

Мониторинг эрозионных процессов на береговых откосах реки Оки в летне-осенний период

А. Ю. Воробьев¹✉, Д. С. Локтеев², Е. В. Бургов^{3,4},
А. С. Кадыров¹, И. П. Артюхов^{5,6}, К. Е. Эм^{5,6}, А. А. Балобина⁷

¹Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина, Российская Федерация
(390000, г. Рязань, ул. Свободы, 46)

²Московский государственный университет геодезии и картографии, Российская Федерация
(105064, г. Москва, Гороховский пер., 4)

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Российская Федерация
(123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1)

⁴Институт проблем экологии и эволюции имени А. Н. Северцова
Российской академии наук, Российская Федерация
(119071, г. Москва, Ленинский проспект, 33)

⁵ООО «Межерский научно-технический центр», Российская Федерация
(390013, г. Рязань, ул. Типанова, 7)

⁶Рязанский государственный агротехнологический университет
имени П. А. Костычева, Российская Федерация
(390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1)

⁷Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Российская Федерация
(117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)

Аннотация. Цель – определение скорости и объемов эрозии толщ почвогрунтов на берегах реки Оки посредством аэрофотосъемки и выявление предпосылок локальной мобилизации береговых отложений.

Материалы и методы. В маловодную фазу водного режима реки Оки была предпринята аэрофотосъемка рельефа полустационаров на крутых берегах ее русла. Она сопровождалась отбором проб почвогрунтов для определения их гранулометрического состава и весовой влажности. Составленные цифровые модели рельефа (ЦМР) позволили зафиксировать проявления эрозии берегов окской поймы и выявить связи интенсивности морфологической динамики и свойств почвогрунтов с их пространственной позицией на откосах.

Результаты и обсуждение. Установлено, что скорости эрозионного процесса распределены относительно равномерно по плоскости склонов, несоответствия между эрозией грунтов различного механического состава статистически недостоверны. Корреляционные зависимости скорости эрозии от свойств отложений и их гипсометрического положения показали наличие слабых связей. Рельефообразование было обусловлено различными по механизму возникновения, но подобными по интенсивности процессами. Предполагается, что осенний паводок произвел заметную эрозию нижних частей откосов при достижении полной их влагоемкости. В сухое лето 2022 года ведущую геодинамическую роль играло осыпание, морфологически выраженное в виде шлейфов на итоговых ЦМР.

Заключение. Применение геодезических методов контроля эрозии на уступах русла реки Оки позволило зарегистрировать и количественно проанализировать ее проявления даже в масштабе микро- и нанорельефа. Оптимальная периодизация мониторинга состояния берегов требует дополнения аэрофотосканирования, проведенного в межсезонья гидрологического года, дополнительными съемками на границе его сезонов.

Ключевые слова: река Ока, боковая эрозия русла, летне-осенняя межень, БПЛА, полустационар геоморфологический, гранулометрический анализ, влажность грунтов.

Источник финансирования: Исследование проведено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-77-00050, <https://rscf.ru/project/22-77-00050/>.

Для цитирования: Воробьев А. Ю., Локтеев Д. С., Бургов Е. В., Кадыров А. С., Артюхов И. П., Эм К. Е., Балобина А. А. Мониторинг эрозионных процессов на береговых откосах реки Оки в летне-осенний период // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2024, № 4, с. 4-14. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/4/4-14>



ВВЕДЕНИЕ

Боковая эрозия речных русел входит в число гидролого-геоморфологических процессов, имеющих существенное значение для хозяйства регионов России. Отступление берегов рек нарушает [4, 6, 7] связность территории, вызывает [9, 10, 12] потери земельных угодий, вынуждает [4, 11, 14] согласовывать размещение селитебной и рекреационной инфраструктуры с ареалами геоморфологической опасности разной степени. Исследования русловых деформаций позволяют [2, 13] контролировать их скорость, а также выявлять [5, 15] экзогенные факторы и вещественно-структурные особенности рельефа, определяющие динамику разрушения береговых откосов.

Берега реки Оки, бассейн которой занимает центральное положение на Русской равнине (рис. 1), отличаются [2, 3] высокой рекреационной и хозяйственной нагрузкой, разнообразными формами проявления русловой морфодинамики, конформной рельефу фациальной архитектурой, представляя собой ценный объект для геоморфологического мониторинга. Ранее нами

были предприняты [3] определение скорости отступления пойменной бровки с помощью эрозионных штифтов. Осуществленные исследования выявили неоднородность скоростей эрозии на фронтах размыва излучин Оки, определяемую, главным образом, позициями учетных площадок относительно морфологических частей меандров.

Ведущая роль в рельефообразовании берегов равнинных водотоков, как правило, принадлежит [2, 13, 15], размыву их склонов, который на реках восточно-европейского типа осуществляется во время весеннего половодья. В то же время, эрозия в подобных условиях нередко наблюдается [7, 11] и в аэральной обстановке за период маловодья в теплое время года. При большом количестве публикаций, рассматривающих деформации пойменных уступов после прохождения руслоформирующих расходов, практически не встречаются работы, посвященные летне-осеннему рельефообразованию на фронтах размыва речных излучин. Отмеченная проблема в полной мере проявляется в не систематизированных представлениях о короткопери-

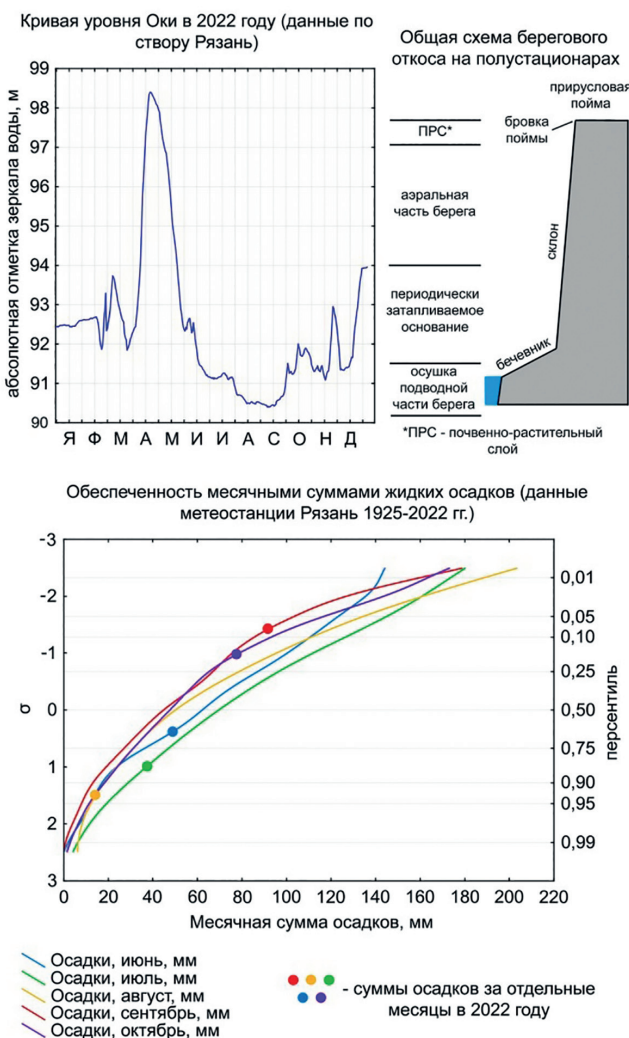
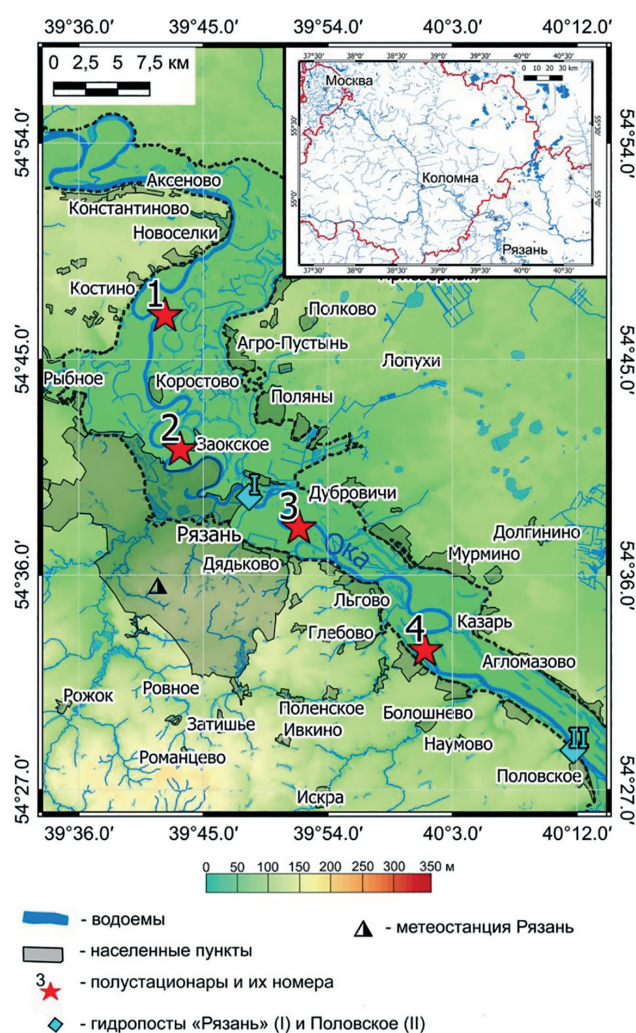


Рис. 1. Район исследования и гидрометеорологические условия в период мониторинга
[Fig. 1. Study area and hydrometeorological conditions during the monitoring period]

одной динамике рельефа окских берегов, в частности, в пределах Рязанской области.

Фиксация последствий боковой эрозии в последнее десятилетие на многих водотоках в последние годы часто производится [9, 14] с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). На протяжении теплого сезона 2022 года (июнь – октябрь) нами осуществлялась аэрофотосъемка рельефа четырех полустационаров на эрозионных берегах русла Оки с целью получения цифровых моделей рельефа (ЦМР). Еще на этапе рекогносцировки местности при обследовании выбранных участков поймы было выявлено неоднородное их стратиграфическое строение. Известно, что толщи отложений поймы средней Оки не всегда [3, 8] имеют аллювиальный генезис. Представляется, что полигенетичность рельефа должна обеспечивать и неодинаковую устойчивость русловых склонов. Ее оценка с помощью аэрофотосканирования сводит к минимуму потери пространственной информации и служит целям совершенствования общих подходов [2] к прогнозу боковой эрозии русла Оки, основывающихся на литологии его дна и берегов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Главной задачей исследования была аэрофотосъемка окских берегов на полустационарах, имеющих общую протяженность 1,4 км по руслу реки. Все ключевые участки расположены (рис. 1) на нижних крыльях излучин Оки, поскольку активная боковая эрозия обычно тяготеет [11, 12, 16] именно к этим морфодинамическим позициям в силу особенностей гидравлики извилистого потока. Общая площадь учетных площадок составляла 24,6 га. Из всех полустационаров наибольший пространственный охват имеет площадка «Кораблино» (8,2 га, 500 м по руслу Оки), а наименьший – «Заокское» (3,6 га и 200 м соответственно).

В трансупераквальных условиях пойменных ландшафтов важен учет времени начала и окончания фаз гидрографа реки, от которых зависит экспонированная площадь подмываемых берегов. Надводная их часть в летне-осеннюю межень увеличивается, что на участках мониторинга согласуется с падением уреза реки до абсолютных отметок 90,2–92,4 м. Первая съемка (рис. 2) пойменных уступов произведена в начале маловодной фазы водного режима Оки, в середине июня. На протяжении четырех месяцев уровень водоема оставался низким, лишь в первой половине октября приход атлантических циклонов спровоцировал невысокий паводок. К концу периода мониторинга водность реки снова понизилась почти до летних значений, рельеф учетных площадок фиксировался камерой БПЛА в последних числах октября.

Нами использовался «дрон» DJI Mavic 2, с собственным GNSS-приемником, интегрированным в архитектуру квадрокоптера. Разрешение фотоснимков, полученных камерой с CMOS-матрицей 4/3, фиксированное – 4000×2500 пикселей. Координаты опорных знаков определялись вторым GNSS-приемником EFT M4 GNSS и использовались для уточнения положе-

ния подстилающей поверхности. В программе Agisoft Metashape создан набор ортофотопланов учетных площадок с высокой полнотой пространственной информации (до 30 млн. точек на площадку). Формирование моделей на основе облаков точек осуществлено в AutoCAD (модуль Civil 3D). Заведомо ошибочные точки были выбракованы автоматически, но, в целом, переход от цифровой модели местности к ЦМР проводился в полуавтоматическом режиме. При расчетах объемов «земляных работ» территория полустационаров фрагментировалась на отрезки (сектора) длиной 50 м по руслу Оки. Разрешение итоговых ЦМР составило 1,3 см, что достаточно для распознавания факторной приуроченности рельефообразования, даже на уровне наноразмеров периодически обновляющегося рельефа (например, малые осыпные конусы, рябь течения, норы землероев).

Масштаб деформаций берегов определен при наложении двух временных срезов состояния рельефа (июнь и октябрь). Расстояния, на которые отступил берег, определялись дискретно (параметр U_0) на каждой паре ЦМР. Опора на точечные изменения рельефа оправдана надежностью [7, 11, 12, 13] экстраполяции дискретных значений за пределы полустационаров и выбранным функциональным периодом развития пойменной морфолитосистемы. Если во время половодья взаимодействие руслового потока и берега происходит геометрически непрерывно, то в летне-осеннюю межень большее значение приобретают локальные (позиционные) предпосылки для мобилизации грунтов – морфологические, литогенные, антропогенные, биогенные.

В натурных условиях определены границы аллювиальных фаций осадков и отложений иного генезиса. Произведя в AutoCAD расчеты потерь земель для каждого 50-метрового отрезка и по полустационарам в целом, мы установили, каким образом стратиграфия рельефа влияет на податливость его к эрозии и за счет каких преобладающих агентов рельефообразования (рис. 3) происходит потеря земельных угодий. Среди фаций по объему, занимаемому в сложных геологических телах учетных площадок, абсолютно преобладает пойменная фация аллювия – результат голоценовой [1, 16] эрозии бассейна верхней и средней Оки. Однако площадки «Заокское», «Дядьково» и «Кораблино» специально заложены на границе комплексов рельефа разного генезиса (рис. 2). Наложенная пойма [8], слагаемая пойменной фацией аллювия (aIVp), залегающей на ледниковых отложениях (gII_{dn}), обнаруживается в границах секторов № 13–15, № 19–23. На остальных секторах преобладает рутинное для днища долины средней Оки соотношение фаций: осадки aIVp залегают на пойменно-русловых отложениях смешанного генезиса (aIVpr) и содержат линзы старичных осадков (aIVs).

Литологические предпосылки к разрушению склонов учтены при позиционировании профилей отбора проб почвогрунтов, соответствующих характерным комплексам фаций осадков. В зависимости от протя-

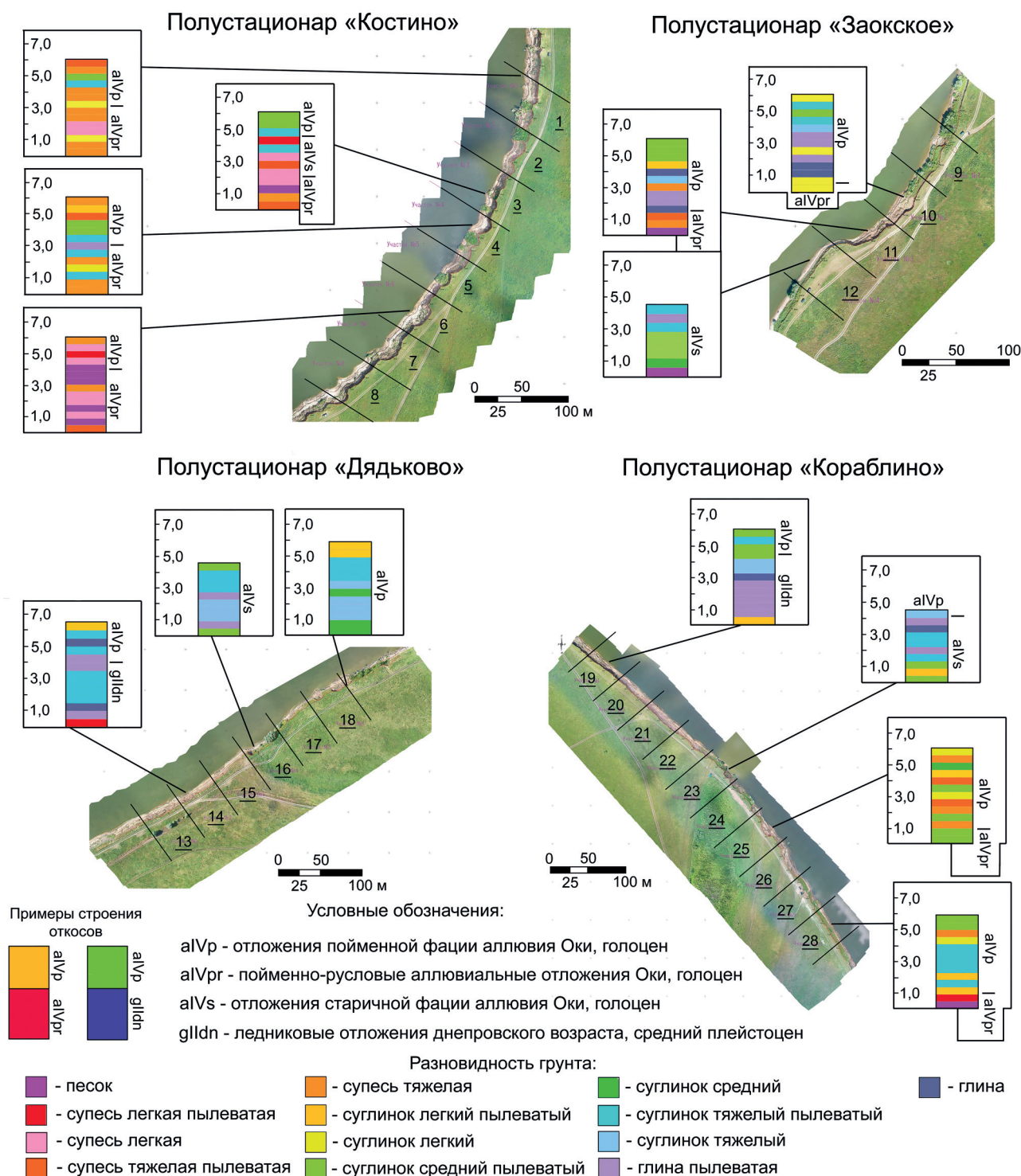


Рис. 2. Рельеф полустационаров на ортофотопланах, его фрагментация на сектора и механический состав
 [Fig. 2. Relief of semi-stationaries on orthophotomaps, its fragmentation into sectors and mechanical composition of soils]

женности полустационара, закладывалось 4-5 профилей мониторинга (рис. 2), на которых с шагом 0,5 м по вертикали определены значения U_6 и физические свойства грунтов. На всех профилях измерялась высота надводной части берега (h) и коэффициент берегового откоса (m), зависящий [5] от уклона. Также оценивалась трещиноватость [7, 9] массивов пород (I/A), по соотношению длины магистральных трещин и рас-

стояния между ними. Среди традиционных методов геолого-геоморфологического мониторинга динамики неустойчивых склонов нами использовались площадки-ловушки с габаритами 1x2 м из полиэтиленовой пленки. Восемь ловушек еще в мае 2022 года были закреплены (рис. 3) в пределах субгоризонтальных площадок на откосах. Скорость отступления отвесных откосов систематически фиксировалась с помощью

погруженных в почвогрунты деформационных марок (грунтовых реперов).

Устойчивость крутых берегов рек зависит также от их литологии и режима грунтовых вод [5, 6, 12]. Такие параметры, как W (влажность) и D_{50} (средний размер зерен), нашли [2, 11] широкое применение в практике прогнозирования разрушения береговых откосов. Ежемесячный контроль влажности грунтовых массивов на полустационарах осуществлялся точечным методом, пробы отбирались на профилях мониторинга скорости эрозии. Естественная влажность с усреднением за весь период мониторинга (W_{med}), средний и максимальный коэффициент водонасыщения пород (Sr_{med} и Sr_{max}), определены для 231 пробы грунта, также как и их гранулометрический состав. Сочетание 23-х фракционного ситового и пипеточного метода для каждой пробы позволило провести классификацию [5] грунтов по В.В. Охотину (рис. 2). Оценка связи структурно-морфологических (h , m , I/A), гранулометрических (D_{50} , тип грунта) и водно-физических (W_{med} , Sr_{med} , Sr_{max}) факторов на скорость эрозии осуществлена посредством корреляционного анализа в Statistica 10.0 (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический анализ почвогрунтов позволил выделить 14 проб песков, 50 проб супесей, также 114 проб определены как суглинки, а 48 – как глины. Пылевато-глинистый состав рельефа характерен для полустационаров «Дядьково» и «Кораблино», где суглинки и глины выполняют массивы $gIIdn$ и линзы $aIVs$ в межгрядных понижениях. Осадки $aIVp$ практически повсеместно представлены суглинками, реже супесями. Легкий гранулометрический состав характерен для отложений полустационара «Костино», в пределах которого до 50-70% высоты уступов молодой поймы сложены $aIVp$. Здесь в естественных обнажениях часто наблюдается пологонаклонная слоистость субфации погребенных прирусловых валов (рис. 3), состав и условия залегания которой в пойме средней Оки описаны [8] еще 50-70 лет назад.

По интенсивности увлажнения теплый сезон 2022 года четко разделялся на сухое лето и экстремально дождливую осень (рис. 1). Естественная влажность почвогрунтов за июнь-октябрь, в среднем, колебалась от 11 % до 19 %, с минимумом в августе – начале сентября и максимумами в начале июня и в октябре. В начале июня, после прохождения половодья, фиксировалась наивысшая степень влагонасыщения почвогрунтов (средний $Sr = 0,67$), но к августу верхние стратиграфо-генетические горизонты в значительной степени потеряли влагу практически до уровня [14] гигроскопической влажности ($W = 3-8$ %). Пачки морены и старичные отложения отличались повышенным значением данного показателя в течение всего периода мониторинга. Июньские, июльские и октябрьские значения Sr для $gIIdn$ иногда превышали единицу, что объясняется возможным присутствием разбухающих минералов в лесостепных [1] голоценовых палеопочвах.

В начале сезона мониторинга рельеф полустационаров уже был осложнен разнообразными по морфологии последствиями от прошедшего склоноформирующего половодья. Поперечный профиль склона чаще всего состоит из двух элементарных участков: практически отвесного ($m = 0,0-0,5$) уклона до глубины 1,0-3,0 м от поверхности поймы и относительного пологого ($m = 2,0-5,0$), простирающегося далее до уреза Оки. Склоны с подобной морфологией встречаются на 79 % длины наблюдаемых фронтов размыва. Остальные фрагменты берегов представлены простыми откосами (15 %) с $m = 0,7-1,6$ и склонами из трех-четырех уклонов (6 %).

Наиболее часто встречающейся дискретной разновидностью склоновой эрозии были земляные обвалы (рис. 3). Подрезание основания склона русловым потоком и уменьшение удерживающих сил при промачивании откоса вызывало в мае крупные обрушения и образование выемок. Местами берег весной отступил на 5-8 м и в начале июня на бечевниках отмечались массовые скопления блоков почвенно-растительного слоя ПРС, в том числе, крупных (с длиной $>1,0$ м хотя бы по одной из осей). Детальный анализ полученных нами ЦМР свидетельствует, что к 453 обнаруженным в июне мелким блокам ПРС до ноября 2022 года добавилось еще 22. Для крупных литонов это соотношение достигает 30/0.

Пораженность откосов обвалами в летне-осенний период достигает всего 0,1 %. Общий объем блоков, обрушившихся из прибровочных фрагментов откосов к началу июня, составил 126 м³, а за июнь-октябрь – 4,5 м³. По механизму формирования все обвалы ПРС можно отнести [6, 13] к обвалам отседания. Еще с весны многие крупные блоки $aIVp$ были отделены (рис. 3) от основного массива пород глубокими трещинами, образовавшимися после препарирования геологического тела водными массами и снятия внутренних напряжений в прибровочных грунтах. Из-за истощения запасов влаги в ПРС и подстилающих его отложениях большинство блоков сохранило свое положение, не имея достаточно свободной энергии для мобилизации в теплое время года.

Осыпание поражает 68 % площади склонов, все осыпи приурочены к крутым отвесным склонам. Абсолютно преобладают осыпи типа шлейфа подножья [6]. Средний уклон поверхности осыпей составляет 30-40°, при накоплении обломков на бутристом микрорельефе простых откосов (рис. 3) уклоны возрастают до 45-50°. Обломочный материал представлен как элементами вторичной структуры почвенных тел, так и отдельными частицами песка. Ореховатые, зернистые и комковатые педы экспортируются из горизонтов дневной аллювиальной почвы, а также из серой лесной и темноцветной палеопочв. Общий объем материала, перемещенного путем осыпания, на всех учетных площадках оценивается в 2228 м³. При наложении двух ЦМР установлена наибольшая активность осыпных склонов на секторах №4, №6-8, №20-22 и №25-26. Усредненная месячная денудация уступов при осыпании на погонный метр берега может достигать в этих позициях 0,75 м³/м, чаще 0,1-0,2 м³/м.

Ловушка из пленки под осыпью у основания aIVp



Частично обнажившийся из толщи ПРС грунтовой репер и осыпь под ним



Пологонаклонная слоистость грунтов aIVpr, «Костино»



Земляной обвал ПРС на aIVp



Изолированные трещинами крупные блоки aIVp осенью 2022 года



Непрерывное осыпание на фронте размыва, «Кораблино»



Норы Riparia riparia и осыпь под ними



Массовое скопление мелких блоков на июньской ЦМР, «Костино»



Отседание насыщенных влагой грунтов старичной линзы в октябре



Рис. 3. Геодинамические процессы на склонах русла реки Оки
[Fig. 3. Geodynamic processes on the slopes of the Oka River channel]

Аналогичные данные были получены при определении скорости аккумуляции на ловушках из пленки, средняя месячная скорость накопления грунта составила 0,09 м/месяц. Крутые откосы aIVp, как свидетельствуют регулярные замеры обнажившейся части грунтовых реперов, отступают со скоростью 0,03-0,1 м/месяц (рис. 5). Выпадение дождей, вопреки результатам подобных исследований [6], практически не повлияло на скорость эрозии. Показательно, что при преобладании антициклональной погоды (77 % летних дней) выдувание материала осыпей и дальнейший его переноса вниз по бечевнику наблюдались редко.

Норы ласточек-береговушек (*Riparia riparia*) встречаются в виде групп зоогенного нанорельефа на откосах с $m = 0,0-0,2$, пораженность берегов ими достигает 2,0 %. Особенно активное разрушение берега Оки птицами отмечается на полустационаре «Костино»,

поскольку породы с легким гранулометрическим составом без крупных обломков предпочитают [13] ласточками для заложения нор. Приоритетными являются (рис. 3) осадки aIVpr в ядрах пойменных грив. Биогенный морфолитогенез провоцирует склоновый: под жилищами *Riparia riparia* всегда обнаруживаются осыпи, иногда это осыпи-конусы. Расчет объема таких форм и измерения с помощью ловушек из пленки свидетельствуют, что за три летних месяца под комплексами из 45-80 нор аккумулируется до 0,7 м³ пород на 1 м². Общий объем подобных отложений на всех полустационарах за период мониторинга составил 130 м³ (4,5 % от общего объема эрозии), причем 85 % из них перемещено в границах площадки «Костино» (рис. 5).

За период июнь-октябрь на четырех учетных площадках отдыхающими было заложено 19 новых спусков к воде. Вклад антропогенного морфолитогенеза в

эрозию откосов оценивается в 2 % при низкой (0,8 %) пораженности их проективного покрытия данным процессом. Рекреанты вносят свой вклад и в моделировку оснований склонов, однако по причине прохождения октябрьского паводка, подтопившего основания уступов, количественный учет отдельных факторов рельефообразования на этом гипсометрическом уровне становится невозможен.

Средняя скорость боковой эрозии на полустационарах составляет 0,29 м/сезон. Статистически достоверных различий по общему тесту Фишера и тесту Краскелла-Уоллиса между значениями U_6 , позиционированными по точкам отбора проб с неодинаковым гранулометрическим составом (рис. 4) не обнаружено.

Ни один из параметров рельефа учетных площадок не распределен по нормальному закону, то же самое верно в отношении скорости отступления берегов. Ранговый коэффициент корреляции Спирмена (ρ) слабо положителен между U_6 и W_{med} , Sr_{med} , Sr_{max} и m , отрицателен – между U_6 и I/A , h .

Влажный осенний сезон обеспечил промачивание поверхности берегов осадками, а также подъем уровня грунтовых и капиллярных вод в прирусловой пойме. Все эти процессы, действуя совместно, привели к заметному увеличению степени насыщения грунтов влагой. На полустационарах «Заокское», «Дядьково» и «Кораблино» ослабление водно-коллоидных связей в массивах аIVs и gII_{dn} и взвешивание грунтов при подтоплении привело к

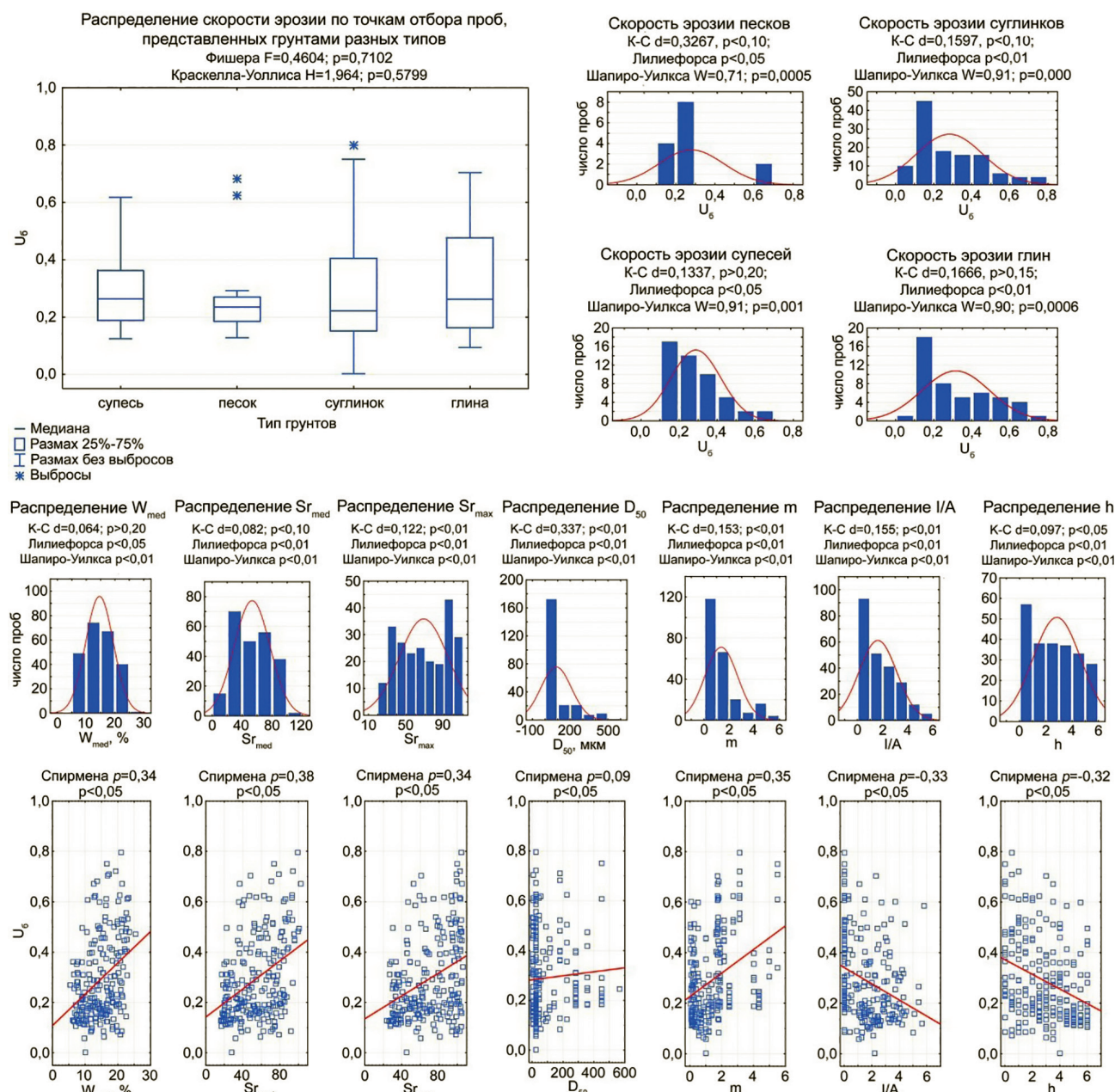


Рис. 4. Корреляционный и дисперсионный анализы распределения скорости эрозии на склонах русла реки Оки
[Fig. 4. Correlation and variance analyses of erosion rate distribution on the slopes of the Oka River channel]

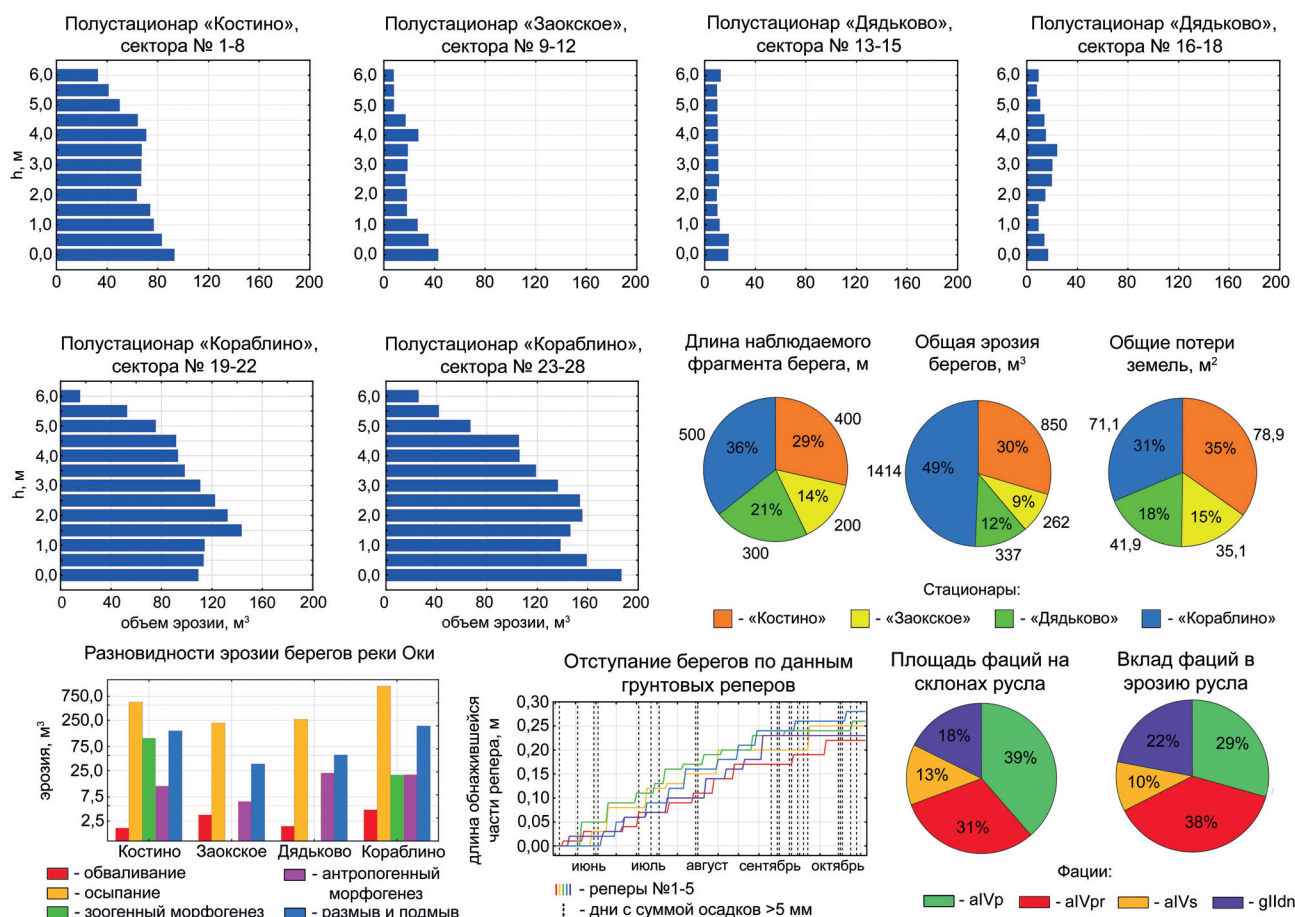


Рис. 5. Экспорт отложений из стратиграфо-генетических горизонтов и сопутствующие потери земель
[Fig. 5. Deposition export from stratigraphic horizons of soils and associated land loss]

отседанию блоков пород. По своей призматической форме они сильно отличаются (рис. 3) от блоков ПРС, что облегчает учет их количества. Объем пылевато-глинистых литонов этого типа на всех участках мониторинга составляет порядка 6,7 м³. Считая их результатами блокового смещения грунтовой массы, можно заключить, что склоновые, зоогенные и антропогенные процессы обеспечивают порядка 85 % объема перемещенных почвогрунтов. Остальной обломочный материал к октябрю был удален с поверхности откосов водными массами осенней паводковой волны и смыт ливневыми осадками.

Несмотря на естественность ежегодного обновления поверхности берегов Оки и эфемерность продуктов эрозии, мониторинг рельефообразования в теплое время года сохраняет прикладное значение. Средняя скорость опасного [4, 9, 10] геоморфологического процесса – отступления пойменной бровки на стационарах составляла 0,23 м/сезон. Сопровождаемые им потери земельных угодий составили 227 м², а объем переработки берега на погонный метр – 2,04 м³/м. Утрата 1 м² приречной поймы осуществляется благодаря экспорту 12,5 м³ почвогрунтов из береговых откосов. Различия между ключевыми участками исследования в потерях территории на единицу длины (0,13-0,19 м²/м) находятся в пределах погрешности традиционных мето-

дов [6, 7, 11] геоморфологического мониторинга.

Динамика уменьшения площади полустационаров пропорциональна их длине (рис. 5), но по объему эрозии соотношение нарушается из-за возросшего до 49 % вклада участка «Кораблино». Отседание блоков gIIIdn, aIVs и осыпание толщи aIVp в нижней части откоса происходит здесь независимо от типа поймы (рис. 5), на уровне ПРС скорость отступления склона резко снижается, оставаясь сопоставимой с другими ключевыми участками. Среди фаций осадков самой геодинамической нестабильной является aIVpr, объем эрозии которой на 9 % больше, чем можно было бы ожидать с учетом занимаемой ею площади на склоновых обнажениях. Превышение данного порога характерно и для грунтов gIIIdn, хотя в обоих случаях эрозия берегов, преимущественно, реализуется за счет различных механизмов разрушения склонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ведущим геодинамическим процессом, действовавшим на вогнутых берегах излучин реки Оки в июне-октябре 2022 года, по объему перемещенного материала и площади распространения следует признать осыпание. Распространение осыпей-шлейфов фиксировалось на 68 % площади русловых откосов и обеспечило около 78 % вклада в эрозию берегов. В ряде мест осыпание

было инспирировано деятельностью роющих птиц либо сопровождалось обваливанием и заложением антропогенных форм рельефа. Все эти побочные факторы морфолитогенеза отличались точечными проявлениями, их совокупный вклад в общую эрозию не превышает 7 %. Вследствие сильного иссушения верхних стратиграфо-генетических горизонтов берегов в течение большей части теплого сезона земляные обвалы были редкими. Смыв почвогрунтов дождями и прохождение осеннего паводка обеспечили остальную часть эрозии. Однако, в целом, берега сохранили устойчивость и крупных обрушений их фрагментов, подобных весенним, зарегистрировано не было. При низких абсолютных значениях скорости рельефообразования в теплый период года (до 0,9 м/сезон), установлено ее возрастание в направлении от пойменной бровки до бечевников.

В среднем, продолжение развития береговых откосов после их заложения во время весеннего половодья приводит к потерям 0,16 м² пойменной территории на погонный метр берега за теплый период года. Интенсивность смещения плоскости откосов не зависит от механического состава выполняющих их отложений, установлена лишь ее связь с преобладающими агентами рельефообразования. Распределение последних по степени значимости оказалось возможным благодаря высокой эффективности использования БПЛА в мониторинге боковой эрозии русла Оки, что в будущем может предоставить ценные данные для оценок скорости эрозии аллювиальных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Природно-антропогенные изменения почв и среды в пойме Москвы-реки в голоцене: педогенные, пылецевые и антракологические маркеры / А.Л. Александровский, В.Г. Ершова, Е.В. Пономаренко и др. // *Почвоведение*, 2018, № 6, с. 659-673.
2. Беркович К.М., Злотина Л.В., Турыкин Л.А. Размыв речных берегов: факторы, механизм, деятельность человека // *Геоморфология*, 2019, № 2, с. 3-17.
3. 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.
4. Геоморфология городских территорий: конструктивные идеи / отв. ред. Лихачева Э.А. Москва: МЕДИА-ПРЕСС, 2017. 175 с.
5. Далматов Б.И. *Механика грунтов, основания и фундаменты*. Ленинград: Стройиздат, 1988. 415 с.
6. Егоров И.Е. *Экзогенные геоморфологические процессы и методы их изучения*. Ижевск: Издательство Удмуртского университета, 2017. 383 с.
7. 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.
8. Лазаренко А.А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны, Оки) // *Труды ГИН*, 1964, вып. 120, 237 с.
9. 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.
10. *Почвы долин рек Оки и Угры и их продуктивность: монография* / Н.А. Муромцев, Ю.А. Мажайский, Н.А. Семенов и др. Рязань: РГАТУ им. Профессора П.А. Костычева, 2011. 203 с.
11. *Эрозионно-русловые системы* / под ред. Р.С. Чалова, В.Н. Голосова, А.Ю. Сидорчука. Москва: ИНФРА-М, 2017. 702 с.
12. Effect of clay fraction on turbulence characteristics of flow near an eroded bank / K. Barman, S. Roy, V.K. Das, K. Debnath // *Journal of Hydrology*, vol. 571, 2019, pp. 87-102.
13. Charlton R. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London: Routledge, 2008. 234 p.
14. Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning / S.D. Hamshaw, T. Bryce, D.M. Rizzo et al. // *River research and Applications*, 2017, vol. 33, iss. 8, pp. 1354-1367.
15. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins / M. Jugie, F. Goba, C. Virmoux et al. // *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 563, pp. 418-434.
16. Panin A., Matlakhova E. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications // *CATENA*, 2015, vol. 130, pp. 46-61.

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

Поступила в редакцию: 14.10.2023

Принята к публикации: 02.12.2024

Monitoring of Erosion Processes on the Bank Slopes of the Oka River in Summer-Autumn Period

A. Y. Vorobyov¹✉, D. S. Lokteev², E. V. Burgov^{3,4},
A. S. Kadyrov¹, I. P. Artyukhov^{5,6}, K. E. Em^{5,6}, A. A. Balobina⁷

¹Ryazan State University named after S. A. Yesenin, Russian Federation
(46, Svobody str., Ryazan, 390000)

²Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russian Federation
(4, Gorokhovskiy per., Moscow, 105064)

³National Research Centre «Kurchatov Institute», Russian Federation
(1, Academician Kurchatov sq., Moscow, 123182)

⁴Institute of Ecology and Evolution named after A. N. Severtsov
of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation
(33, Leninsky ave, Moscow, 119071)

⁵LLC «Meshchersky Scientific and Technical Center», Russian Federation
(7, Tipanov str., Ryazan, 390013)

⁶Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev, Russian Federation
(1, Kostychev str., Ryazan, 390044)

⁷Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Russian Federation
(6, Miklukho-Maklay str., Moscow, 117198)

Abstract. The purpose is to determine the rate and volumes of erosion of soil strata on the banks of the Oka River by means of aerial photography and to identify prerequisites for local mobilisation of bank sediments.

Materials and methods. We undertook an aerial survey of the steep banks of the Oka River during the low-water phase of the water regime. This was accompanied by soil sampling to determine particle size distribution and weight moisture content. We compiled digital elevation models (DEMs), which made it possible to record manifestations of erosion. Interrelations between the intensity of relief-forming and soil properties and their spatial position on slopes were also identified.

Results and discussion. It was found that the rates of erosion process are distributed relatively evenly along the slopes, the discrepancies between the erosion of soils of different mechanical composition are statistically unreliable. Correlations between erosion rate and sediment properties and their hypsometric position showed weak relationships. Relief-forming was caused by different in mechanism of occurrence, but similar in intensity processes. It is assumed that the fall flood produced a noticeable erosion of the lower parts of the slopes when their full moisture content was reached. In dry summer 2022, the leading geodynamic role was played by crumbling, morphologically expressed in the form of plumes on the final DEMs.

Conclusion. Application of geodetic methods of erosion control on the Oka River channel ledges allowed us to register and quantitatively analyze even small erosion effects. Optimal periodization of cutbank condition monitoring requires supplementing aerial photo-scanning conducted in the off-season of the hydrological year with additional surveys at the boundary of its seasons.

Key words: Oka River, lateral channel erosion, summer-autumn low water, UAV, semi-stationary geomorphological, granulometric analysis, soil moisture.

Funding: The study was funded by the Russian Science Foundation Grant No. 22-77-00050, <https://rscf.ru/project/22-77-00050/>.

For citation: Vorobyov A. Y., Lokteev D. S., Burgov E. V., Kadyrov A. S., Artyukhov I. P., Em K. E., Balobina A. A. Monitoring of Erosion Processes on the Bank Slopes of the Oka River in Summer-Autumn Period. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografya. Geoekologiya*, 2024, no. 4, p. 4-14 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/4/4-14>

REFERENCES

1. Prirodno-antropogennyye izmeneniya pochv i sredy v pojme Moskvyy-reki v golocene: pedogennyye, pyl'cevye i antrakologicheskie markery [Natural-anthropogenic changes of soils and environment in the Moscow River floodplain in the Holocene: pedogenic,

pollen and anthracological markers] / A. L. Aleksandrovskij, V. G. Ershova, E. V. Ponomarenko i dr. *Pochvovedenie*, 2018, v. 6, pp. 659-673. (In Russ.)

2. Berkovich K. M., Zlotina L. V., Turykin L. A. Razmyk rechnyh beregov: faktory, mekhanizm, dejatel'nost' cheloveka



[Riverbank scour: factors, mechanism, human activities]. *Geomorfologiya*. 2019, v. 2, pp. 3-17. (In Russ.)

3. Vorobyov A. Yu., Kadyrov A. S. Polevye issledovaniya otstupaniya beregov rusla r. Oki v 2014-2018 gg. s pomosh'ju metoda prostykh reperov [Field studies of bank retreat of the Oka River channel in 2014-2018 using the method of erosional pins]. *Geograficheskij vestnik*, 2020, v. 3, ch. 54, pp. 30-45. (In Russ.)

4. *Geomorfologiya gorodskih territorij: konstruktivnye idei* [Geomorphology of urban areas: constructive ideas] / otv. red. Li-hacheva Je. A. Moscow: MEDIA-PRESS, 2017. 175 p. (In Russ.)

5. Dalmatov B. I. *Mehanika gruntov, osnovaniya i fundamente* [Soil mechanics, bases and foundations]. Leningrad: Strojizdat, 1988. 415 p. (In Russ.)

6. Egorov I. E. *Jekzogennnye geomorfologicheskie processy i metody ih izuchenija* [Exogenous geomorphological processes and methods of their study]. Izhevsk: Izdatel'stvo Udmurtskogo universiteta, 2017. 383 p. (In Russ.)

7. Korableva O. V., Chernov A. V. Opyt monitoringa ruslovykh deformatsij na shirokopoljennykh rekah (na primere r. Kerzhenev) [Experience in monitoring channel deformations on wide-flood-plain rivers (Kerzhenev River as an example)]. *Geografija i prirodnye resursy*, 2008, v. 2, pp. 158-165. (In Russ.)

8. Lazarenko A. A. Litologija alljuvija ravninykh rek gumidnoj zony (na primere Dnepra, Desny, Oki) [Lithology of alluvium of plain rivers of humid zone (on the example of Dnieper, Desna, Oka)]. *Trudy GIN*, v. 120, 237 p. Moscow: Nauka, 1964. 236 p. (In Russ.)

9. Luchnikov A. I., Ljahin Ju. S., Lepihin A. P. Opyt primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlja ocenki sostojaniya beregov poverhnostnykh vodnykh ob'ektov [Experience in the use of unmanned aerial vehicles to assess the condition of the banks

of surface water bodies]. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*, 2018, v. 1, pp. 37-46. (In Russ.)

10. *Pochvy dolin rek Oki i Ugry i ih produktivnost'* [Soils of the Oka and Ugra river valleys and their productivity: monograph] / N. A. Muromcev, Ju. A. Mazhayskij, N. A. Semenov i dr. Rjazan': RGATU im. Professora P. A. Kostycheva, 2011. 203 p. (In Russ.)

11. *Jerozionno-ruslovyje sistemy* [Erosional-Catchment systems] / pod red. R. S. Chalova, V. N. Golosova, A. Ju. Sidorchuka. Moscow: INFRA-M, 2017. 702 p. (In Russ.)

12. Barman K., Roy S., Das V. K., Debnath K. Effect of clay fraction on turbulence characteristics of flow near an eroded bank. *Journal of Hydrology*, 2019, vol. 571, pp. 87-102.

13. Charlton R. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London: Routledge, 2008. 234 p.

14. Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning / S. D. Hamshaw, T. Bryce, D. M. Rizzo i dr. *River research and Applications*, 2017, vol. 33, iss. 8, pp. 1354-1367.

15. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins / Jugie M., Goba F., Virmoux C. et al. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 563, pp. 418-434.

16. Panin A., Matlakhova E. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications. *CATENA*, 2015, vol. 130, pp. 46-61.

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

Received: 14.10.2023

Accepted: 02.12.2024

Воробьев Алексей Юрьевич

Кандидат географических наук, доцент кафедры географии, экологии и природопользования Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-7110-4232, e-mail: a.vorobyov90@mail.ru

Локтеев Дмитрий Сергеевич

Магистрант Московского государственного университета геодезии и картографии, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-0345-0504, e-mail: lokteev@gmail.com

Бургов Евгений Вадимович

Начальник группы биотехнических систем лаборатории робототехники, Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация; кандидат биологических наук, инженер Института проблем экологии и эволюции имени А. Н. Северцова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-3983-5748, e-mail: burgov.ev@yandex.ru

Кадыров Александр Сергеевич

Аспирант кафедры географии, экологии и природопользования Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация, ORCID: 0009-0007-1416-7898, e-mail: burgov.ev@yandex.ru

Артюхов Илья Петрович

Аспирант Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева, г. Рязань, Российская Федерация, ORCID: 0009-0006-6267-3560, e-mail: artuhovip@mmtc.pro

Эм Константин Евгеньевич

Аспирант Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева, г. Рязань, Российская Федерация, ORCID: 0009-0002-6484-8716, e-mail: kostya21@inbox.ru

Балобина Анна Александровна

Магистрант Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0009-0001-0261-7392, e-mail: balobina-anna@rambler.ru

Aleksey Y. Vorobyov

Cand. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof. at the Department of Geography, Ecology and Nature Management, Ryazan State University named after S. A. Yesenin, Ryazan, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7110-4232, e-mail: a.vorobyov90@mail.ru

Dmitry S. Lokteev

Master's student at the Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-0345-0504, e-mail: lokteev@gmail.com

Evgenii V. Burgov

Head of the Biotechnical Systems Group of the Robotics Laboratory, National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation; Cand. Sci. (Biol.), Engineer at the Institute for Problems of Ecology and Evolution named after A. N. Severtsov, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3983-5748, e-mail: burgov.ev@yandex.ru

Aleksander S. Kadyrov

Postgraduate student at the Department of Geography, Ecology and Nature Management, Ryazan State University named for S. A. Yesenin, Ryazan, Russian Federation, ORCID: 0009-0007-1416-7898, e-mail: alieksandr.kadyrov.93@mail.ru

Ilya P. Artyukhov

Postgraduate student at the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev, Ryazan, Russian Federation, ORCID: 0009-0006-6267-3560, e-mail: artuhovip@mmtc.pro

Konstantin E. Em

Postgraduate student at the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev, Ryazan, Russian Federation, ORCID: 0009-0002-6484-8716, e-mail: kostya21@inbox.ru

Anna A. Balobina

Master's student at the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0009-0001-0261-7392, e-mail: balobina-anna@rambler.ru