  от  $\theta$  (критерий квазиоднородности потока И.Ф. Карасева (Беркович, 2012)), установленной, в том числе, для р. Оки, при  $K_c > 10-20$ , предполагается преобладание ленточных и перекошенных гряд в комплексе донных форм. Мезоформы, обнаруженные на русловых поперечниках I–III, вполне могут относиться к отмеченным разновидностям гряд.

Подобные расчеты, выполненные на локальном уровне, способствуют синхронизации разночастотных составляющих многолетней эрозии берегов в рамках регулярного геоморфологического мониторинга. Уточнение прогнозов скорости горизонтальных деформаций русла по различным формулам и проверка их на новом фактическом материале, по-видимому, станут одним из магистральных направлений работы стационара «Костино». Помимо этого, основной проблемой является прогноз стохастических (иногда катастрофических) проявлений эрозии, особенно опасных в окрестностях населенных пунктов. Новейшие исследования на реках Западной Европы (Jugie, Goba, Virmoux et al., 2018; Van Dijk, Mastbergen, Van den Ham et al., 2018) показали перспективность комплексной классификации берегового рельефа, одновременного учета его

морфологических, литологических и водно-физических свойств выполняющих грунтов для предсказания фрагментарных обрушений откосов в «узлах» береговой эрозии. Для поймы р. Оки в ее среднем течении реализация пространственно-временного моделирования рельефообразования на подобном уровне еще остается делом будущего.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время половодий 2022 и 2023 гг., хотя и имевших обеспеченность по  $Q_{\max} > 50\%$ , ни один фрагмент исследованного берега не остался незатронутым боковой эрозией. Ее скорость распределена относительно равномерно по восьми 50-метровым секторам стационара «Костино» и по высоте надводного откоса. Статистически значимые пространственные различия по  $U$  нами не были выявлены. Гидродинамическое воздействие волн половодий приводит к отступанию берега, в среднем, на 1.5 м. Тем не менее во время половодья 2023 г. была ярко выражена латеральная дискретность рельефообразования. Формировались новые фестоны и выемки, фиксировались случаи смещения пойменной бровки на 8–10 м. Даже на локальном масштабе мониторинга морфолитодинамика оказывается весьма чувствительной к литологии сегментно-гребнистого рельефа. Амплитуда значений  $U$ , измеренных традиционными геоморфологическими методами, может достигать 800–1000%. Однако при статистическом сравнении локальные максимумы эрозии не дают значимых отличий между секторами, сглаживаясь, в том числе, отступанием берега в летне-осенние сезоны.

Прогноз горизонтальных русловых деформаций по формуле К.М. Берковича (1) откорректирован путем перерасчета ожидаемой скорости эрозии через коэффициент стабильности русла Н.И. Маккавеева (2). Результаты расчета находятся в рамках ежегодных интервальных значений  $U$  по многолетним данным, но сопоставимы только со средней скоростью смещения берега, установленной нами с помощью геодезического мониторинга. Максимумы эрозии на стационаре отождествляются с узлами топологической модели боковой эрозии, требующей дальнейшей разработки. Дестабилизация берега в «узлах» обычно ограничена площадью 80–100 м<sup>2</sup>, а их заложение сопровождается выносом 300–500 м<sup>3</sup> почвогрунтов из плоскости откоса. Появление фестонов и выемок на сформированной нами ЦМР обусловлено возросшими расходами и втрое большей длительностью затопления поймы во втором

году исследования по сравнению с первым. Предсказание подобных стохастических проявлений морфолитодинамики, тем более в региональном масштабе исследований русловых процессов, пока не представляется возможным. Трудности прогнозирования исходят из необходимости детализированных расчетов структурно-морфологических параметров откосов, при этом в границах всего стационара не подтверждается зависимость  $U$  от  $d_{50}$ , в отличие от связи  $U$  с метеорологическими сезонами. Субаэральная эрозия вогнутого берега в пределах стационара «Костино», наблюдавшаяся нами в течение теплых сезонов 2022–2023 гг., составляет 20% от общего объема перемещенных грунтов в ходе рельефообразования. Применение БПЛА впервые для Рязанской области позволило и осуществить точные ежегодные расчеты  $V$  для всего 400-метрового фрагмента вогнутого берега Марковской излучины (5112 м<sup>3</sup>/год), и определить степень переработки откоса на 1 м<sup>2</sup> территории (7.37 м<sup>3</sup>/год).

Подводная часть руслового склона на стационаре также была нестабильной — ее эрозия в 2023 г. привела к выносу, по меньшей мере, 10 000–11 000 м<sup>3</sup> грунта. Исходя из изменений, фиксируемых на поперечных сечениях русла р. Оки, мы можем сделать вывод о прогрессирующем подмыве подводного основания склона на севере стационара, ближе к устью р. Солотчи. Землечерпание у выпуклого берега меандра и заложение прорези, несомненно, затормаживают разрушение рельефа учетной площадки и замедляют потери земель на наблюдаемой части фронта размыва. Однако, по имеющейся в нашем распоряжении информации, регулирование русла осуществляется неравномерно и не может полностью предотвратить естественный ход его плановых деформаций. За год на учетной площадке площадью 3.1 га по-прежнему уничтожается 693.5 м<sup>2</sup> поймы, половодный размыв резко преобладает (607.6 м<sup>2</sup>/год) над прочими геоморфологическими процессами. Продолжение работы стационара должно подтвердить либо опровергнуть достоверность разведочных прогнозов средней скорости отступления берега, целесообразность сведения топологии эрозии к линейно-узловой модели и намеченные тенденции динамики рельефа дна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

АИС ГМВО. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. <https://gmvo.skniivh.ru/> Дата посещения: 08.12.2023.

Баровский Н.А. Гидролого-морфодинамический анализ свободно меандрирующих русел на разных стадиях развития // Геоморфология. 2005. № 4. С. 54–63.

Барышников Н.Б. Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. СПб.: РГГМУ. 2012. 426 с.

Беляков А.А., Беркович К.М. Река Ока: проблемы и перспективы реконструкции // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 4. 2005. М.: Изд-во МГУ. С. 251–273.

Беркович К.М. Руслa рек и деятельность человека. М.: ПринтКов. 2020. 146 с.

Беркович К.М. Русловые процессы на реках в сфере влияния водохранилищ. М.: Геогр. ф-т МГУ. 2012. 163 с.

Беркович К.М., Злотина Л.В. Расчет стабильности речных русел в условиях антропогенной нагрузки // География и природные ресурсы. 2003. № 2. С. 117–123.

Воробьев А.Ю., Кадыров А.С. Полевые исследования отступления берегов русла р. Оки в 2014–2018 гг. с помощью метода простых реперов // Географический вестник. 2020. № 3 (54). С. 30–45.

Воробьев А.Ю., Кривцов В.А., Кадыров А.С. Современная динамика накопления и состав аллювия прирусловой поймы реки Оки // Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. естеств. науки. 2021. Т. 163, кн. 4. С. 603–625.

Воробьев А.Ю., Пузаков С.В. Динамика боковой эрозии на вогнутых берегах излучин реки Оки в ее среднем течении в XIX–XX веках и на современном этапе // Вест. Рязан. гос. ун-та им. С.А. Есенина. 2017. № 3 (56). С. 152–161.

Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. М.: ФОРУМ. 2008. 464 с.

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милюкова И.П. О вкладе климатических и антропогенных факторов в изменения стока крупных рек Русской равнины и Сибири // Докл. РАН. 2019. Т. 488. № 5. С. 539–544.

Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6–28.

Егоров И.Е. Экзогенные геоморфологические процессы и методы их изучения. Ижевск, Изд-во УдГУ. 2017. 383 с.

- Завадский А.С., Лобанов Г.В., Петухова Л.Н., Серебренникова И.А., Смирнова Е.А., Чернов А.В. Результаты стационарных исследований русловых процессов на реках ЕТР // Эрозионные и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. 2010. С. 220–251.
- Замышляев В.И. Гидродинамические модели устойчивости и плановых переформирований речных русел и пути их развития // Журнал университета водных коммуникаций. 2010. Т. 2. С. 94–100.
- Команда экспертов представит концепцию развития водного туризма в Рязанской области. Изд-во «Пресса», новости районов Рязанской области: <https://ryazpressa.ru/komanda-ekspertov-predstavit-konceptsiyu-razvitiya-vodnogo-turizma-v-ryazanskoj-oblasti/> Дата обращения: 03.12.2023.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.
- Кораблева О.В., Чернов А.В. Опыт мониторинга русловых деформаций на широкопойменных реках (на примере р. Керженец) // География и природные ресурсы. 2008. № 2. С. 158–165.
- Коробкин В.И., Передельский Л.В. Инженерная геология и охрана окружающей среды. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та. 2013. 348 с.
- Кривцов В.А., Правкин С.А. Долинные педименты в среднем течении р. Оки // Геоморфология. 2015. № 3. С. 39–47.
- Лазаренко А.А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны, Оки). Труды ГИН. Вып. 120. 1964. 236 с.
- Лощманская карта реки Оки от устья (г. Горький) до Щурово. М.: Моск.-Окское бассей. управл. пути. 1956. 75 с.
- Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Лепихин А.П. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 37–46.
- Опубликован эскиз моста-дублёра через Оку под Рязанью. Медиа-Рязань, информационное агентство: [https://mediaryazan.ru/news/detail/506894.html?sphrase\\_id=4068743](https://mediaryazan.ru/news/detail/506894.html?sphrase_id=4068743) Дата обращения: 03.12.2023.
- Официальное опубликование правовых актов. Постановления Губернатора Рязанской области: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/6200202211110011> Дата обращения: 03.12.2023.
- Перькова М.В. Формирование линейно-узловой структуры расселения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 2. С. 120–125.
- Рысин И.И., Осипов Д.Н. Геоэкологическая напряженность пойменно-русловых комплексов на реках Удмуртии // Наука Удмуртии. 2021. № 1 (93). С. 43–63.
- Савичев О.Г. Гидрология, метеорология и климатология: гидрологические расчеты. Томск, Томский политех. ун-т. 2013. 224 с.
- Симонов Ю.Г. Геоморфология. Методология фундаментальных исследований. СПб.: Питер. 2005. 427 с.
- Тикунов В.С. Моделирование в картографии. М.: Изд-во МГУ. 1997. 405 с.
- Эрозионно-русловые системы. М.: ИНФРА-М. 2017. 702 с.
- Couper P.R., Maddock I.P. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26. Iss. 6. P. 631–646.
- Deng S., Xia J., Zhou M., Li J., Zhu Y. Coupled modeling of bank retreat processes in the Upper Jingjiang Reach, China // Earth Surface Processes and Landforms. 2018. Vol. 43. Iss. 14. P. 2863–2875.
- Global Surface Water Explorer: <https://global-surface-water.appspot.com/map>. Дата обращения: 03.12.2023.
- Hamshaw S.D., Bryce T., Rizzo D.M., O'Neil-Dunne J., Frolik J., Dewoolkar M.M. Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning // River research and Applications. 2017. Vol. 33. Iss. 8. P. 1354–1367.
- Jugie M., Goba F., Virmoux C., Brunstein D., Tamisiera V., Coeura C. L., Granchera D. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 563. P. 418–434.
- Karmaker T., Dutta S. Modeling seepage erosion and bank retreat in a composite river bank // Journal of Hydrology. 2013. Vol. 476. P. 178–187.
- Kimiaghalam N., Goharrokhi M., Clark S.P., Ahmari H.A. Comprehensive fluvial geomorphology study of riverbank erosion on the Red River in Winnipeg, Manitoba, Canada // Journal of Hydrology. 2015. Vol. 529. P. 1488–1498.
- Lagasse P.F., Zewenbergen L.W., Spitz W.J., Thorne C.R. Methodology for Predicting Channel Migration. Washington, DC: Transportation Research Board. 2004. 214 p.
- Lawler D.M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review // Earth Surface Processes and Landforms. 1993. Vol. 18. Iss. 9. P. 777–821.
- Masoodi A., Noorzad A., Majdzadeh M.R., Samadi T.A. Application of short-range photogrammetry for

monitoring seepage erosion of riverbank by laboratory experiments // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 558. P. 380–391.

Van Dijk W.M., Mastbergen D.R., Van den Ham G.A., Leuven J.R.F.W., Kleinhans M.G. Location and probability of shoal margin collapses in a sandy estuary // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2018. Vol. 43. Iss. 11. P. 2342–2357.

Yu M., Wei H., Wu S. Experimental study on the bank erosion and interaction with near-bank bed evolution due to fluvial hydraulic force // *International Journal of Sediment Research*. 2015. Vol. 30. P. 81–89.

Zong Q., Xia J., Zhou M., Deng S., Zhang Y. Modelling of the retreat process of composite riverbank in the Jingjiang Reach using the improved BSTEM // *Hydrological processes*. 2017. Vol. 31. Iss. 26. P. 4669–4681.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 22-77-00050.

### ОБ АВТОРАХ

Воробьев Алексей Юрьевич, доцент кафедры географии, экологии и туризма, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский го-

сударственный университет имени С.А. Есенина», кандидат географических наук, тел. 89511011707, a.vorobyov90@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7110-4232>.

Кадыров Александр Сергеевич, аспирант, лаборант кафедры географии, экологии и туризма, Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, alieksandr.kadyrov93@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1416-7898>.

Локтеев Дмитрий Сергеевич, студент Заочного факультета, Московский государственный университет геодезии и картографии, lokteev@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0345-0504>.

Бургов Евгений Вадимович, кандидат биологических наук, начальник группы биотехнических систем КК МБИКС-ПТ лаборатории робототехники, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»; инженер, Лаборатория почвенной зоологии и общей энтомологии, Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова Российской академии наук, burgov.ev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3983-5748>.

Балобина Анна Александровна, магистрант Института экологии, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, balobina-anna@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0261-7392>.

## RESULTS OF LOCAL GEODETIC MONITORING OF LATERAL EROSION OF THE OKA RIVER

A.Y. Vorobyov<sup>1</sup>, A.S. Kadyrov<sup>1</sup>, D.S. Lokteev<sup>2</sup>, E.V. Burgov<sup>3,4</sup>, A.A. Balobina<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ryazan State University named for S. Yesenin, Ryazan, Russia;

<sup>2</sup>Moscow State University of Geodesy and Cartography;

<sup>3</sup>National research center "Kurchatov institute", Moscow, Russia;

<sup>4</sup>A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

<sup>5</sup>Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

a.vorobyov90@mail.ru

**Abstract.** The paper presents the results of geomorphological stationary works in the downstream of the Oka River bend near the "Kostino" village, center of the European part of Russia. Field observations of bank erosion rates at this survey site indicate an annual retreat of 1.67 m of the subaerial part of the bank. During two years of monitoring, spring floods completely flooded the stationary. In 2023, the maximum discharge of the Oka River was approximately 4700 m<sup>3</sup>/s and exceeded 2022's value by 62%. We used unmanned aerial vehicles (UAVs) and obtained high-resolution surface rasters and calculated linear, area and three-dimensional erosion rates. The relief response to increased flood energy in the second year of observations was expressed in almost twofold acceleration of bank failure (by 95%). The concave bank sections, composed of sand and sandy loam, have undergone particularly intensive erosion in a number of places, which is confirmed by our monitoring of the channel bed. By surveying by season of the hydrological year, we found that subaerial bank erosion does not stop in summer and autumn, although it only reaches 20% of the full-year volume.

**Keywords:** Oka River, lateral channel erosion, geomorphological stationary, spring flood, morphometry, UAV, digital elevation model (DEM)

## REFERENCES

- AIS GMVO: inform. internet-portal [Electronic data]. Access way: <https://gmvo.skniivh.ru/> (access date: 08.12.2023). (In Russ.)
- Barovskij N.A. Hydrological and morphodynamic analysis of free meandering channels at different stages of development // *Geomorfologija*. 2005. № 4. P. 54–63. (In Russ.)
- Baryshnikov N.B. Problems of morphology, hydrology and hydraulics of floodplains. SPb.: RGGMU. 2012. 426 p. (In Russ.)
- Beljakov A.A., Berkovich K.M. Oka River: problems and prospects of reconstruction // *Jerozionnye i ruslovyje processy*. Vyp. 4. 2005. M.: Izd-vo MGU. P. 251–273. (In Russ.)
- Berkovich K.M. Channel processes on rivers in the sphere of influence of reservoirs. M.: Geogr. f-t MGU. 2012. 163 p. (In Russ.)
- Berkovich K.M. River channels and human activity. M.: PrintKov. 2020. 146 p. (In Russ.)
- Berkovich K.M., Zlotina L.V. Calculation of river channel stability under anthropogenic load // *Geografija i prirodnye resursy*. 2003. № 2. P. 117–123. (In Russ.)
- Catchment erosional-fluvial systems / pod red. R.S. Chalova, V.N. Golosova, A.Ju. Sidorchuka. M.: INFRA-M. 2017. 702 p. (In Russ.)
- Couper P.R., Maddock I.P. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001. Vol. 26. Iss. 6. P. 631–646.
- Deng S., Xia J., Zhou M., Li J., Zhu Y. Coupled modeling of bank retreat processes in the Upper Jingjiang Reach, China // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2018. Vol. 43. Iss. 14. P. 2863–2875.
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Miljukova I.P. On the contribution of climatic and anthropogenic factors to changes in the flow of large rivers of the Russian Plain and Siberia // *Doklady Earth Sciences*. 2019. T. 488. № 5. P. 539–544. (In Russ.)
- Gorbarenko A.V., Varencova N.A., Kireeva M.B. Transformatsiya stoka vesennyi polovod'ja i pavodkov v bassejne verhnaya Volga pod vlianiem klimaticheskikh izmenenienii (in Russian) // *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. 2021. № 4. P. 6–28. (In Russ.)
- Egorov I.E. Exogenous geomorphological processes and methods of their study. Izhevsk, Izd-vo UdGU. 2017. 383 p. (In Russ.)
- Global Surface Water Explorer. [Electronic data]. Access way: <https://global-surface-water.appspot.com/map>. (access date: 03.12.2023).
- Hamshaw S.D., Bryce T., Rizzo D.M., O'Neil-Dunne J., Frolik J., Dewoolkar M.M. Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning // *River research and Applications*. 2017. Vol. 33. Iss. 8. P. 1354–1367.
- Jugie M., Goba F., Vermoux C., Brunstein D., Tamisiera V., Coeura C. L., Granchera D. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 563. P. 418–434.
- Karmaker T., Dutta S. Modeling seepage erosion and bank retreat in a composite river bank // *Journal of Hydrology*. 2013. Vol. 476. P. 178–187.
- Kimiaghalam N., Goharrokhi M., Clark S.P., Ahmari H.A. Comprehensive fluvial geomorphology study of riverbank erosion on the Red River in Winnipeg, Manitoba, Canada // *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 529. P. 1488–1498.
- Komanda jekspertov predstavit koncepciju razvitiya vodnogo turizma v Rjazanskoj oblasti. Izd-vo «Pressa», novosti rajonov Rjazanskoj oblasti. [Electronic data]. Access way: <https://ryazpressa.ru/komanda-ekspertov-predstavit-koncepciju-razvitiya-vodnogo-turizma-v-ryazanskoj-oblasti/> (access date: 03.12.2023). (In Russ.)
- Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. Fundamentals of hydromorphological theory of channel process. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 272 s. (In Russ.)
- Korableva O.V., Chernov A.V. Experience of monitoring of channel deformations on the wide-floodplain rivers (on the example of the Kerzhenets River) // *Geografija i prirodnye resursy*. 2008. № 2. P. 158–165. (In Russ.)
- Korobkin V.I., Peredel'skij L.V. Engineering geology and environmental protection. Rostov-na-Donu: Izd-vo Rostov. un-ta. 2013. 348 p. (In Russ.)
- Krivcov V.A., Pravkin S.A. Valley pediments in the middle reaches of the Oka River // *Geomorfologija*. 2015. № 3. P. 39–47. (In Russ.)
- Lagasse P.F., Zewenbergen L.W., Spitz W.J., Thorne C.R. Methodology for Predicting Channel Migration. Washington, DC: Transportation Research Board. 2004. 214 p.
- Lawler D.M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review // *Earth Sur-*

face Processes and Landforms. 1993. Vol. 18. Iss. 9. P. 777–821.

Lazarenko A.A. Lithology of alluvium of plain rivers of humid zone (on the example of Dnieper, Desna, Oka). Trudy GIN. Vyp. 120. 1964. 236 p. (In Russ.)

Locmanskaja karta reki Oki ot ust'ja (g. Gor'kij) do Shhurovo. Moscow: Mosk.-Okskoe bassejn. Upravl. puti (Publ.). 1956. 75 p. (In Russ.)

Luchnikov A.I., Ljahn Ju.S., Lepihin A.P. Experience in the use of unmanned aerial vehicles to assess the state of the banks of surface water bodies // *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. 2018. № 1. P. 37–46. (In Russ.)

Masoodi A., Noorzad A., Majdzadeh M.R., Samadi T.A. Application of short-range photogrammetry for monitoring seepage erosion of riverbank by laboratory experiments // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 558. P. 380–391.

Oficial'noe opublikovanie pravovyh aktov. Postanovlenija Gubernatora Rjazanskoj oblasti: [Electronic data]. Access way: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/6200202211110011> (access date: 03.12.2023). (In Russ.)

Opublikovan jeskiz mosta-dubljora cherez Oku pod Rjazan'ju. Media-Rjazan', informacionnoe agentstvo: [Electronic data]. Access way: [https://mediaryazan.ru/news/detail/506894.html?sphrase\\_id=4068743](https://mediaryazan.ru/news/detail/506894.html?sphrase_id=4068743) (access date: 03.12.2023). (In Russ.)

Per'kova M.V. Formation of linear-nodal structure of settlement // *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2017. № 2. P. 120–125. (In Russ.)

Rysin I.I., Osipov D.N. Geocological stress of floodplain-channel complexes on the rivers of Udmurtia // *Nauka Udmurtii*. 2021. № 1 (93). P. 43–63. (In Russ.)

Savichev O.G. Hydrology, meteorology and climatology: hydrological calculations. Tomsk, Tomskij politeh. un-t. 2013. 224 p. (In Russ.)

Simonov Ju.G. Methodology of fundamental research. SPb.: Piter. 2005. 427 p. (In Russ.)

Tikunov V.S. Modelling in cartography. M.: Izd-vo MGU. 1997. 405 p. (In Russ.)

Van Dijk W.M., Mastbergen D.R., Van den Ham G.A., Leuven J.R.F.W., Kleinhans M.G. Location and probability of shoal margin collapses in a sandy estuary // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2018. Vol. 43. Iss. 11. P. 2342–2357. (In Engl.)

Vorob'ev A.Ju., Kadyrov A.S. Field studies of the Oka river bank erosion in 2014–2018 by the erosional pins method // *Geograficheskij vestnik*. 2020. № 3 (54). P. 30–45. (In Russ.)

Vorob'ev A.Ju., Krivcov V.A., Kadyrov A.S. Current dynamics of accumulation and composition of alluvium in the near-channel floodplain of the Oka river (Russia) // *Uch. zap. Kazan. un-ta. Ser. estestv. nauki*. 2021. T. 163, kn. 4. P. 603–625. (In Russ.)

Vorob'ev A.Ju., Puzakov S.V. The dynamics of side erosion of the concave banks of the Oka river in its middle course in the 19th – 20th centuries and nowadays // *Vest. Rjazan. gos. un-ta im. S.A. Esenina*. 2017. № 3 (56). P. 152–161. (In Russ.)

Vukolov Je.A. Fundamentals of statistical analysis. Workshop on statistical methods and operations research using STATISTICA and EXCEL packages. M.: FORUM. 2008. 464 p. (In Russ.)

Yu M., Wei H., Wu S. Experimental study on the bank erosion and interaction with near-bank bed evolution due to fluvial hydraulic force // *International Journal of Sediment Research*. 2015. Vol. 30. P. 81–89.

Zamyshljaev V.I. Hydrodynamic models of stability and planned reformation of river channels and ways of their development // *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij*. 2010. T. 2. P. 94–100. (In Russ.)

Zavadskij A.S., Lobanov G.V., Petuhova L.N., Serbrennikova I.A., Smirnova E.A., Chernov A.V. Results of stationary studies of channel processes in the rivers of the ETR // *Jerozionnye i ruslovyje processy*. M.: Izd-vo MGU. 2010. P. 220–251. (In Russ.)

Zong Q., Xia J., Zhou M., Deng S., Zhang Y. Modelling of the retreat process of composite riverbank in the Jingjiang Reach using the improved BSTEM // *Hydrological processes*. 2017. Vol. 31. Iss. 26. P. 4669–4681.

## ACKNOWLEDGMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, Project no. 22-77-00050.

## ABOUT THE AUTHORS

Aleksei Y. Vorobyov, Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Geography, Ecology, and Tourism, Ryazan State University named for S. Yesenin, [a.vorobyov90@mail.ru](mailto:a.vorobyov90@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7110-4232>.

Aleksandr S. Kadyrov, post-graduate student, assistant, Department of Geography, Ecology, and Tourism, Ryazan State University named for S. Yesenin, [aliekssandr.kadyrov93@yandex.ru](mailto:aliekssandr.kadyrov93@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1416-7898>.

Dmitrii S. Lokteev, student, Extramural faculty, Moscow State University of Geodesy and Cartography, [lokteev@gmail.com](mailto:lokteev@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0345-0504>.

Evgenii V. Burgov, Cand. Sci. (Biology), Head of the Biotechnical Systems Group of the Robotics Laboratory, National research center “Kurchatov insti-

tute”; engineer, Laboratory of soil zoology and general entomology, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, burgov.ev@yandex.ru, ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-3983-5748>.

Anna A. Balobina, Master student, Institute of Environmental Engineering, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, balobina-anna@rambler.ru, ORCID:

<https://orcid.org/0009-0001-0261-7392>.