

Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2024. № 3 (84). С. 167–183.
The Bulletin of Ryazan State University named for S. A. Yesenin. 2024; 3 (84):167–183.

Научная статья

УДК 631.459(282.247.412.3)

DOI 10.37724/RSU.2024.84.3.019

Методика, промежуточные результаты и перспективы полустационарных наблюдений на эрозионных берегах реки Оки в Рязанском расширении ее поймы¹

Александр Сергеевич Кадыров¹, Алексей Юрьевич Воробьев²

^{1,2} Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина, Рязань, Россия

¹ alieksandr.kadyrov.93@mail.ru

² a.vorobyov90@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются промежуточные результаты и потенциальные возможности получения новой геолого-геоморфологической информации при заложении учетных площадок на наиболее динамичных объектах днища долины реки Оки — эрозионных берегах ее излучин. Представлена методика тематических исследований, проводившихся разными методами в пределах Рязанского расширения окской поймы (743–660 км от устья реки) в 2013–2023 годах. Раскрыты причинно-следственные связи береговой морфолитодинамики и ее пространственной приуроченности с геологическими, гидрологическими и топографическими факторами рельефообразования. На примере полустационара «Дядьково» показано соотношение одно-, двух- и трехмерной составляющей эрозии. Также обсуждаются возможности расширения методологии подобных исследований с привлечением новых и традиционных подходов из смежных с геоморфологией географических дисциплин.

Ключевые слова: пойма, река Ока, беспилотный летательный аппарат, гидрологический год, геодезическая съемка, геоморфологический полустационар.

Для цитирования: Кадыров А. С., Воробьев А. Ю. Методика, промежуточные результаты и перспективы полустационарных наблюдений на эрозионных берегах реки Оки в Рязанском расширении ее поймы // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2024. № 3 (84). С. 167–183. DOI: 10.37724/RSU.2024.84.3.019.

Original article

Methodology, intermediate results and prospects of semi-stationary observations on erosion banks of the Oka River in the Ryazan extension of the floodplain

Aleksandr S. Kadyrov¹, Alexey Yu. Vorobyov²

^{1,2} Ryazan State University named for S. A. Yesenin, Ryazan, Russia

¹ alieksandr.kadyrov.93@mail.ru

² a.vorobyov90@mail.ru

Abstract. The article considers intermediate research results and opportunities for obtaining new geological and geomorphological data when establishing survey sites on the most dynamic objects of the Oka River valley bottom — the erosional banks of the river bends. The article presents a methodology of thematic studies using

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-00050 «Геоморфологический и геодезический мониторинг рельефообразования на эрозионных берегах реки Оки».

various methods applied to the Ryazan extension of the Oka floodplain (which is 743–660 km from the river mouth) over the past decade (2013–2023). It accounts for the cause-and-effect relationships of coastal morpholithodynamics and the spatial relation with the geological, hydrological and topological factors of relief formation. Using data from the Dyadkovo semi-stationary observation site, the research reveals the relationship between one-, two- and three-dimensional erosive components. It also discusses the possibilities of expanding this methodology, involving novel and traditional approaches from geographical disciplines related to geomorphology.

Keywords: floodplain, Oka River, unmanned aerial vehicle, hydrological year, geodetic survey, geomorphological land survey, geomorphologic semi-stationary site.

For citation: Kadyrov A. S., Vorobyov A. Yu. Methodology, intermediate results and prospects of semi-stationary observations on erosion banks of the Oka River in the Ryazan extension of the floodplain. *The Bulletin of the Ryazan State University named for S. A. Yesenin*, 2024; 3 (84):167–183. (In Russ.). DOI: 10.37724/RSU.2024.84.3.019.

Введение

Физико-географические исследования содержат четыре основные группы задач для получения прикладной или теоретической полезной информации (см.: [Жучкова, Раковская, 2004]). Изучение функционирования природно-территориальных комплексов является предметом ландшафтоведения и осуществляется на физико-географических стационарах. Под последними понимают ограниченные территории, обычно в пределах одной местности или урочища, на которых проводятся регулярные наблюдения динамики природных процессов. На многих ландшафтных стационарах (Харанорском, Маркопском, Кавалеровском, Лесуновском и пр.) мониторинг современного рельефообразования является лишь одной из актуальных задач, не всегда первостепенной (см.: [Дьяконов, 1988 ; Симонов, 2005 ; Беручашвили, Гордезиани, Джамаспашвили, Маглакелидзе, 2006]). В динамической геоморфологии часто задействуются стационары, которые в физической географии классифицируются как отраслевые (см.: [Виноградова, Самойлова, 1978 ; Симонов, 2005 ; Кораблева, Чернов, 2008 ; Баженова, 2018 ; Couper, Maddock, 2001 ; Palmer, Schilling, Isenhardt [et al.], 2014 ; Klösch, Blamauer, Habersack, 2015 ; Jugie, Goba, Vigmoux [et al.], 2018]). Это площадки для оценки интенсивности быстро протекающих проявлений флювиальных, склоновых или эоловых эрозионно-аккумулятивных процессов. Осуществляемые на них наблюдения имеют и прагматический аспект, связанный с оценкой ущерба от действия природной стихии на хозяйственные и селитебные объекты.

Особенность эрозионно-аккумулятивных процессов в ландшафтных условиях центра Русской равнины заключается в их приуроченности к определенным сезонам года. Некоторые из рельефообразующих процессов осуществляются только при поступлении значительного объема влаги в почвогрунты (дефлюкция, суффозия, оползание) (см.: [Рекомендации по оценке и прогнозу ... , 1987 ; Кривцов, 1998 ; Симонов, 2005 ; Баженова, 2012 ; Геоморфология городских территорий ... , 2017]) или обусловлены иррегулярным действием водных масс (нивация, плоскостной смыв) на земную поверхность. В бассейне реки Оки среди упомянутого перечня агентов эрозии работа рек занимает одно из наиболее заметных мест. Ежегодно в днищах речных долин отчуждаются значительные площади земель и изымаются большие объемы почвогрунтов из активно отступающих берегов. Рельефообразующие процессы в форме русловых деформаций сосредоточены по градиентным ландшафтно-геофизическим границам — аккумулятивным и эрозионным берегам рек. Из теории русловедения (см.: [Чалов, 2019 ; Charlton, 2008]) известно, что с увеличением водности рек нелинейно возрастают скорости размыва их берегов, поэтому берега реки Оки отступают в несколько раз быстрее, чем на ее притоках.

Зарубежная и отечественная практика наблюдений горизонтальных русловых деформаций свидетельствует о дискретности флювиального рельефообразования, причем как в пространстве, так и во времени. Общие оценки ежегодной скорости боковой эрозии окского русла (U_6) для Рязанской области колеблются в интервале 1,0–5,0 м/год в зависимости от факторов территориальной дискретизации руслового процесса — стратиграфии берегов и морфодинамической позиции того или иного их фрагмента (см.: [Кривцов, 1998 ; Беркович, Злотина, Турыкин, 2009 ; Беляков, Беркович, 2009]). Боковая эрозия русла приурочена в основном к весеннему сезону гидрологического года,

когда водность реки Оки возрастает в 3–20 раз. Основой отчетности наблюдений о стабильности ее берегов обычно является фиксация последствий весенних половодий при прохождении руслоформирующих расходов. При этом нередко занижается роль прочих агентов эрозии: склонового, биогенного, техногенного, суффозионного. Их активность продолжается и после весенних максимумов расходов, в летне-осеннюю межень, когда взаимодействие потока и поймы минимально. В отличие от берегов водохранилищ (см.: [Виноградова, Самойлова, 1978]), в балансе эрозии пойменных русловых откосов нефлювиальные процессы, как правило, имеют второстепенное значение. Учет их роли в рельефообразовании обычно существенно осложнен объективной многофакторностью и необходимостью использования дорогостоящих измерительных приборов.

Достоверность факторных оценок морфолитодинамики повышается, если возможна фиксация состояния рельефа по сезонам гидрологического года. При наличии таких данных не сложно выделить вклад максимальной водности (Q_{\max}) в моделировку рельефа эрозионных берегов. Охват детальными полевыми наблюдениями больших территорий затруднителен. Учитывая необходимость раздельной фиксации работы потока и субэдральных процессов, мы предприняли полустационарные исследования отступания окских берегов. Опыт международных исследований в данной области выделяет широкую область возможных подходов: от полевых методов динамической геоморфологии (см.: [Кораблева, Чернов, 2008 ; Завадский, Лобанов, Петухова [и др.], 2010 ; Баженова, 2012 ; Couper, Maddock, 2001 ; Palmer, Schilling, Isenhardt [et al.], 2014]) до установки видеокамер (см.: [Klösch, Blamauer, Habersack, 2015]). Съемка топографии местности для количественной характеристики динамики ландшафтных компонентов в последние десятилетия все чаще задействует метод фотограмметрии (см.: [Jugie, Goba, Vermoux [et al.], 2018]), в том числе с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (см.: [Hamshaw, Bryce, Rizzo [et al.], 2017 ; Masoodi, Noorzad, Majdzadeh, Samadi, 2018]).

Организация геоморфологических полустационаров на берегах реки Оки позволила нам проследить причинно-следственные связи скорости и пространственной приуроченности боковой эрозии от внешних и внутренних факторов системы «пойма — русло» (см.: [Воробьев, Кадыров, 2020 ; Воробьев, Кадыров, Локтеев, Бургов, Балобина, 2023]). Постепенно простые наблюдения рельефообразующих процессов, начавшиеся в первой половине 2010-х годов, дополнились регистрацией обменных и транзитных функций местных геосистем, не имеющих визуального выражения в топографии русловых склонов. Фактически локальные геоморфологические исследования приобрели многие черты ландшафтно-геофизического мониторинга. Актуальные в рамках настоящего исследования задачи, излагаемые ниже, не противоречат главной цели (по Д. Л. Арманду, см.: [Жучкова, Раковская, 2004]) работ большинства физико-географических стационаров — изучению обмена веществом и энергией между отдельными компонентами геоконплексов.

Основная часть

Морфодинамические позиции геоморфологических полустационаров на берегах реки Оки

Главным недостатком стационарного и полустационарного геоморфологического мониторинга Ю. Г. Симонов считает временной лаг между началом полевых работ и получением полезного результата (см.: [Симонов, 1978, 2005]). Эффективными, по его мнению, должны быть даже краткосрочные наблюдения длительностью в несколько лет. Следовательно, на первое место выходит выбор наиболее динамичных фрагментов окских берегов, наблюдения которых предоставили бы ценную информацию о скорости эрозии уже в первые годы мониторинга. Таковы нижние крылья окских излучин в окрестностях Рязани, весьма доступные даже для пеших исследований. Четыре полустационара заложены нами на нижних крыльях меандров (рис. 1), рекогносцировка местности была проведена еще в 2013 году. Излучины по своей морфометрии относятся к разным типам, что определяет различия в циркуляции потока как в межень, так и во время руслонаполнения (табл.). Судя по морфометрическим параметрам, на полустационарах «Костино» и «Дядьково» должно преобладать поперечное смещение фронта размыва (см.: [Завадский, Лобанов, Петухова [и др.], 2010 ; Егоров, 2017 ; Чалов, 2019]), а на остальных учетных площадках так или иначе велика роль продольной составляющей плановых деформаций.

Морфометрические параметры излучин реки Оки, на берегах которых основаны полустационары

| Река Ока | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|---------------------|
| Стационар | l | L | r | B | h | Тип излучины |
| «Костино» | 2,58 | 0,76 | 0,56 | 0,16 | 1,00 | крутая омеговидная |
| «Заокское» | 2,33 | 1,04 | 0,36 | 0,18 | 1,05 | синусоидальная |
| «Дядьково» | 2,93 | 1,61 | 0,83 | 0,19 | 0,94 | сегментная крутая |
| «Кораблино» | 2,70 | 1,63 | 0,42 | 0,17 | 0,99 | сегментная развитая |

Примечание: l — длина по руслу, км; L — шаг излучины, км; r — радиус кривизны, км; B — ширина русла, км; h — длина стрелы прогиба, км.

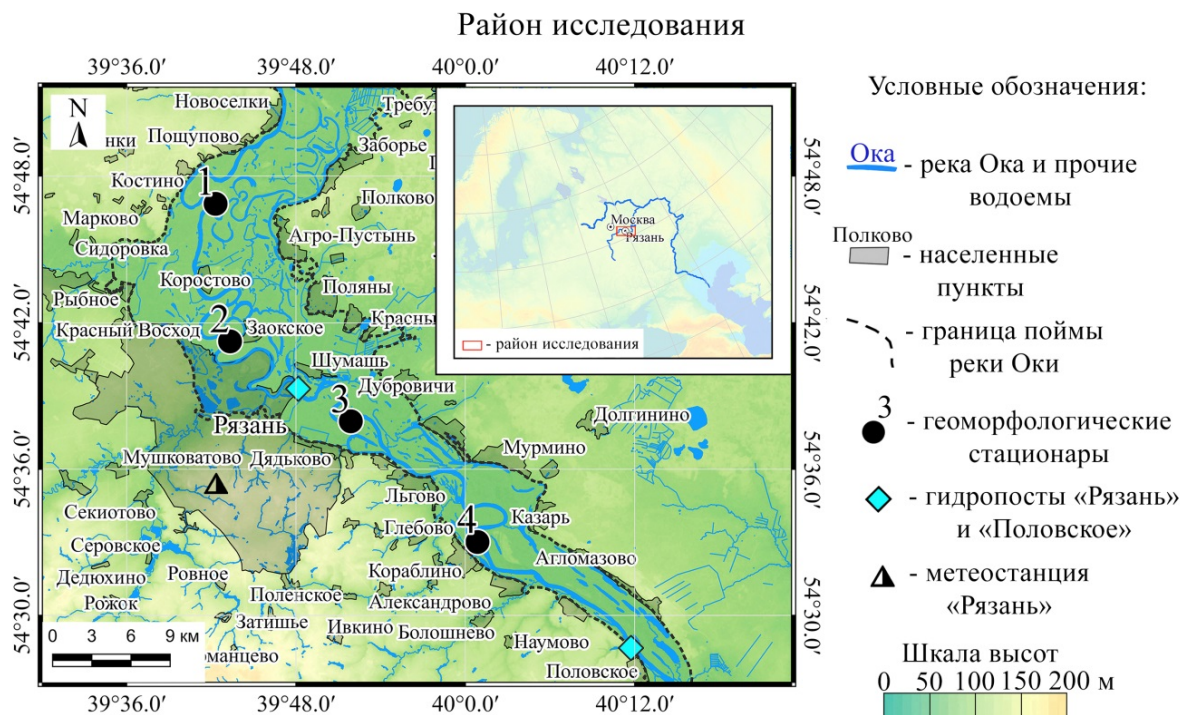
В действительности все четыре излучины смещаются вдоль и поперек днища долины, протяженность фронтов размыва на них составляет 1,1–2,3 км. Полустационары охватывают различную часть берегов: от 200 до 500 м. Необходимость исследования большего или меньшего участка поймы определяется формой русла, расположением рекреационных зон, особенностями геологического строения берегов. На протяжении нескольких лет морфолитодинамика на учетных площадках фиксировалась только с помощью эрозионных реперов (штифтов) (см.: [Воробьев, Кадыров, 2020]), однако с 2020 года начались комплексные работы, в которых скорость отступления берега является лишь одним из определяемых параметров.

Все фрагменты берегов, на которых проводятся наблюдения, расположены в интервале благоприятного «угла атаки» водных масс русла на берег (см.: [Чалов, 2019 ; Куракова, 2022]). Углы разворота излучин в границах полустационаров колеблются от 110° («Заокское») до 170° («Кораблино», «Дядьково»). Привершинные части всех меандров развиваются сравнительно медленно, на расположенном выше прочих по течению участке «Костино» около вершины находится устье реки Солотчи. Вогнутые берега на углах разворота 0–90° местами представлены пассивными откосами, покрытыми зарослями *Acer Negundo*, *Salix alba*, *Alnus glutinosa*. Наблюдения таких участков нецелесообразны в связи с их относительной устойчивостью к размыву, особенно в годы со слабо дифференцированным стоком. При выборе мест для начала работы учитывались и внешние факторы, не связанные с морфодинамикой и геологией пойменно-русловых комплексов. Например, площадка «Дядьково» заложена рядом со строящимся мостовым переходом, а деформации берега реки Оки на полустационаре «Заокское» напрямую угрожают селитебным и хозяйственным постройкам одноименного села.

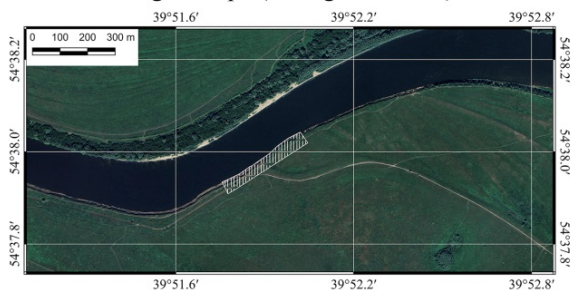
Инструментальная база мониторинга и целеполагание исследований

Методы наших полустационарных исследований можно разделить на четыре группы, заимствованные из отраслевых физико-географических дисциплин и геологии (рис. 2). В методике последней традиционно значительное место занимает полевая инвентаризация чехла обломочных отложений при помощи заложения шурфов, закопуш и зачисток обнажений. На каждом полустационаре закладывалось 4–5 опорных шурфов с заглублением в откос на 1,0–2,0 м, позволивших установить наличие трех основных фаций голоценовых осадков: пойменной фации аллювия (aIVp), его старичной фации (aIVs), переходных между русловыми и пойменными отложениями ископаемых прирусловых валов (aIVpr) (рис. 3). Все эти фации были описаны ранее для среднего течения поймы реки Оки (см.: [Кривцов, 1998]), их сопряженное с формами рельефа залегание приводится в морфологическом анализе многих речных долин мира (см.: [Charlton, 2008 ; Hamshaw, Bryce, Rizzo [et al.], 2017 ; Jugie, Goba, Virmoux [et al.], 2018]). Классическое строение перстративной аллювиальной толщи в Рязанском расширении окской поймы осложняется близким к поверхности залеганием скальных пород каменноугольного возраста и ледниковых осадков, дислоцированных во время днепровского оледенения. Порядка 30 % площади проективного покрытия на надводных частях учетных площадок «Дядьково» и «Ко-

раблино» представлено грунтами gHdn. В основном это тяжелые суглинки и глины, механический состав остальных фаций соответствует описанным ранее (см.: [Кривцов, 1998]) и ожидаемым для подобных отложений гранулотипам (см.: [Кораблева, Чернов, 2008 ; Воробьев, Кадыров, Локтев, Бургов, Балобина, 2023 ; Charlton, 2008]).



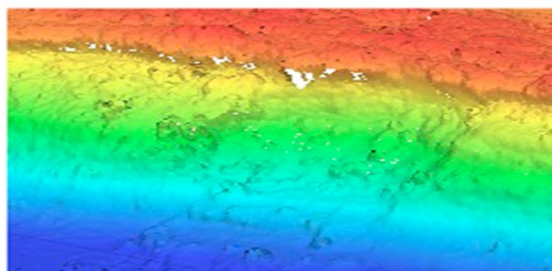
Полустационар «Дядьково» на спутниковом снимке сверхвысокого разрешения Google.Maps (© Digital Globe)



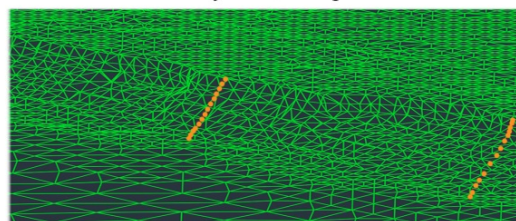
Полустационар «Дядьково» - вид на местности



Фрагмент итогового растра поверхности полустационара



Дискретный план морфологии и строения рельефа по TIN-модели топографии полустационара



● - опорные точки (колонки отбора геологического материала)

Рис. 1. Район исследования, вид полустационаров на местности и способы моделирования их рельефа



Рис. 2. Структура методики комплексного мониторинга рельефообразования

За последние годы осуществлен гранулометрический анализ почвогрунтов (>500 проб) пипеточным и ситовым методами, определены значения пористости и коэффициента пористости почвогрунтов. Особое значение для прогнозов горизонтальных русловых деформаций имеют плотность твердой фазы грунта и плотность его скелета (см.: [Рекомендации по оценке и прогнозу ... , 1987 ; Подземная охранная зона ... , 1995 ; Stefanovic, Bryan, 2007 ; Fox, Heeren, Miller [et al.], 2011]), определенные, как и прочие водно-физические свойства отложений, в колонках отбора на опорных шурфах (рис. 1). Весовая влажность осадков на внешней стороне откосов является параметром с более коротким периодом изменчивости, контролируемым метеорологическими событиями. Ежемесячные измерения влажности почвогрунтов на свежих стенках пойменных яров в теплое время года необходимы для объяснения мобилизации откосов теми или иными геоморфологическими процессами. Отдельно, в камеральных условиях, определялся коэффициент фильтрации почв и грунтов на компрессионном приборе ПЛЛ-9 и приборе ПКФ-СД (для супесчано-песчаных грунтов). Все измерения проводились соответственно ГОСТ 12536-2019, ГОСТ 5180-2015, ГОСТ 25584-2016. Отметим, что инженерно-геологические метрики являются количественными, пригодными для численного моделирования причинно-следственных связей рельефообразования.

Основная информация о пространственно-временной изменчивости скорости отступления берегов получена нами с помощью аэрофотосканирования берегов БПЛА. Эксплуатация дронов DJI Mavic 2 и DJI Mavic Pro предоставляет позиционные данные высокого разрешения, расширяющие методические возможности полустационаров. Изготовление цифровых моделей местности (ЦММ), а на их основе и цифровых моделей рельефа (ЦМР), дало детализированную информацию о микро-рельефе учетных площадок (рис. 1). В ряде случаев для наблюдения доступен даже нанорельеф, поскольку разрешение пикселя цифровых продуктов моделирования рельефа (выполнено в AutoCAD, модуль Civil 3D) составляет 1,3 см. Одновременно осуществлялась наземная (маршрутная) геодезическая съемка фронтов размыва. Она оказалась оправданной в связи с ограничениями на полеты, введенными соответствующими указом президента России № 757 и постановлением губернатора Рязанской области № 756 (см.: [О реализации Указа Президента ...]).

Эрозионные штифты, которые традиционно задействуются во флювиальной геоморфологии (см.: [Кораблева, Чернов, 2008 ; Завадский, Лобанов, Петухова [и др.], 2010 ; Егоров, 2017 ; Couper, Maddock, 2001 ; Palmer, Schilling, Isenhardt [et al.], 2014 ; Jugie, Goba, Vermoux [et al.], 2018]), также нами использовались. На учетных площадках установлено более 400 реперов (рис. 4), ранее были

получены репрезентативные региональные данные о распределении значений U_6 на фронтах размыва ряда окских излучин (см.: [Воробьев, Кадыров, 2020]). В ходе работы на полустационарах мы сравнили результаты двух геодезических методов и измерений с помощью эрозионных штифтов. Достоверные различия в скорости эрозии берегов на опорных реперных точках, экстраполированных на пойменную бровку, в период 2020–2023 годов между методами не выявлены.

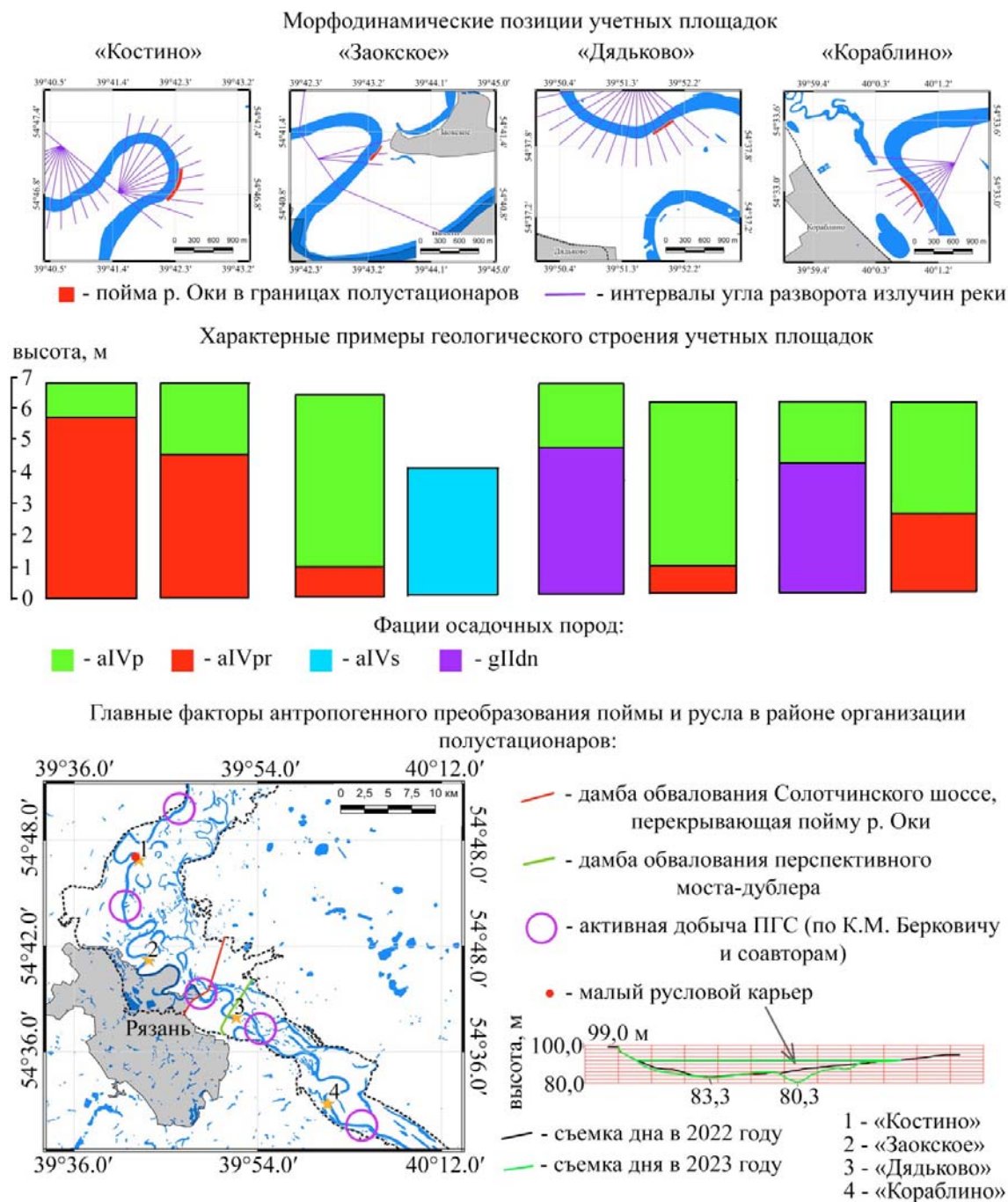


Рис. 3. Позиции полустационаров, их геологическое строение и основные участки антропогенного воздействия на пойменный рельеф

Рельеф состоит не только из точек, но также из линий и полигонов (см.: [Симонов, 2005]), поэтому наряду со скоростью отступления берега продуктивны расчеты площади эродированной поймы (S_6) и объема перемещенных отложений (W_6). Все эти параметры желательны к учету в аналогичных исследованиях морфолитодинамики берегов водохранилищ (см.: [Виноградова,

Самойлова, 1978]). Несмотря на приуроченность «деятельного слоя» (по Ю. Г. Симонову, см.: [Симонов, 2005]) рельефообразования к поверхности руслового откоса, требуется понимание пространственного распределения почвенных и геологических ресурсов, которые могут быть потрачены в ближайшие годы. Пойменные генерации рельефа являются объемными физическими объектами, поэтому описание литологии отложений на полустационарах следует проводить и на расстоянии по крайней мере до 100 м от берегов реки Оки.



Рис. 4. Инструменты для наблюдения природных процессов на полустационарах

Известно (см.: [Солодовников, 2020 ; Stefanovic, Bryan, 2007 ; Masoodi, Noorzad, Majdzadeh, Samadi, 2018]), что 3D-моделирование уровня грунтовых вод и их запасов весьма информативно для оценки устойчивости речных берегов. Популярными в последние десятилетия стали лизиметры и траншеи (см.: [Герке, Сайдл, Турунтаев, 2010 ; Duval, Hill, 2007 ; Fox, Heeren, Miller [et al.], 2011]), заложение которых осуществляется в непосредственной близости от пойменной бровки. Скорость фильтрации маркирующих жидкостей, закачиваемых в такие выемки, является одним из способов выявления путей предпочтительной фильтрации в массиве грунтов, скорости водоотдачи и других полезных параметров. Ограничившись бурением нескольких десятков разведочных скважин (буром — ручным пенетрометром РП-1), мы смогли уточнить границы фаций и нанести кривые уровня грунтовых вод (УГВ) на 3D-модели. Оценка уровня УГВ по двум профилям, параллельным береговой линии, на каждом полустационаре также позволила выделить примерное положение капиллярной каймы, зон полного влагонасыщения и аэрации, связав их с эрозионными потерями почвогрунтов.

*Фоновые гидрометеорологические условия наблюдений
в 2020–2023 годах*

Сток воды на полустационарах является фактором, постоянно действующим на русловое ложе. Поэтому функционал полустационаров интегрирует гидрологические расчеты для выделения фаз водного режима реки Оки. Построение кривой ее уровней, гидрографа и кривой уровней-расходов (рис. 5) является примером подобных операций, необходимых для принятия решений о сроках и периодизации полевых работ. Гидрологический год разделен нами на холодный период (ноябрь-май) и теплый период (июнь-октябрь), которые не совпадают с сезонами климатического года, выделяемыми по расчетам теплового и радиационного баланса региона (см.: [Дьяконов, 1988]). Четыре фазы водного режима группируются в два кластера, среди которых зимняя межень наряду с весенним половодьем относится к холодному периоду (зимне-весенний сезон). Полевые работы на учетных площадках в это время года сводятся в основном к оценке параметров снежного покрова. Не всегда удается физически посещать полустационары: в снежные зимы пешая доступность их ограничена, а ранней весной и в предвесенье специалисты-геоморфологи сталкиваются с затоплением притеррасной поймы и превращением ее прирусловых участков в «острова».

Доступ к массивам многолетних наблюдений водности реки Оки в районе исследования существенно ограничен. В настоящее время главным источником информации являются отчеты Рязанского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — филиала Центрального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, причем за 2022–2023 годы данные пока не сформированы. Инструментальные измерения суточных расходов ведутся на створе «Половское» с 1922 года, гидропост «Рязань» функционирует с 1878 года. Оба створа располагаются на близком расстоянии от полустационаров (645 км и 691 км руслового хода соответственно). По А. А. Белякову и К. М. Берковичу (см.: [Никитин, Плехов, 1974]), за период инструментальных наблюдений между створами «Калуга» (1 109 км от устья реки Оки) и «Муром» (215 км от устья) среднемаксимальный расход нарастает от 4 800 до 9 050 м³/с. Наиболее вероятно, что в Рязанском расширении поймы он превышает 6 000 м³/с, в то время как средний максимальный уровень (h_{\max}) достоверно равен 6,8 м (рис. 5). Участок русла, к которому примыкают все учетные площадки, является еще и относительно бесприточным, что упрощает факторный анализ русловой морфодинамики.

Функционирование полустационаров осуществлялось в годы неустойчивого весеннего стока (рис. 5). Следуя градации водности рек, принятой в Республике Беларусь (см.: [Волчек, Натарева, 2018]), можно сделать вывод, что наши наблюдения, скорее всего, соответствуют годам в первых двух квартилях обеспеченности Q_{\max} . Обеспеченность по максимальным уровням реки Оки в 2020–2023 годах колеблется от 96 до 35 %, в то время как предыдущее десятилетие отмечено регулярным возвратом маловодных лет (см.: [Воробьев, Кадыров, 2020 ; Воробьев, Кадыров, Локтеев, Бургов, Балобина, 2023]). Последним таким годом был 2019-й, но в период работы на четырех учетных площадках наблюдался устойчивый рост запасов региональных водных ресурсов. На этом фоне очевидна тенденция к увеличению мощности половодий, несмотря на неординарность внутригодового распределения стока в 2020 году. За последние пять лет в Рязанском расширении окской поймы h_{\max} возрос с 3,45 до 7,18 м. С учетом косвенной оценки по кривой уровней — расходов (рис. 5) увеличение Q_{\max} достигает около 3 680 м³/с (с 1 420 м³/с в 2020 году до 5 100 м³/с в 2024 году).

Длительность затопления всякого участка поймы определяет потенциал мобилизации ее дневной поверхности (см.: [Рекомендации по оценке и прогнозу ... , 1987 ; Барышников, 2012 ; Геоморфология городских территорий ... , 2017 ; Чалов, 2019]), а также развитие гидрогенных почвообразовательных процессов и мозаику преобладающих растительных ассоциаций. Устойчивость прирусловых форм рельефа, кроме того, зависит еще и от направления взаимодействия пойменного и руслового потоков на гребне паводковой волны. Выделяется 5 типов взаимодействия (см.: [Барышников, 2012]), среди которых, на наш взгляд, на полустационаре «Костино» реализуется расходящийся поток при большом угле динамической оси руслового потока. Реализация данной схемы, возможной также на участках «Заокское» и «Дядьково», во время половодья приводит к увеличению скоростей течения в пойменных бровках и провоцирует возникновение водоворотных зон. В то же время устьевой подпор при впадении реки Солотчи в основное окское русло способствует некоторому торможению потока и препятствует еще более сильному разрушению откосов.

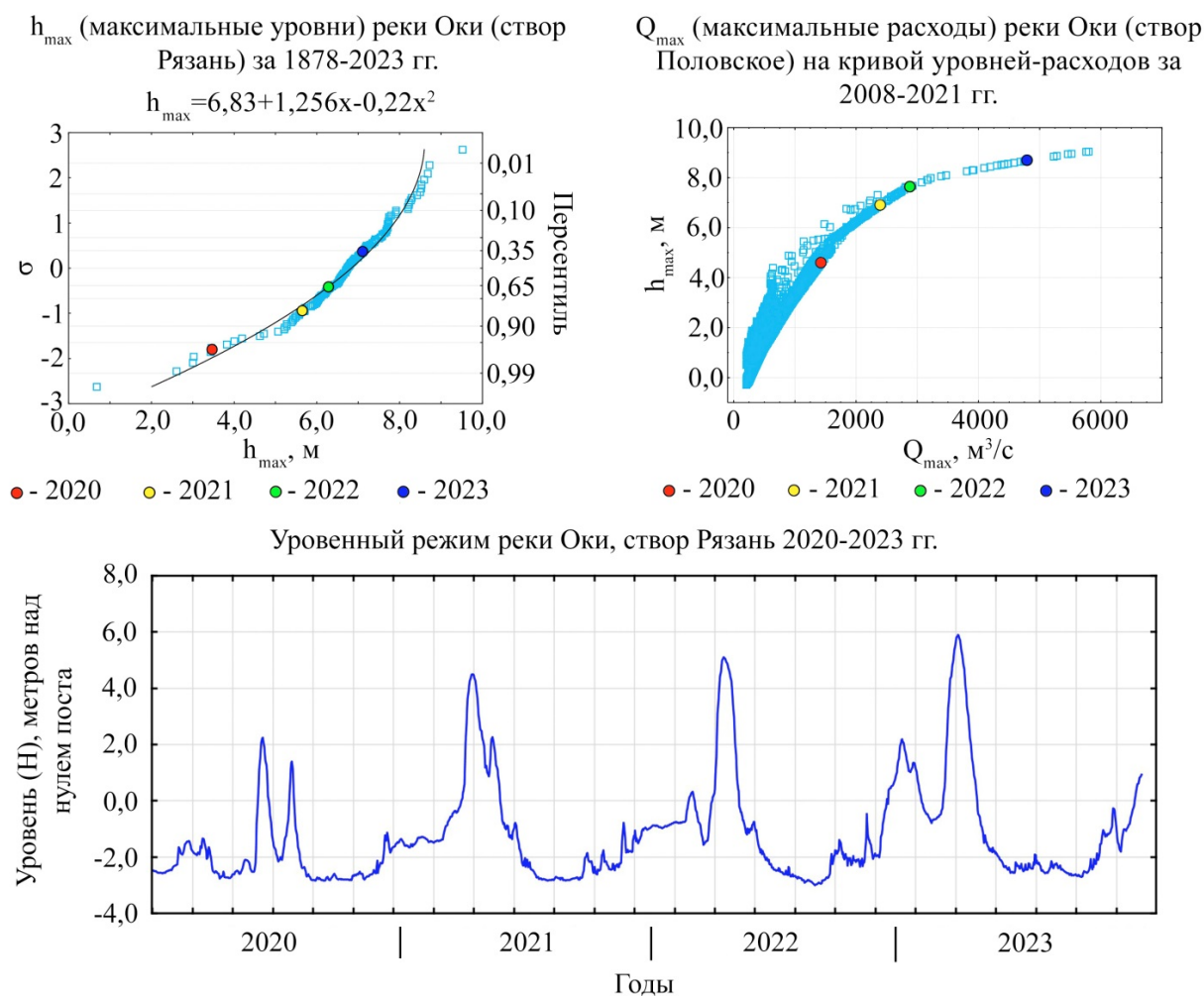


Рис. 5. Динамика элементов гидрологического режима реки Оки в период функционирования полустационаров и в предыдущие годы

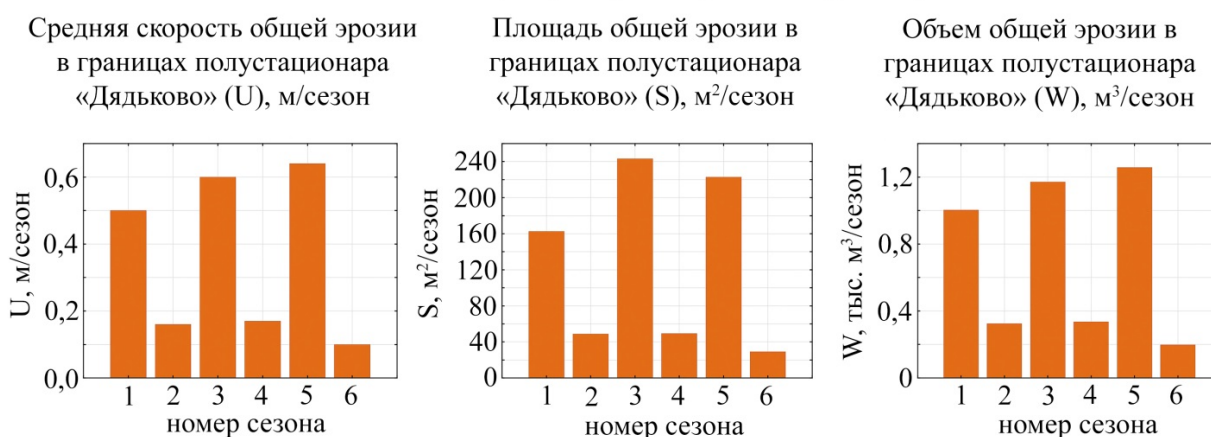
Непосредственные гидрологические наблюдения на полустационарах можно разделить на две группы: проводимые в пределах поймы и берегов и осуществляемые на плавательном средстве в контурах окского русла. Систематические измерения температуры воды (термометром Thermal TE-113) дополнялись определением GNSS-приемником актуального уровня реки перед началом каждой геодезической съемки. Примечательно, что вода во временных пойменных водоемах после их изоляции на спаде половодья прогревается значительно быстрее, чем в основном русле. Так, в конце апреля 2024 года удалось установить, что эта разница, оказывающая отопляющий эффект при нисходящих токах влаги, составляла уже 6–10°C.

Хозяйственная деятельность человека в разной степени искажает динамику горизонтальных русловых деформаций вплоть до полного их контроля и кардинального изменения облика речных пойм (см.: [Чалов, 2019 ; Duval, Hill, 2007 ; Palmer, Schilling, Isenhardt [et al.], 2014]). До заложения полустационаров предполагалось, что техногенное воздействие на рельеф и берега реки минимально, поскольку имелась ориентировочная информация (см.: [Беркович, Злотина, Турыкин, 2009]) о дислокации крупных русловых карьеров на других участках (рис. 3). Регулярные съемки руслового дна на полустационарах осуществлялись эхолотом и ручным лотом. Уже на первых поперечных сечениях потока на площадке «Костино» был обнаружен малый карьер в виде прорези, обновляемой землесосами. Наблюдения реакции русла на изъятие части донных наносов, даже локальные, уточняют истинный масштаб дноуглубительных работ на реальных фактических данных и выявляют потенциально нестабильные фрагменты подводного руслового склона.

Краткое описание промежуточных результатов работы полустационаров и перспективы их дальнейшего функционирования

Наложение растров ЦМР, фиксирующих сезонные состояния рельефа, подтвердило ожидаемую тенденцию активизации боковой эрозии с ростом водности реки Оки, в первую очередь весенней. На примере полустационара «Дядьково» прослеживается неустойчивая сезонная динамика разрушения откоса, не прерывающаяся тем не менее и в летне-осеннее время. Как видно на диаграммах геометрических составляющих эрозии (рис. 6), параметры U_6 и W_6 достаточно хорошо координированы. На этом фоне площадь размытой поймы не имеет такой четкой связи с U_6 , в том числе из-за неоднородной стратиграфии берега. Разные механические и физические свойства осадков $aIVp$, $aIVs$ и $gIIdn$, которыми выполнен откос, приводят к неодинаковому отклику фаций на флювиальную эрозию. Потери земельных угодий рассчитываются по самой верхней части откоса, но стабилизация его поперечного профиля зависит и от нижележащих горизонтов. Русловой склон может выполаживаться или, наоборот, уменьшать свое заложение, такая ежегодная изменчивость крутизны поперечного профиля берега прослеживается на диаграмме. В частности, по сравнению с половодьем 2022 года касательные напряжения в следующем году должны были возрасти. Однако это привело не к увеличению потерь плодородного слоя почвы, а к их снижению из-за формирования более крутого откоса, чем раньше.

Колебания интенсивности рельефообразования на учетной площадке «Дядьково» по сезонам 2021-2023 гг (по фотограмметрическим данным)



Сезоны: 1 - зима-весна 2021, 2 - лето-осень 2021, 3 - зима-весна 2022, 4 - лето-осень 2022, 5 - зима-весна 2023, 6 - лето-осень 2023

Рис. 6. Динамика элементов гидрологического режима реки Оки в период функционирования полустационаров и в предыдущие годы

Объем летне-осенней эрозии составляет 200–350 м³ ежегодно, отмечается его заметное сокращение после мощного половодья 2023 года, которое пока не получило всестороннего объяснения. При редуцированном весеннем стоке в 2021 году различия между W_6 за теплый и холодный период года сокращаются до 2,7 раз, а в 2023 году они достигли 6 раз. Предполагается, что суммарная годовая динамика отступления берегов на полустационаре является относительно устойчивым процессом, стационарность которого поддерживается взаимозаменяемостью различных эрозионных агентов. Субэральные процессы обычно рассматриваются как «подготовительные» к последующей флювиальной эрозии (см.: [Егоров, 2017 ; Couper, Maddock, 2001 ; Jugie, Goba, Vermoux [et al.], 2018]), но и прохождение паводков изменяет напряжения в массивах осадочных пород и делает их предрасположенными к склоновой литодинамике. Однако потенциал компенсации аномалий весеннего стока осыпанием и отседанием блоков отложений, деятельностью землероев и ливневой эрозией ограничены. В 2014–2017 годах зафиксированы многочисленные случаи, когда после невысокого половодья берег практически стабилизировался ($U_6 < 0,2$ м/год) (см.: [Воробьев, Кадыров, 2020]).

Генерации молодой сегментно-гравистой поймы, расположенные в пределах полустационаров «Костино» и «Кораблино», весьма уязвимы к появлению фестонов и выемок. Полукруглые эрозионные фестоны препарируют гривы, которые могут быть почти нацело сложены песчано-супесчаными осадками ископаемых фаций aIVr_г и aIVr (руслевая фация аллювия). Значительные фильтрационные возможности данных отложений (K_{ϕ} до 10 м/сут) определяют высокие значения гидродинамического давления в ходе взаимодействия подземных вод и водных масс русла. Напротив, грунты ледникового генезиса на полустационарах «Кораблино» и «Дядьково» имеют $K_{\phi} < 0,5$ м/сут и тяжелый гранулометрический состав, что отражается как в пониженных ежегодных значениях U_6 , так и в поперечном профиле берегов, на которых почти отсутствуют бечевники. Пористость, плотность сложения и плотность твердой фазы играют опосредованную роль во влиянии на динамику боковой эрозии русла. Первые два параметра уменьшаются либо увеличиваются от пойменной бровки к урезу реки, а значения третьего находятся в ожидаемых пределах (см.: [Подземная охранная зона ... , 1995]) для минеральных грунтов. Между тем ежегодное отступление берегов на полустационарах происходит равномерно по высоте, без четко выраженных пиков U_6 .

Зеркало грунтовых вод (УГВ) падает в пределах расстояния 0–100 м от пойменной бровки под углами от 10 до 25 ‰ в теплое время года. Ежегодные колебания увлажнения за данный сезон находят слабое отражение в положении УГВ, поскольку при резких различиях месячных сумм осадков из-за смены шаблонов циркуляции атмосферы за теплый сезон в 2022–2023 годах суммы осадков были практически одинаковыми. Различия между УГВ в мае-июне и осенью незначительны, как и в пойме реки Москвы (см.: [Геоморфология городских территорий ... , 2017]). Истощение запасов грунтовой влаги начинается уже в первой половине июня и, согласно нашим и ранее приводимым данным (см.: [Никитин, Плехов, 1974]), сильно зависит от повторяемости дождей. Ежемесячный контроль влажности почвогрунтов также показал, что отложения gPdn и частично aIVs сохраняют высокую степень влагонасыщения в течение лета и осени. На информации о переходе горных пород на полустационарах из одного состояния влажности в другое может основываться выявление реологических предпосылок мобилизации откосов.

Кроме того, значителен потенциал гидролого-морфологических работ, включающих более детальную съемку дна реки Оки. Такие параметры, как гидравлический радиус, амплитуда глубины потока и шероховатость ложа, могут быть установлены в ходе подобных работ. Подводная часть берегов на учетных площадках, по нашим предварительным данным, размывается быстрее, чем надводные пойменные яры, на которых сосредоточена основная исследовательская активность. Необходимо установить также тип рельефа речного дна, выяснить, за счет гряд какого масштаба осуществляется основной транспорт руслообразующих наносов, и оценить не только горизонтальные, но и вертикальные деформации русла.

Расположение наиболее крупных форм донного рельефа на излучинах, таких как побочни, способно существенно корректировать прогнозы развития русловых деформаций (см.: [Рекомендации по оценке и прогнозу ... , 1987 ; Чалов, 2019 ; Кураков, 2022 ; Jugie, Goba, Virmoux [et al.], 2018]). Предсказание средней U_6 тем не менее основывается не только на гидролого-морфологических критериях, но и на признании роли ряда ландшафтно-геофизических процессов и явлений. Хорошим примером такого комплексного алгоритма и потенциальной основой для будущих расчетов является следующая формула:

$$U_6 = k_1 k_2 k_3 \frac{\rho_w (H_{med} + h_1)}{\rho (H + h)} (B - 2B_1),$$

где k_1 — коэффициент асимметрии русла; k_2 — коэффициент размываемости берега; k_3 — коэффициент увлажнения грунтов берега; ρ_w — плотность воды; ρ — плотность грунтов откоса; H_{med} — средняя глубина русла; h_1 — высота пика половодья; H — наибольшая глубина, м; h — высота берега, м; B — полная ширина русла; B_1 — расстояние от наибольшей глубины до размываемого берега (см.: [Рекомендации по оценке и прогнозу ... , 1987]).

Перспективы продолжения работы учетных площадок связаны с преодолением ограниченных возможностей экстраполяции имеющихся данных на любой произвольный фрагмент берегов реки Оки. Выяснить, насколько наши наблюдения репрезентативны, можно на основе

крупного регионального обобщения — ретроспективы горизонтальных русловых деформаций в предыдущие десятилетия на морфологически неоднородных участках русла. В настоящее время отмеченная проблема, равно как и вопрос устойчивости русел притоков реки Оки в средней части ее долины, разработаны недостаточно. Одновременно с этим не потеряют актуальность и многолетние полустационарные исследования. Уточним, что циклы амплитуд размыва и аккумуляции обычно подчинены квазитрехлетнему циклу (см.: [Симонов, 1978]), а время возврата руслоформирующих половодий в бассейнах крупных водотоков, расположенных в умеренном гумидном климате, также чаще всего составляет 2–3 года (см.: [Charlton, 2008]). Уже сейчас результаты функционирования четырех полустационаров можно отнести к многолетним исследованиям, а объем добытой информации — достаточным для формирования общих выводов.

Заключение

По итогам работ на геоморфологических полустационарах можно сформулировать следующие выводы:

1. Снижение трудоемкости полевых геоморфологических работ при переходе от метода эрозионных штифтов к геодезической аэрофотосъемке рельефа сопровождалось увеличением объема позиционных данных о морфодинамике берегов в тысячи и десятки тысяч раз. Впервые в распоряжении региональной школы геоморфологии оказались данные не только о скорости эрозии берегов реки Оки, но и о площади последовательно уничтожаемой поймы и об объеме перемещенных почвогрунтов, что делает возможным анализ геометрических и топологических предпосылок опасного геоморфологического процесса.

2. Количественная оценка сезонной активности горизонтальных русловых деформаций на четырех полустационарах позволила оценить масштаб как резких проявлений рельефообразования после весеннего половодья, так и относительно равномерного отступления берегов летом и осенью. Установлено, что эрозия в летне-осеннее время года составляет 20–30 % от весеннего размыва, который является ведущим процессом и во многом определяет приведенное соотношение.

3. Предполагается, что некоторые гранулотипы русловых склонов могут существенно подавлять фактор благоприятной морфодинамической позиции в локальных оценках скорости отступления фронтов размыва. К отложениям тяжелого механического состава, снижающим расстояние ежегодного отступления берега до 0,5–1,0 м, относятся прежде всего ледниковые глины и суглинки. Исследования дна и берегов показали, что надводные и подводные части русловых склонов ряда окских меандров сложены подобными грунтами. Еще одним подтверждением данной закономерности являются интенсивные локальные размывы (до 10–12 м/год) с образованием фестонов на откосах, сложенных молодыми аллювиальными осадками (от песков до легких суглинков) практически на тех же самых углах разворота других излучин.

4. Расширение методики геоморфологических работ за счет методов из геологических и географических наук предоставило большой объем дополнительной информации, необходимой для перехода от констатации факта разрушения пойменного яра к объяснению инженерно-геологических, гидрогеологических, гидравлических и синоптических предпосылок этого процесса. По всей видимости, перспективными в дальнейших исследованиях окажутся синтетические междисциплинарные карты и качественно-количественные модели факторов берегового рельефообразования.

Список источников

1. О реализации Указа Президента Российской Федерации от 19.10.2022 № 757 «О мерах, осуществляемых в субъектах Российской Федерации в связи с Указом Президента Российской Федерации от 19.10.2022 № 756» : Постановление губернатора Ряз. обл. от 07.11.2022 № 134-пг. — URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/6200202211110011> (дата обращения: 03.12.2023).
2. Баженова О. И. Сибирская школа экспериментальной геоморфологии // География и природные ресурсы. — 2018. — № 2. — С. 23–32.
3. Барышников Н. Б. Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. — СПб. : РГГМУ, 2012. — 426 с.
4. Беляков А. А., Беркович К. М. Река Ока: проблемы и перспективы реконструкции // Эрозионные и русловые процессы. — М. : Изд-во МГУ, 2005. — Т. 4. — С. 251–273.

5. Беркович К. М., Злотина Л. В., Турыкин Л. А. Природно-антропогенные трансформации русла Оки в районе Рязани // Геоморфология. — 2009. — № 2. — С. 26–32.
6. Беручашвили Н. Л., Гордезиани Т. П., Джамаспашвили Н. Ш., Маглакелидзе Р. В. Марткопский стационар: изменение природной среды и концептуальных идей // География и природные ресурсы. — 2006. — № 3. — С. 149–155.
7. Виноградова Н. Н., Самойлова А. А. Изменение береговой зоны Можайского водохранилища в зависимости от колебаний уровня воды // Природа речных долин центра Русской равнины. — М. : Моск. фил. геогр. о-ва СССР, 1978. — С. 36–46.
8. Волчек А. А., Натарева О. Н. Изменение внутригодового распределения стока воды рек Беларуси // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. — 2018. — № 52. — С. 67–78.
9. 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.
10. Воробьев А. Ю., Кадыров А. С., Локтеев Д. С., Бургов Е. В., Балобина А. А. Расчет сезонной эрозии на береговых откосах реки Оки с помощью геодезических методов // Известия Русского географического общества. — 2023. — Т. 155, № 2. — С. 25–43.
11. Геоморфология городских территорий: конструктивные идеи / отв. ред. Э. А. Лихачева. — М. : Медиа-ПРЕСС, 2017. — 176 с.
12. Герке К. М., Сайدل Р. К., Турунтаев С. Б. Влияние предпочтительных проводящих путей на вертикальный влагоперенос в зоне аэрации: экспериментальное исследование // Геоэкология. Инженерная геология. Геокриология. — 2010. — № 5. — С. 422–432.
13. Дьяконов К. Н. Геофизика ландшафтов. Метод балансов. — М. : Изд-во МГУ, 1988. — 95 с.
14. Егоров И. Е. Экзогенные геоморфологические процессы и методы их изучения. — Ижевск : Изд-во Удмурт. ун-та, 2017. — 384 с.
15. Жучкова В. К., Раковская Э. М. Методы комплексных физико-географических исследований. — М. : Акад., 2004. — 368 с.
16. Завадский А. С., Лобанов Г. В., Петухова Л. Н. [и др.]. Результаты стационарных исследований русловых процессов на реках ЕТР // Эрозионные и русловые процессы / под ред. Р. С. Чалова. — М. : Изд-во МГУ, 2010. — С. 220–251.
17. 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.
18. Кривцов В. А. Рельеф Рязанской области (региональный геоморфологический анализ). — Рязань : Изд-во Ряз. гос. пед. ун-та, 1998. 195 с.
19. Куракова А. А. Размывы пойменных берегов Оби и Иртыша и их связь с морфологией русла // Географический вестник. — 2022. — № 1 (60). — С. 40–59.
20. Никитин И. С., Плехов Л. Н. Формирование влажности осушаемых лугов окской поймы // Мелиорация земель Мещерской низменности. — М. : Изд-во Всесоюзного НИИ гидротехники и мелиорации, 1974. — С. 43–53.
21. Подземная охранная зона исторической территории Рязанского Кремля / под ред. Е. И. Романовой, А. Г. Купцова. — Рязань : Стил, 1995. — 138 с.
22. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства / ПНИИИС Госстроя СССР. — М. : Стройиздат, 1987. — 200 с.
23. Симонов Ю. Г. Основные проблемы климатической геоморфологии // Проблемы климатической геоморфологии. — Владивосток : Дальневост. науч. центр РАН, 1978. — С. 60–76.
24. Симонов Ю. Г. Геоморфология. Методология фундаментальных исследований. — СПб. : Питер, 2005. — 427 с.
25. Солодовников Д. А., Шинкаренко С. С. Гидрологические и гидрогеологические закономерности формирования речных пойм в бассейне среднего Дона в современных условиях // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47, № 6. — С. 719–728.
26. Чалов С. Р. Русловедение: теория, география, практика. — М. : КРАСАНД, 2019. — Т. 3 : Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. — 640 с.
27. Charlton R. Fundamentals of fluvial geomorphology. — L. : Routledge, 2008. — 234 p.
28. 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. — Pp. 631–646.
29. Duval T. P., Hill A. R. Influence of base flow stream bank seepage on riparian zone nitrogen biogeochemistry // Biogeochemistry. — 2007. — Vol. 85, iss. 2. — Pp. 185–199.
30. Fox G. A., Heeren D. M., Miller R. B. [et al.]. Flow and transport experiments for a streambank seep originating from a preferential flow pathway // Journal of Hydrology. — 2011. — Vol. 403, iss. 3-4. — Pp. 360–366.

31. Hamshaw S. D., Bryce T., Rizzo D. M. [et al.]. Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning // *River research and Applications*. — 2017. — Vol. 33, iss. — Pp. 1354–1367.
32. Jugie M., Goba F., Vermoux C. [et al.]. 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. — Pp. 418–434.
33. Klösch M., Blamauer B., Habersack H. Intra-event scale bar-bank interactions and their role in channel widening // *Earth Surface Processes and Landforms*. — 2015. — Vol. 40. — Pp. 1506–1523.
34. 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. — Pp. 380–391.
35. Palmer J. A., Schilling K. E., Isenhardt T. M. [et al.]. Streambank erosion rates and loads within a single watershed: Bridging the gap between temporal and spatial scales // *Geomorphology*. — 2014. — Vol. 209. — Pp. 66–78.
36. Stefanovic J. R., Bryan R. B. Experimental study of rill bank collapse // *Earth Surface Processes and Landforms*. — 2007. — Vol. 32, iss. 2. — Pp. 180–196.

References

1. *O realizatsii Ukaza Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 19.10.2022 no. 757 "O merakh, osushchestvlyayemykh v subyektakh Rossiyskoy Federatsii v svyazi s Ukazom Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 19.10.2022 no. 756": Postanovleniye gubernatora Ryaz. obl. ot 07.11.2022 no. 134-pg* [On the implementation of the Decree of the President of the Russian Federation of 19.10.2022 no. 757, "On measures taken in the constituent entities of the Russian Federation in connection with the Decree of the President of the Russian Federation of 19.10.2022 no. 756": Resolution of the Governor of the Ryazan Region dated 07.11.2022 no. 134-pg]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/6200202211110011> (accessed: 03.12.2023). (In Russian).
2. Bazhenova O. I. Siberian school of experimental geomorphology. *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and natural resources]. 2018, iss. 2, pp. 23–32. (In Russian).
3. Baryshnikov N. B. *Problemy morfologii, gidrologii i gidravliki poym* [Issues of morphology, hydrology and hydraulics of floodplains]. St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2012, 426 p. (In Russian).
4. Belyakov A. A., Berkovich K. M. The Oka River: problems and prospects for reconstruction. *Eroziyonnyye i ruslovyye protsessy* [Erosion and channel processes]. Moscow, Moscow State University Publ., 2005, vol. 4, pp. 251–273. (In Russian).
5. Berkovich K. M., Zlotina L. V., Turykin L. A. Natural and anthropogenic transformations of the Oka River bed in the Ryazan Region. *Geomorfologiya* [Geomorphology]. 2009, iss. 2, pp. 26–32. (In Russian).
6. Beruchashvili N. L., Gordeziani T. P., Dzhambashvili N. Sh., Maglakelidze R. V. Martkopi station: changes in the natural environment and conceptual ideas. *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and natural resources]. 2006, iss. 3, pp. 149–155. (In Russian).
7. Vinogradova N. N., SamoiloVA A. A. Changes in the coastal zone of the Mozhaisk reservoir depending on water level fluctuations. *Priroda rechnykh dolin tsentra Russkoy ravniny* [The nature of river valleys in the center of the Russian Plain]. Moscow, Moscow Branch of Soviet Geography Society Publ., 1978, pp. 36–46. (In Russian).
8. Volchek A. A., Natarova O. N. Changes in the annual distribution of water runoff in rivers of Belarus. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University]. 2018, iss. 52, pp. 67–78. (In Russian).
9. Vorobyov A. Yu., Kadyrov A. S. Field studies of retreating banks of the Oka River in 2014–2018 using the simple benchmark method. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin]. 2020, iss. 3 (54), pp. 30–45. (In Russian).
10. Vorobyov A. Yu., Kadyrov A. S., Lokteyev D. S., Burgov E. V., Balobina A. A. Calculation of seasonal erosion on the coastal slopes of the Oka River using geodetic methods. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Bulletin of the Russian Geographical Society]. 2023, vol. 155, iss. 2, pp. 25–43. (In Russian).
11. *Geomorfologiya gorodskikh territoriy: konstruktivnyye idei* [Geomorphology of urban areas: constructive ideas]. Ed. by E. A. Likhacheva. Moscow, Media-PRESS Publ., 2017, 176 p. (In Russian).
12. Gerke K. M., Saydl R. K., Turuntayev S. B. Influence of preferred conductive paths on vertical moisture transfer in the aeration zone: an experimental study. *Geoecologiya. Inzhenernaya geologiya Geocryologiya* [Geoecology. Engineering geology. Geocryology]. 2010, iss. 5, pp. 422–432. (In Russian).

13. Dyakonov K. N. *Geofizika landshaftov. Metod balansov* [Geophysics of landscapes. Balance method]. Moscow, Moscow State University Publ., 1988, 95 p. (In Russian).
14. Yegorov I. E. *Ekzogennyye geomorfologicheskiye protsessy i metody ikh izucheniya* [Exogenous geomorphological processes and methods of their study]. Izhevsk, Udmurt University Publ., 2017, 384 p. (In Russian).
15. Zhuchkova V. K., Rakovskaya E. M. *Metody kompleksnykh fiziko-geograficheskikh issledovaniy* [Methods of complex physical and geographical studies]. Moscow, Academiya Publ., 2004, 368 p. (In Russian).
16. Zavadskiy A. S., Lobanov G. V., Petukhova L. N. [et al.]. Results of stationary studies of channel processes on the rivers of the European Russian Region. *Erozionnyye i ruslovyye protsessy* [Erosion and channel processes]. Ed. by R. S. Chalov. Moscow, Moscow State University Publ., 2010, pp. 220–251. (In Russian).
17. Korableva O. V., Chernov A. V. Experience of monitoring channel deformations on wide-floodplain rivers (the Kerzhenets River). *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and natural resources]. 2008, iss. 2, pp. 158–165. (In Russian).
18. Krivtsov V. A. *Relyef Ryazanskoy oblasti (regionalnyy geomorfologicheskiy analiz)* [Relief of the Ryazan Region (regional geomorphological analysis)]. Ryazan, Ryazan State Pedagogical University Publ., 1998, 195 p. (In Russian).
19. Kurakova A. A. Erosions of the Ob and Irtysh floodplain banks and their relationship with the channel morphology. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin]. 2022, iss. 1 (60), pp. 40–59. (In Russian).
20. Nikitin I. S., Plekhov L. N. Formation of moisture content in drained meadows of the Oka floodplain. *Melioratsiya zemel Meshcherskoy nizmennosti* [Land reclamation of the Meshchera lowlands]. Moscow, All-Union Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation Publ., 1974, pp. 43–53. (In Russian).
21. *Podzemnaya okhrannaya zona istoricheskoy territorii Ryazanskogo Kremlya* [Underground security zone of the historical territory of the Ryazan Kremlin]. Ed. by E. I. Romanova, A. G. Kuptsov. Ryazan, Stil Publ., 1995, 138 p. (In Russian).
22. *Rekomendatsii po otsenke i prognozu razmyva beregov ravninnykh rek i vodokhranilishch dlya stroitelstva* [Recommendations for assessment and forecast of erosion of the banks of lowland rivers and reservoirs for construction]. PNIIS Gosstroy of USSR. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987, 200 p. (In Russian).
23. Simonov Yu. G. Major issues of climatic geomorphology. *Problemy klimaticheskoy geomorfologii* [Problems of climatic geomorphology]. Vladivostok, Far Eastern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 1978, pp. 60–76. (In Russian).
24. Simonov Yu. G. *Geomorfologiya. Metodologiya fundamentalnykh issledovaniy* [Geomorphology. Methodology of fundamental research]. St. Petersburg, Piter Publ., 2005, 427 p. (In Russian).
25. Solodovnikov D. A., Shinkarenko S. S. Hydrological and hydrogeological patterns of formation of river floodplains in the middle Don basin under modern conditions. *Vodnyye resursy* [Water resources]. 2020, vol. 47, iss. 6, pp. 719–728. (In Russian).
26. Chalov S. R. *Ruslovedeniye: teoriya, geografiya, praktika*. [River morphology: theory, geography, practice]. Moscow, KRASAND Publ., 2019, vol. 3: Anthropogenic impacts, hazards and management of channel processes, 640 p. (In Russian).
27. Charlton R. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London, Routledge, 2008, 234 p.
28. 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, pp. 631–646.
29. Duval T. P., Hill A. R. Influence of base flow stream bank seepage on riparian zone nitrogen biogeochemistry. *Biogeochemistry*. 2007, vol. 85, iss. 2, pp. 185–199.
30. Fox G. A., Heeren D. M., Miller R. B. [et al.]. Flow and transport experiments for a streambank seep originating from a preferential flow pathway. *Journal of Hydrology*. 2011, vol. 403, iss. 3–4, pp. 360–366.
31. Hamshaw S. D., Bryce T., Rizzo D. M. [et al.]. 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, pp. 1354–1367.
32. Jugie M., Goba F., Vermoux C. [et al.]. 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, pp. 418–434.
33. Klösch M., Blamauer B., Habersack H. Intra-event scale bar-bank interactions and their role in channel widening. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2015, vol. 40, pp. 1506–1523.
34. 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, pp. 380–391.
35. Palmer J. A., Schilling K. E., Isenhardt T. M. [et al.]. Streambank erosion rates and loads within a single watershed: Bridging the gap between temporal and spatial scales. *Geomorphology*. 2014, vol. 209, pp. 66–78.
36. Stefanovic J. R., Bryan R. B. Experimental study of rill bank collapse. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2007, vol. 32, iss. 2, pp. 180–196.

Информация об авторах

Кадыров Александр Сергеевич — техник-лаборант кафедры географии, экологии и природопользования Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

Сфера научных интересов: динамическая геоморфология, русловые процессы равнинных рек, осадконакопление в речных долинах, история заселения пойменных территорий, методика полевых геоморфологических исследований.

Воробьев Алексей Юрьевич — кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры географии, экологии и природопользования Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

Сфера научных интересов: динамическая геоморфология, палеогеография плейстоцена и голоцена окского бассейна, русловые процессы равнинных рек, осадконакопление в речных долинах, история заселения пойменных территорий, методика полевых геоморфологических исследований.

Information about the authors

Kadyrov Aleksandr Sergeevich — laboratory technician of the Department of Geography, Ecology and Nature Management, Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

Research interests: dynamic geomorphology, channel processes of lowland rivers, sedimentation in river valleys, history of settlement of floodplain territories, methods of field geomorphological studies.

Vorobyov Alexey Yuryevich — candidate of geography, senior lecturer, Department of Geography, Ecology and Nature Management, Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

Research interests: dynamic geomorphology, Pleistocene and Holocene paleogeography of the Oka River basin, river bed processes in lowland rivers, sedimentation in river valleys, history of settlement of floodplain territories, methods of field geomorphological studies.

Статья поступила в редакцию 13.06.2024; принята к публикации 11.07.2024.

The article was submitted 13.06.2024; accepted for publication 11.07.2024.