

УДК

РАСЧЕТ СЕЗОННОЙ ЭРОЗИИ НА БЕРЕГОВЫХ ОТКОСАХ РЕКИ ОКИ С ПОМОЩЬЮ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

© 2023 г. А. Ю. Воробьев^{a, *}, А. С. Кадыров^{a, **}, Д. С. Локтеев^{b, ***},
Е. В. Бургов^{c, d, ****}, А. А. Балобина^{a, *****}

^aРязанский государственный университет имени С.А. Есенина, Рязань, Россия

^bМосковский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

^cИнститут проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова Российской академии наук,
Москва, Россия

^dНИИ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: a.vorobyov90@mail.ru

**E-mail: alieksandr.kadyrov.93@mail.ru

***E-mail: lokteev@gmail.com

****E-mail: burgov.ev@yandex.ru

*****E-mail: balobina-anna@rambler.ru

Поступила в редакцию 07.02.2023 г.

После доработки 09.03.2023 г.

Принята к публикации 02.06.2023 г.

Среди опасных геоморфологических процессов на крупных равнинных реках выделяется направленный размыв их берегов. В среднем течении реки Оки – этого крупного притока реки Волги, горизонтальные русловые деформации вносят существенный вклад в региональную литодинамику и сокращение площади пойменных земель. Предпринятые нами полевые геолого-геоморфологические исследования долины выявили сложную фашиальную архитектуру поймы. В совокупности с неустойчивостью водного режима Оки в последнее десятилетие, это способствует снижению качества прогнозов боковой эрозии ее русла, в том числе в окрестностях г. Рязани. Для детальной оценки последствий дестабилизации береговых откосов нами была осуществлена съемка их поверхности с помощью тахеометра и съемки с БПЛА-аэрофотосъемкой. Регулярный контроль эрозии по сезонам гидрологического года обеспечил получение фактических данных о перераспределении почвогрунтов по высоте откоса. Установлено, что эрозия в летнюю межень втрое слабее, чем во время половодья, выявлено также преобладание обрушений самой верхней (0.0–2.0 м от дневной поверхности) части фронтов размыва. В статье также обсуждается неодинаковая роль факторов рельефообразования в мобилизации отложений на высотных уровнях берегов стационаров, происходящая из локальных различий плейстоцен-голоценовой эволюции морфолитосистемы поймы реки Оки и записи в ней геологической информации.

Ключевые слова: русло реки Оки, боковая эрозия, погребенные почвы, аллювий, половодье, аэрофотосъемка, AutoCAD

DOI: 10.31857/S0869607123020088, EDN: HDGYZZ

ВВЕДЕНИЕ

Динамика рельефа на всех уровнях флювиальной системы реки Оки, входящей в волжский бассейн, по праву может считаться одной из центральных проблем устойчи-

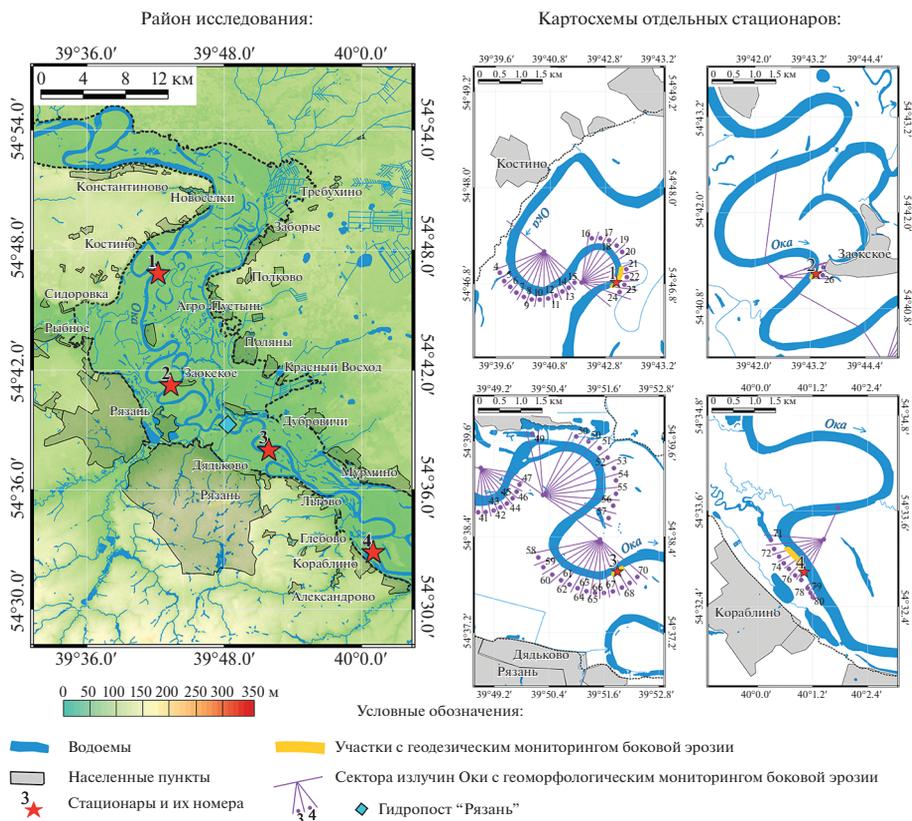


Рис. 1. Район исследования и ключевые участки стационарных наблюдений боковой эрозии русла реки Оки.

Fig. 1. Research region and key fragments for stationary observations of lateral erosion in the Oka riverbed.

ности ландшафтов в густонаселенном центре Русской равнины. В рамках морфолито-системы днища долины [28, с. 16] наиболее активное рельефообразование наблюдается в русловом ложе и на границе русла и поймы, в то время как большие площади пойменных массивов, удаленные от русла, представляют собой участки с медленной аккумуляцией аллювия. Управление природными ресурсами основывается на их оценке и прогнозе, при этом в средней части (748–340 км от устья Оки) окского бассейна (рис. 1) морфология поймы и русла подвергается [6, с. 14; 7, с. 35; 15, с. 149] существенным изменениям в последние десятилетия. Очевидные изменения береговой линии обусловлены боковой эрозией русла и направленной аккумуляцией аллювия на отмытых берегах. Наблюдения за процессами моделирования прируслового рельефа могут предоставить ценную информацию о доступности геологических, почвенных и биологических ресурсов окской поймы. Этим они отличны от мониторинга рельефообразования на центральной и притеррасной пойме, где мощность естественных геоморфологических процессов диффузно распределена [15, с. 145; 38, с. 294], а точечные изменения связаны с антропогенным вмешательством в геолого-геоморфологические компоненты ландшафта.

К числу необходимых элементов методологии исследований в разработке вопроса периодичности и масштабов регионального рельефообразования принадлежит [10,

с. 304; 11, с. 225; 14, с. 160; 39, с. 1355; 41, с. 420] мониторинг эрозионно-аккумулятивных процессов на геоморфологических стационарах. Многие комплексные стационары в нашей стране имеют ряды наблюдений в несколько десятилетий, ценность контроля короткопериодной динамики природных процессов в ходе их работы является общеизвестной. Приуроченность стока воды и наносов на реках окского бассейна к сезонам гидрологического года определяет значительный потенциал организации геоморфологических исследований с периодом наблюдения до года и более. Ранее (в 2014–2022 гг.) нами были предприняты [7, с. 31] полевые измерения скорости боковой эрозии на ряде учетных площадок размываемых пойменных берегов. Осуществленные с помощью традиционного [10, с. 195; 30, с. 480; 38, с. 155; 43, с. 794] для геоморфологии метода реперов, эти исследования предоставили количественную информацию о скорости боковой эрозии. На основе актуальной информации была оценена стабильность откосов в период неустойчивого [9, с. 19] весеннего стока в бассейне Верхней Волги.

Между тем, в настоящее время фиксируется стабильный рост интереса к геодезическим методам и расчетам во флювиальной геоморфологии. Расширение методологии наблюдений динамики рельефа за счет упомянутых подходов началось [43, с. 801], по меньшей мере, 30–35 лет назад. Благодаря доступности самих БПЛА и специализированного программного обеспечения за последние годы увидели свет сотни публикаций, в которых посредством автоматизированных методов рассматриваются [4, с. 18; 20, с. 40; 27, с. 46; 33, с. 1220; 39, с. 1360; 44, с. 385] последствия сезонной активности откосов вообще, не только речных уступов. В настоящем исследовании мы представляем первичные результаты геодезической съемки береговых откосов реки Оки – элементов пойменно-руслового рельефа, подверженных воздействию целого комплекса геоморфологических агентов. Модели функционирования речных подсистем эрозионно-русловых систем крупных рек предполагают [10, с. 241; 32, с. 482; 37, с. 591; 46, с. 4670] преимущественный размыв берегов в процессе горизонтальных русловых деформаций, отводя оползневым, суффозионным и антропогенным рельефообразующим процессам второстепенную роль. Частичная консервация фронтов размыва нередко фиксировалась нами в 2014–2020 гг., но в 2021–2022 гг. объем весеннего стока Оки вырос и половодья на реке в это время года снова стали достигать [1] уровня руслонаполнения.

Пойменная фация аллювия на средней Оке отличается повышенной мощностью, поскольку в течение всего голоцена такие расширения днища долины, как Рязанское, представляли [2, с. 11; 31, с. 158] крупные локальные депо наносов. Определение [2, с. 9; 3, с. 665; 16, с. 62] радиоуглеродного возраста погребенных почв и старичных линз доказало циклический (прерывисто-динамический [24, с. 18]) характер эволюции окской поймы. В составе пойменных суглинков местами встречаются педолитокомплексы из 3–6 погребенных плейстоцен-голоценовых почв. Ввиду этого, вклад литологического фактора в изменчивость эрозии откосов должен быть высок, причем как в латеральном, так и в вертикальном направлении.

Стационарные исследования не являются единственной формой добычи новой информации о факторах горизонтальных русловых деформаций – ценные результаты были получены [18, с. 55; 22, с. 201; 29, с. 80; 38, с. 173; 46, с. 4773] в ходе камеральных и натурных экспериментов. Однако быстрое совершенствование качества съемки беспилотных летательных аппаратов в 2010-е годы на несколько порядков увеличивает объемы информации, поступающей исследователю, нежели при использовании традиционных подходов. На стационаре “Дядьково”, в отношении которого мы располагаем наиболее представительными геоморфологическими данными, аэрофотосъемка поверхности окского берега позволила получить информацию о морфолитодинاميце как всего фронта размыва, так и отдельных его стратиграфических горизонтов. Основывающиеся на ней выводы о причинно-следственных связях морфолитодинاميки

берегов могут быть развиты в самостоятельное направление исследований на границе геоморфологии, гидрологии, почвоведения и палеогеографии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Четыре учетных площадки на фронтах размыва берегов реки Оки имели протяженность 100–500 м каждая и были заложены в Рязанском расширении днища окской долины (рис. 1). Стационары в пойменной морфолитосистеме были организованы на эрозионных берегах излучин разной формы и степени развития. На тех участках русла, где оно относительно спрямлено, наблюдения не велись ввиду медленного рельефообразования и риска добычи данных, неудовлетворительных по объему и качеству информации. Основные фактически результаты исследования приводятся для учетной площадки “Дядьково” и отражают изменения морфологии откоса с летней межени 2020 года по осень 2022 года. Еще для трех стационаров рассматриваются главные черты микрорельефа на откосах по состоянию на 2022 год. Описания актуального состояния морфологии береговых уступов опираются на известную [8, с. 92] типизацию фронтов размыва, принятую в первичном визуальном определении преобладающей формы переноса обломочных отложений на откосе.

Следует отметить, что поймы крупных рек часто представляют совокупность элементарных единиц [17, с. 180; 30, с. 375; 35, с. 151] геоморфологического районирования – морфологических комплексов рельефа. В отношении рязанского участка днища окской долины это более чем справедливо, поскольку ранее нами были выделены [15, с. 149] типы таких комплексов локального уровня (ЛМК). Четыре стационара, на которых нами осуществляется мониторинг боковой эрозии окского русла, в этом контексте соответствуют эрозионно опасным участкам сегментно-гривистых ЛМК разных генераций и ЛМК выровненной (наложенной) поймы. Комплексы рельефа выровненной поймы имеют неординарное для днищ речных долин геологическое строение, поскольку пойменная фация аллювия подстилается суглинистой мореной, по всей видимости, днепровского возраста. Фациальная архитектура сегментно-гривистых ЛМК подходит под классическую схему [31, с. 189] аллювиальных отложений Е.В. Шанцера “русловые пески – пойменные суглинки”, разработанную, в том числе, и на основе исследований в долине реки Оки.

Преимущества аэрофотосканирования связывают не только с возможностью формирования точных (до первых сантиметров) цифровых моделей рельефа (ЦМР), но и с реализацией маркшейдерских операций по расчету объема земляных работ. Под “земляными работами” в нашем случае понимается эрозионная активность русла реки Оки во время половодья и сложный комплекс геоморфологических процессов, имеющих место [6, с. 10; 10, с. 290; 37, с. 591] сразу после него и во время летней межени на крутых речных берегах. Известным недостатком традиционных геоморфологических методов является [11, с. 240; 27, с. 50; 41, с. 425] дискретность выходных данных, аэрофотосканирование его лишено, поскольку растр ЦМР имеет значение для каждого пиксела [36, с. 219]. Однако при использовании автоматизированных методов аэрофотосъемки с помощью БПЛА на первый план выходят административные, погодные, обзорные и прочие ограничения. Все они вносят коррективы в выбор места для стационара и сроки полетов.

Геодезическая съемка 2020–2021 гг. основана на использовании квадрокоптера DJI Mavic Air 2, для получения координат точек на модели местности мы использовали опорные знаки на откосе, позиционирование которых определялось при помощи GNSS-приемника EFT M4 GNSS. В рамках оптимизации полевых работ сезонов 2022 года начата эксплуатация “дрона” DJI Mavic 2, оборудованного собственным GNSS-приемником. Один GNSS-приемник интегрирован в архитектуру дрона, является ровером и автоматически считывает фотособытие, записывая его координаты. Второй

GNSS-приемник располагается на земле и является базой с известными координатами. Оба квадрокоптера оснащены камерами на трехосевом подвесе-стабилизаторе с CMOS-матрицей 4/3. Для получения данных использовали одинаковое разрешение фотосъемки – 4000×2500 пикселей. Во время постобработки в программе Agisoft Metashape получали плотные облака точек, координаты которых высчитывались на основании координат опорных знаков (данные 2020–2021 гг.) или координат фотографий (2022 г). Позиционированное таким образом облако точек формирует модель в AutoCAD (модуль Civil 3D), среднее число точек в модели на стандартную площадь ключевого участка (6–7 га) – 27–29 млн. Разрешение полученных ЦМР достигает 1.3 см по горизонтали и вертикали, что позволяет осуществлять расчеты эрозии с высокой точностью – такой же, как при измерениях рулеткой [7, с. 35] единичных расстояний.

Из недостатков всех аэрометодов получения геоморфологически полезной информации, существенным является качественное содержание выходных данных – получение не ЦМР, а ЦММ (цифровых моделей местности). Кустарниковая и древесная растительность может создать [44, с. 384] ложную поверхность, которая, к тому же, не идентифицируется как высота лесного полога на высоте 1–2 яруса. Обработка ортофотопланов производилась в программе Agisoft Metashape. Некорректные точки на модели выбраковываются автоматически, но параметры процесса задаются вручную и требуют контроля оператора. Особое значение имеет соотношение участков открытого грунта и редкой травы, где рельеф снят достоверно, и выделов, где присутствует густая растительность (от травы до деревьев). Отметим, что стационары, задействованные в нашей работе, практически лишены кустарников и деревьев, встречаются лишь единичные виргинильные и молодые генеративные экземпляры *Salix alba*, *Populus tremula* и *Betula pendula*. Отсутствие старовозрастных деревьев – свидетельство более мощных [9, с. 20] окских половодий в XX веке–начале XXI века, приводивших [21, с. 30] к активной эрозионной динамике откосов.

Тем не менее, методика нашего исследования учитывала сезонность годового хода уровней и расходов Оки – съемка откосов осуществлялась после спада половодья и в конце летне-осенней межени. Каждая из учетных площадок разделена на отрезки меньшей протяженности, не является исключением в данном контексте и ключевой участок “Дядьково”. Шесть отрезков на ортофотопланах протяженностью по 50 м длины фронта размыва, здесь обособлены (рис. 2). Отрезки № 1–3 соответствуют приподнятой наложенной пойме, а сегментно-гривистая генерация пойменного рельефа фрагментирована на отрезки № 4–6. Для данной учетной площадки выполнены расчеты смещения плоскости откоса на различных интервалах абсолютной высоты, от 97.5 м до 90.0 м. Информация о скоростях эрозии послужила основой для 3D-графиков, выполненных в виде проективного покрытия в STATISTICA 10.0 (рис. 3). Также представляются ортофотопланы, фиксирующие состояние береговых откосов на прочих учетных площадках в 2022 г. (рис. 2).

Одной из задач более масштабных работ по установлению причинно-следственных связей динамики берегов был прогноз их деформаций в будущем. С этой целью съемка надводной части откосов дополнялась гидрографическими изысканиями, поскольку прогнозирование боковой эрозии речных берегов включает [26, с. 146] определение ассиметрии поперечного сечения русла и распределения в нем глубины (рис. 4). Для каждого ключевого участка строились три поперечных профиля русла Оки (на входе и выходе в участок, а также по центру) с помощью эхолота и геодезического оборудования. Среди профилей в настоящей работе для анализа полученных результатов привлечены съемки руслового ложа на стационаре “Дядьково” в 2022 году.

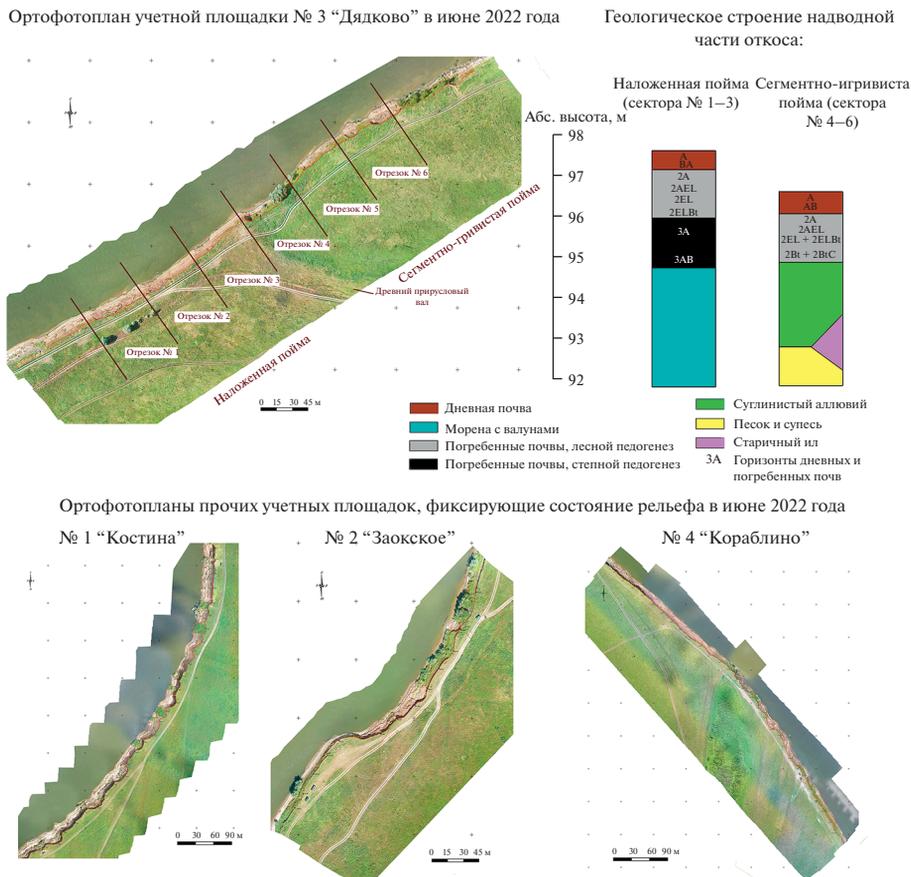


Рис. 2. Ортофотопланы с изогипсами (ЦМР) учетных площадок и геологическое строение площадки Дядково.

Fig. 2. Orthophotomaps with isohypses (DEM) of accounting stations and the geological structure of the Dyadkovo station.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Значимым фактором морфолитодинамики на эрозионных берегах является [6, с. 5; 8, с. 91; 12, с. 162] высота берега (расстояние от уреза воды до пойменной бровки). В нашем случае, даже на относительно небольших по площади стационарах, высота берега заметно изменяется, что, так или иначе, обусловлено неодинаковым возрастом поймы. По гипсометрическому положению точки поверхности рельефа в пределах учетной площадки “Дядково” четко делятся на две группы: высотой 97.0–97.6 и 96.5–97.3 м. Первая из них соответствует наложённой пойме, выполненной суглинистыми и глинистыми грунтами, а вторая – сегментно-гривистому ЛМК, сложенному суглинками и песками. Можно было бы полагать, что высокий берег размывается медленнее, чем низкий, но это предположение лишь отчасти справедливо только для отрезка № 1 (рис. 3). В прибровочной части поймы скорость эрозии на отрезке достигает 1.1 м/год, но в среднем колеблется в пределах 0.7–0.9 м/год. За период с осени 2020 г. по осень 2022 г. морфологически наиболее четко боковая эрозия проявилась на другом конце

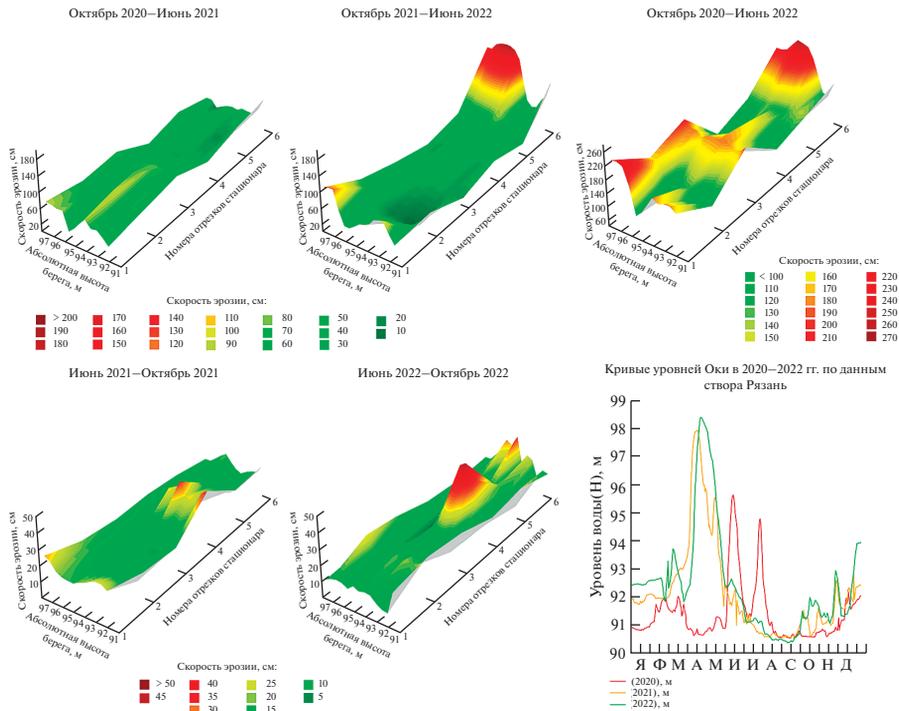


Рис. 3. Трехмерные проекции скоростей отступления откоса на площадке Дядьково по сезонам мониторинга и ежегодные уровни Оки.

Fig. 3. Three-dimensional projections of slope retreat rates at Dyadkovo station based on seasonal observations and annual levels of the Oka river.

площадки – отрезке № 6. Каждый год фиксируется устойчивое углубление полноводным потоком выемки в откосе, на сегодняшний день объем ее достигает $280\text{--}300\text{ м}^3$. За год берег здесь смещается в сторону поймы на $1.3\text{--}1.5\text{ м}$.

Относительно стабильные участки откоса приурочены к отрезкам № 4 и № 5. Берег откоса здесь ровный, представлен одним элементарным уклоном или осложнен нишами на уровне $92.0\text{--}94.5\text{ м}$, что характерно для отрезка № 5. Берма – низкая площадка на уровне ниш, существует с 2016 года, за прошедшие сезоны она развивалась с неодинаковой скоростью. Мониторинг с помощью БПЛА не выявил резких проявлений рельефообразования в этой позиции в 2020–2022 гг. На ортофотоплане заметно, что берег на отрезке № 4 частично покрыт кустарниковой и древесной растительностью, ему соответствуют наименьшие скорости эрозии, обычно $0.3\text{--}0.4\text{ м/год}$. Однако в средней части берега наблюдается незначительный, но устойчивый экспорт почвогрунтов в период летне-осенней межени. Интенсивность его достигает порядка $0.08\text{--}0.12\text{ м}^3/\text{мес}$. Скорость смещения плоскости откоса при этом колеблется в интервале $0.05\text{--}0.12\text{ м/мес}$. Показательно, что остальные фрагменты берега в маловодный период года относительно стабильны – скорость боковой эрозии находится в пределах точности измерений для традиционных геоморфологических методов и не превышает 0.5 метра за сезон.

В границах уступа наложенной поймы активнее всего берег отступает в приривочной части, на отметках абсолютной высоты $96.0\text{--}97.6\text{ м}$. Скорость эрозии в интервале

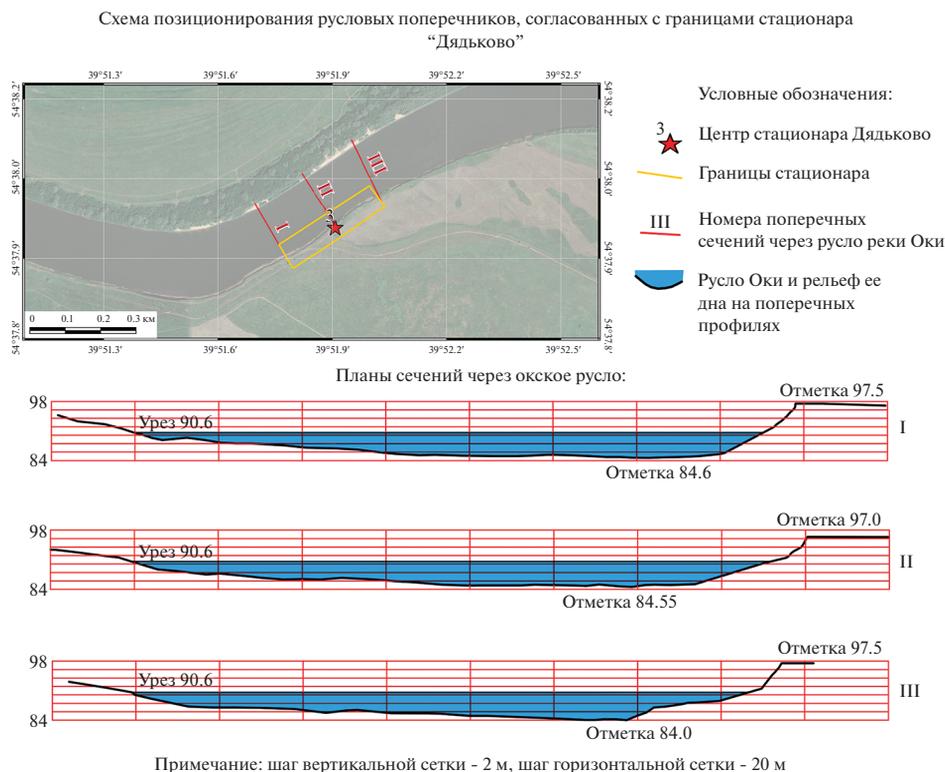


Рис. 4. Поперечные профили через русло Оки на стационаре “Дядьково”.

Fig. 4. Transverse profiles across the Oka riverbed at the Dyadkovo station.

первых 0–1.5 м от дневной поверхности поймы здесь достигает 0.7–1.0 м/год. На 3D-графиках можно легко видеть, что для плоскости откоса на отрезке № 3 характерно проявление разрушения берега, весьма равномерно распределенное по высоте. Практически во всех пачках отложений поддерживается скорость эрозии около 0.9 м/год. Пространственная организация рельефообразования на отрезке № 1 более сложная – помимо верхней части откоса активная эрозия отмечается и для его основания. Ниша, похожая по форме на аналогичное образование в отрезке № 5 уступа сегментно-гривистой поймы, хорошо различима на ортофотоплане. Объем обеих ниш также примерно одинаков (около 120–140 м³), но выемка на отрезке № 1 является более молодой. Начало ее формированию положило половодье 2022 года, на фоне которого плоскость откоса отступила на 0.9–1.0 м в данной позиции. В летне-осеннюю межень эрозия продолжила активную обработку поверхности, углубив нишу еще на 0.2–0.3 м.

Помимо неоднородности мощности геоморфологического процесса по координатам геопространства, значимого [28, с. 21; 35, с. 148] для понимания внутренних закономерностей массопереноса в нем, площадные и объемные характеристики рельефообразования также используются для описания изменчивости неровностей земной поверхности. При всей разнице морфологии отрезков откосов, расчет объемов перемещенных почвогрунтов в Civil 3D однозначно свидетельствует об устойчивости мощности рельефообразования на протяжении всего стационара. Средние значения экспорта почвогрунтов на наложенной пойме достигают 26.2 м³/50 м весной и 8.6 м³/50 м

летом. Уступ сегментно-гривистой поймы разрушается несколько быстрее — для него получены значения $27.6 \text{ м}^3/50 \text{ м}$ и $10.2 \text{ м}^3/50 \text{ м}$ соответственно. Всего на стационаре объем эродированных пород за 2020–2022 гг. составил 2670 м^3 , при этом экспорт обломочного материала на 1 м откоса достигает $4.44 \text{ м}^3/\text{год}$. До 52% от общего объема почвогрунтов было экспортировано из уступа сегментно-гривистой поймы, а 48% — древнего выровненного участка на морене. В целом, вклад летней эрозии был меньшим именно на наложенной пойме (23.2%), чем на отрезках № 4–6 (25.4%). Площадь дневной поверхности поймы на последних уменьшилась на 279.6 м^2 , в то время как на отрезках № 1–3 — на 208.4 м^2 . Безвозвратная потеря земель отмечалась, преимущественно, после прохождения половодья (весенняя эрозия обеспечивает 80.5% вклада в потери), и лишь пятая часть от уничтоженных пойменных угодий теряется в ходе летне-осеннего рельефообразования.

Съемка руслового дна на учетной площадке “Дядьково” свидетельствует о довольно неоднородном его рельефе (рис. 4) по длине водотока. Первый створ на входе в площадку представляет резко ассиметричное русло. При ширине потока 180 м, линия максимальных глубин ($H_{\max} = 5.5 \text{ м}$) отдалена от размываемого берега всего на 30 м. Выявлено наличие крупной русловой макроформы в середине ложа, относительная высота которой достигает 1.5–2.0 м. Началу отрезка № 4 соответствует русло аналогичной ширины, сходное по симметрии ложа. Измерения через каждые 3–5 м длины профиля свидетельствуют о развитом грядовом рельефе дна. Построение третьего профиля на выходе из стационара показало наличие мелководья у подводного основания наблюдаемого откоса. Ширина отмелого (глубины 1.5–3.0 м) слабонаклонного участка составляет около 25 м, он резко обрывается уступом высотой до 3.5–4.0 м к тальвегу. Мелкомасштабная визуализация общего профиля берега свидетельствует о четырех–пяти его элементарных уклонах на третьем створе, трех уклонах на втором и одном–двух уклонах на первом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные геоморфологические исследования свидетельствуют о преобладающей роли собственно русловых процессов в преобразовании морфологии эрозионных берегов Оки. Разрушение берегов в мае–июне происходит не только при непосредственном удалении обломочного материала течением. В зарубежной и отечественной литературе неоднократно описывался [11, с. 230; 23, с. 90; 34, с. 90; 46, с. 4673] механизм и приводятся примеры оползания и отседания блоков аллювия, насыщенных влагой после спада половодья. Наша методика, к сожалению, не позволяет разделить два, по сути, разных процесса, поскольку мобилизация подтопленных склонов под действием силы тяжести является стохастическим процессом, предсказание которого обычно затруднено. Для этого либо классифицируют [40, с. 130] откосы по степени уязвимости к оползанию, либо используют [42, с. 1510] непрерывные записи видеоканалом. В любом случае, в начальной фазе половодья поток осуществляет насыщение влагой надводной части откоса, как за счет боковой фильтрации, так и посредством повышения уровня грунтовых вод и активизации капиллярного подъема влаги. Поэтому склоновые процессы, наблюдающиеся в короткий промежуток времени (до 1–2 нед.) после спада паводковой волны, можно считать инспирированными русловой динамикой в “активное время” пойменной морфолитосистемы, не обособляя их в рамках единого процесса размыва берега.

Среди прочих агентов рельефообразования выделяется антропогенный морфолитогенез, четко проявляющийся на отрезке откоса № 4. Ложбина, которой заканчивается ЛМК сегментно-гривистой поймы около наложенного прируслового вала (рис. 2), обрывается здесь в русло. К этому месту приурочен спуск к воде, часто посещаемый ры-

баками и отдыхающими. В летне-осеннюю межень это приводило к смещению положения берега на 0.3–0.6 м за сезон, преимущественно на высоте 2.5–3.5 м над урезом, поскольку здесь постоянно обновлялись ступеньки на спуске. Если принять, что в естественных условиях летом на отрезке № 4 должны были бы наблюдаться скорости эрозии 0.0–0.1 м/сезон, то положительные отклонения на проекции целиком обеспечены антропогенной эрозией. Она привела к экспорту, по меньшей мере, 46–50 м³ почвогрунтов в 2021 г. и втрое большего объема в последнем году мониторинга. Рекреационная нагрузка на рельеф в пределах учетной площадки пространственно сжата и проявляется точечно. На других отрезках откоса спуски к воде отсутствуют, лишь на урезе реки возможно удаление пород при посещении его отдыхающими.

Признав за флювиальным рельефообразованием главенствующую роль, что и ожидалось для подмываемого берега крупной реки, обратимся к двум группам факторов, определяющих динамику русловых процессов – динамическим и статическим. Под первыми понимают [6, с. 7; 32, с. 117] сток наносов и воды, а в рамках второй группы основное значение имеет литология деформируемой формы рельефа. Водный режим реки Оки регулируется синоптическими процессами в пределах ее бассейна, определяющих форму кривой гидрографа. Традиционно [7, с. 32; 9, с. 8] выделяются фазы повышенной водности: весеннее половодье (март–май) и осенние паводки (октябрь–ноябрь). Наименьшие расходы и уровни наблюдаются в летнюю (июнь–сентябрь) и зимнюю межень. Последние 20–30 лет отмечены существенными изменениями как в роли источников питания Оки, так и в распределении стока по сезонам. По некоторым оценкам [9, с. 8], существенно увеличилась зимняя и летняя водность, в отдельные годы весной через створы в нижнем течении Оки проходит менее 50% объема годового стока. Перераспределение стока и неустойчивость уровенного режима не замедлили сказаться на эрозионном потенциале берегов – продолжительность руслонаполнения в период нашего мониторинга колебалась от нуля дней в 2020 г. до 18–25 дней в 2022 г. Промежуточное положение занимает половодье 2021 года с повышением уровня Оки до пойменной бровки и выше в течение 10–15 дней.

Сложный ход половодья 2021 года выражен в двух пиках уровней и расходов, отмечавшихся у стационара “Дядьково” в течение апреля и в мае. Второй максимум расходов, который традиционно связывают с отдачей поймой воды и с верховодным подземным питанием, был обеспечен еще и выпадением жидких атмосферных осадков в бассейне Оки. Руслонаполнение достигалось только в апреле, в середине же следующего месяца уровень реки поднялся до отметок 95.0–95.5 м, на 3.0–3.5 выше меженного уреза. Именно к этому интервалу высоты откоса приурочена наиболее заметная эрозия, которую можно объяснить вторичным механическим воздействием потока на уже насыщенные влагой почвогрунты берега. Неоднородный его гранулометрический состав, наличие в нем как частиц коллоидной размерности, так и валунов, щебня и песка, негативным образом отражается здесь на устойчивости уступа. Во многих моделях разнородный механический состав откоса считается [22, с. 190; 34, с. 191; 38, с. 371; 40, с. 130] фактором риска его мобилизации. Проводя контроль эрозии, за последние годы мы неоднократно отмечали выпадение крупных валунов в основании наложенной поймы, даже после низких половодий. Крупный кластический материал при этом увлекал за собой окружающие его массы грунта. Это привело к повышенной интенсивности эрозии на высоте до 3 м над урезом Оки, соответствующей уровню руслонаполнения на втором пике половодья.

Эрозионная работа волны паводка 2022 года оставляла следы иного рода в морфологии откосов – закладывались или разрабатывались уже существующие отрицательные формы, осуществлялась фрагментация поверхности склона. Фиксировалось образование, тем не менее, выемок, а не классических фестонов. Последние настолько часто встречаются на эрозионных окских берегах, как это видно на ортофотопланах ключевых участков “Костино”, “Заокское” и “Кораблино” (рис. 2), что их наличие на

фронтах размыва являются скорее правилом, чем исключением. Однако, в основном, фестоны встречаются в пределах ЛМК относительно молодой сегменто-гривистой поймы, на уступах же выровненных пойменных массивов, чаще фиксируются стенки обрушения, образующие прямоугольные в плане выемки. Об этом свидетельствует приведенное выше несоответствие потери земельных угодий на отрезках № 4–6 и № 1–3. На последней группе отрезков убыль площади земель меньше на 25%, чем на первой, надводная часть откоса наложенной поймы при этом не выполаживается, а сохраняет постоянную крутизну в интервале 45° – 60° .

Пойменные массивы являются [36, с. 150] объемными телами, и считается [20, с. 40; 33, с. 1220; 44, с. 385], что ЦМР могут предоставить достоверную информацию об их эрозии, а расчеты по топографическим картам осуществляются с неизбежными искажениями. При неустойчивом водном режиме Оки в последние десятилетия опора на топографическую основу, казалось бы, целесообразна только в контексте оценочных расчетов среднесрочной динамики рельефообразования. Однако подобные расчеты, воспроизведенные [6, с. 66] ранее для фронтов размыва ряда излучин Оки, в том числе, Дубровичской, опровергают это предположение. Установлено, что средние скорости отступления пойменной бровки в 1920–1970-х гг. на меандрах со степенью развитости около 2 (такой же, как у Дубровичской излучины) составляли около 1.0–3.0 м/год. На устойчивость динамики рельефообразования не оказывает влияние даже снижение мощности половодий. Данные о максимальных уровнях Оки на створе “Рязань” составляют [9, с. 15] ряд продолжительностью более 80 лет инструментальных наблюдений. Основываясь на них, мы установили, что половодья 2020–2022 гг. имеют обеспеченность по уровням всего 64–95%. Тем не менее, рельефообразование осуществляется со скоростью, которую можно было бы ожидать еще в начале 2000-х годов, что объясняется высокой резистентностью геологического наполнения откоса к эрозии, отражающейся в П-образной форме Дубровичской излучины. Используя классификацию [32, с. 340] русел по степени устойчивости Р.С. Чалова, откос на всей учетной площадке следует признать устойчивым, со слабой интенсивностью русловых деформаций.

Высота берега, как отмечается в работе [6, с. 12], может двояко влиять на его предрасположенность к обрушению: при слишком большой высоте склон вероятнее мобилизуется под действием силы тяжести, но и низкие берега часто размываются [18, с. 53; 26, с. 114] – катастрофически. Отметим также, что в прибрежной части откоса сдвигающая сила достигает [38, с. 262] наибольших значений, поэтому верхние части уступа на учетной площадке должны разрушаться особенно быстро. Данная закономерность четко проявлена на 3D-графиках обобщенной эрозии откоса наложенной поймы, обладающего большой крутизной. По-видимому, здесь имеется превышение критической высоты берега и при намокании слагающих его грунтов и увеличении их удельного веса происходит мобилизация берегового наполнения. Отметим, что полевые измерения влажности и прочих геотехнических свойств грунтов могут быть основой для самостоятельного направления исследований в области реологии откосов окских берегов.

Подводная часть берегового склона на первом створе, расположенном выше всего по руслу, по крутизне приближается к углу естественного откоса [22, с. 79] для мокрых суглинков (около 30°). По всей видимости, русло, по крайней мере, в своей глубокой части, врезано в морену, причем динамическая ось потока в межень здесь приближается довольно близко к берегу. При руслонаполнении не происходит существенного расширения смоченного периметра, скорее всего, стрежень смещается к выпуклому берегу Дубровичской излучины, в центр русла. На плане это русловые сегменты слева от крупной формы донного рельефа. Наши аэрологические исследования [21, с. 57] непосредственно во время половодий позволяют утверждать, что переливания воды на правый берег Оки здесь не наблюдается, следовательно, на наложенной пойме ста-

ционара нет и взаимодействия пойменного и руслового потоков. Ложбина на секторе № 4, наоборот, служит каналом, по которому осуществляется такое взаимодействие. Тем не менее, по причине задернованности поверхности возникающий пойменный поток не производит в ложбине существенной эродирующей работы. Второй створ, начинающийся в ней, обнаруживает плавный переход меженного смоченного периметра в береговой уступ. Здесь развит бечевник шириной до 3–4 м. В основании пойменного уступа залегают илисто-алевритовые осадки старичного типа, ниже уреза Оки они переходят в русловые пески, формирующие пологий подводный откос.

Генезис мелководного участка у правого берега Оки на третьем, расположенном на выходе из стационара, русловом поперечнике неясен. Фактически, это затопленный бечевник, морфологически четко выраженный в виде отдельной ступени руслового рельефа на отметках абсолютной высоты около 88.0 м. Ввиду отсутствия на настоящий момент массовых данных о механическом составе местного мелководья, предполагается сложение данного участка консолидированным тонкодисперсным материалом. Резкие геометрические контуры несвойственны [17, с. 91; 22, с. 96; 42, с. 1510] песчаным грунтам, тем более в разжиженном состоянии, поэтому можно предположить наличие крупной линзы старичных илов в основании берега. Несмотря на то, что по классификации М. Гендельмана [8, с. 91] откос на отрезках № 5–6 можно отнести к типу откосов обрушения (тип 3), рассмотрение морфологии всего руслового склона предполагает выделение здесь прикрытого размыва (тип 5). Прикрывает откос от эрозии не оползень, что встречается достаточно часто в рамках данного таксона классификации, а структура дна. Она может иметь и русловое происхождение, являясь остановившейся песчаной грядой, типа причленившегося к берегу побочня. Более вероятно, однако, вариант сохранившегося от позднейшего размыва реликта голоценового рельефообразования.

Прерывисто-динамическая эволюция пойменной части окской долины отражается в интенсивности осадконакопления в основные фазы плейстоцена и голоцена. За последние 20 тыс. лет повышенная активность эрозионно-аккумулятивных процессов в пойменных частях речных долин на Русской равнине соответствовала [25, с. 524] периодам 18.0–12.5, 6.0–4.5, 3.0–2.0 тыс. лет назад. Выветривание кровли аккумулярованного аллювия днищ долин осуществлялось на фоне почвообразования, которое интенсивнее всего шло в интервалы 9.5–6.0, 4.5–3.0, 1.5–1.0 тыс. лет назад. Кроме того, на изменчивость границ природных зон и связанных с ними доминантных ландшафтов накладывалось местное своеобразие рельефа, в частности, высота его форм и их элементов, определяющая поемность и аллювиальность участков поймы. Во время эпох пойменного почвообразования аккумуляция наилка и поемность были сильно редуцированными либо вовсе прекращались. Большинство датировок голоценовых погребенных почв в долине Оки и в москворецкой пойме соответствуют [2, с. 6; 3, с. 664; 16, с. 63] атлантической фазе голоцена и периоду 2.6–1.0 тыс. лет назад. Встречаются и погребенные почвы, поверхность которых была перекрыта аллювием в суббореальную фазу голоцена.

На Дядьковском стационаре самая нижняя темноцветная почва педолитокомплекса наложенной поймы по морфологическим признакам соответствует лугово-черноземной почве голоценового оптимума. Гумусовые горизонты морфологически сходных почв из разрезов средней Оки имеют [2, с. 6; 3, с. 664; 16, с. 63] радиоуглеродный возраст, соответствующий атлантической фазе голоцена. Мощность прокрашенной гумусом толщи (горизонт 3А) достигает 1.2–1.5 м (рис. 4), причем верхняя погребенная почва серогумусового типа с развитым элювиальным горизонтом 2ЕL залегает на темноцветной почве без разрыва. Учитывая нечеткую границу между горизонтами 2ЕLвt и 3А, можно предположить развитие серой лесной почвы в верхней части лугово-черноземной по механизму стирающей эволюции. На более молодой сегментно-гравистой пойме стационара представлена только одна погребенная почва – серая

лесная. Представляется, что время формирования ее на всех отрезках стационара совпадает, но на отрезках № 4–6 профиль данной почвы – полноразвитый (представлены горизонты 2A, 2AEL, 2EL, 2ELBt, 2Bt, 2BtC).

Возраст поймы непосредственно влияет на динамику боковой эрозии руслового уступа стационара, что можно видеть на графиках (рис. 3). Наименьшие скорости разрушения откоса наложенной поймы приурочены к уровню залегания темноцветной погребенной почвы. Прохождение половодий и рельефообразование в летнее время обеспечивает отступление плоскости откоса на этом уровне всего на 0.2–0.6 м за сезон. Почвенно-литологическими факторами подавления мобилизации откоса, вероятно, выступают высокая степень оструктуренности материала в педах, его уплотнение под весом вышележащих грунтов и тяжелый гранулометрический состав материнской породы. Современные черноземовидные почвы вне днищ долин также демонстрируют [19, с. 185] низкую смываемость осадками по причине наличия водопрочной структуры. Между тем, неизвестно, насколько выявленная нами закономерность достоверна. Нельзя исключить также вариант недостаточной продолжительности наших наблюдений, возможно, что при многолетнем мониторинге с большим пространственным охватом будет установлена второстепенная роль почвообразования в древних лесостепных условиях для сохранения берегов реки Оки от разрушения.

Наличие мощного профиля погребенной серой лесной почвы на отрезках № 4–6 наоборот, проявляется в усиленной эрозии и формировании выемки, особенно на уровне горизонтов 2AEL–2BtC. Разделение горизонта 2Bt на текстурные отдельности способствует проявлению процесса их отседания по магистральным трещинам, а выветрелый материал осветленного горизонта легко осыпается. Примечательно, что эрозия, инспирированная наличием реликтов древнего лесного педогенеза, проявляется во все фазы водного режима Оки, обеспечивая устойчивый приток твердофазного материала на бечевник и в русло водотока. Неустойчивой к размыву и склоновым процессам оказывается и аналогичная палеопочва на отрезке № 1. По всей видимости, резистентность к размыву пойменного суглинка, переработанного элювиально-иллювиальным процессом, снижается, хотя в сухом и неизменном состоянии она довольно высока, как показали [22, с. 175; 29, с. 81] результаты экспериментов. Для доказательства данного предположения применения одного лишь почвенно-морфологического метода недостаточно. Осуществленные геодезические наблюдения показали необходимость массового определения ряда физических свойств почвогрунтов на стационаре, отслеживании динамики некоторых из них (в первую очередь, влажности) в течение гидрологического года для выделения эволюционных предпосылок боковой эрозии надводной части откоса.

Несмотря на малое содержание органического вещества в голоценовых палеопочвах днища долины средней Оки ($C_{\text{общ}}$ обычно не более 2% [2, с. 9]), при чрезмерном экспорте материала гумусово-аккумулятивных горизонтов в поток могут существенно возрастать геоэкологические риски для пойменных биотопов. Органическое вещество погребенных почв состоит, преимущественно, из гуминовых кислот и угля, обладающих, по М.М. Кононовой [13, с. 219], высокой поглощательной способностью – до 500 мг-экв/100 г. Повышенным значением данного параметра отличаются и специфичные для степного педогенеза вторичные глинистые минералы. Поступление дополнительных порций органики и глин в поток, их депонирование в застойных зонах русла и низкой поймы при паводках способно обеспечить [45, с. 101] активную местную адсорбцию поллютантов (радионуклидов, тяжелых металлов).

Мощность горизонта А современных аллювиальных почв в пойме Оки достигает [5, с. 120; 23, с. 88] 0.5–0.6 м. Объем гумусированного древнего аллювия, залегающего ниже по разрезу, часто сопоставим с дневными почвами по запасам твердофазного вещества. Возраст эродируемых пойменных массивов в этом контексте играет значимую роль в прикладных прогнозах загрязнения поймы и русла Оки. Как показано на при-

мере отрезков № 4–6 Дядьковского стационара, аллювий молодых ЛМК включает, как правило, 1–2 палеопочвы, обладающих маломощными гумусовыми горизонтами. Аналогичные горизонты лугово-черноземных почв среднего голоцена, в несколько раз более мощные, при потере их наполнения на всем фронте размыва могут, на наш взгляд, инспирировать значительные геозекологические риски. Оценки подобных неочевидных следствий русловой морфолитодинамики в настоящее время далеки от реализации, но можно отметить, что потенциал их и прочих перечисленных тематических направлений определяется производительностью современных геодезических методов. Вне зависимости от исходных задач, интегрированная в полевые геоморфологические наблюдения на стационарах, автоматизированная съемка поверхности позволяет перейти к организации комплексных исследований для понимания особенностей целого ряда ландшафтных процессов, а не только морфолитодинамики рельефа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение рельефообразования на стационаре “Дядьково” с применением геодезических методов показало высокую эффективность контроля даже самых незначительных проявлений эрозии (в наномасштабе). При высоком разрешении выходных растров ЦМР и адекватном современном уровне их коррекции удалось подтвердить известные представления о преобладании эрозии в верхних частях русловых откосов. Установлено, что основание надводной части берега разрушается медленнее, причем на его устойчивость не оказывает существенного влияния наличие толщи моренных суглинков на трех из шести секторов откоса. Ежегодный объем экспорта почвогрунтов на стационаре составлял около 1200 м³ в интервале абсолютных высот 92.0–97.5 м. Консервации рельефа стационара в летне-осенний маловодный период года не происходит, берег часто посещается рекреантами и их деятельность способна обеспечить появление новых отрицательных микроформ на плоскости берега. Общий же вклад летне-осенней эрозии в разрушение откоса составляет 25%.

Расстояние смещения пойменной бровки за любой год мониторинга укладывается в ранее полученные значения для излучин в окрестностях стационара, рассчитанные картометрическим методом по топографическим материалам. Берег стационара устойчив, скорости боковой эрозии не превышают 1.5 м/год. Анализ внешних проявлений эрозионно-аккумулятивных процессов еще на трех стационарах свидетельствует о более сложных кривых, описывающих форму микрорельефа пойменной бровки и изогипс плоскости откоса. Рассмотрение их морфологии может быть темой отдельного исследования, в то время как резкие локальные проявления рельефообразования в пределах стационара “Дядьково” сводятся к появлению выемок средних размеров неправильной или прямоугольной формы.

Прогноз эрозионной активности по имеющейся геоморфологической информации затруднен, поскольку остаются неясными изменчивость подводной части откоса, ее механический состав и устойчивость положения линии наибольших глубин в потоке. По актуальным данным можно заключить, что русло ассиметрично, особенно на участке стационара с наложенной поймой, и это может служить дополнительным фактором мобилизации геологического наполнения берега. Механический состав его в границах исследованной территории различен и согласуется с пространственной организацией русловых процессов на плейстоцен-голоценовом этапе развития днища долины Оки.

Не обладая радиометрическими данными о возрасте двух пойменных массивов, слагающих геологическое тело стационара, по аналогии с ближайшими полноголоценовыми разрезами, обеспеченными ¹⁴C-датами почвогрунтов, мы установили значимую роль эволюции поймы в ее современной морфолитодинамике. Достоверно можно утверждать, что площадь более древнего морфологического комплекса (возраст –

десять тысяч лет) уменьшается на 25% медленнее, чем значительно более молодого комплекса сегментно-гравистой поймы (возраст — первые тысячи лет). При этом объем перемещенных почвогрунтов на обеих частях стационара практически одинаков. Влияние погребенных почв, интегрированных в состав почвогрунтов стационара, неоднозначно — их наличие может как замедлять экспорт наносов, так и увеличивать его, для достоверных оценок требуется продолжение мониторинга. Возможно, более точные зависимости скорости эрозии от морфологии речных берегов и их литологии будут получены при обработке геодезических данных на прочих учетных площадках в рамках региональных геоморфологических исследований.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АИС ГМВО : информ. интернет-портал. [2023]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 10.01.2023).
2. Александровский А.Л., Гласко М.П. Взаимодействие аллювиальных и почвообразовательных процессов на разных этапах формирования пойм равнинных рек в голоцене (на примере рек центральной части Восточно-европейской равнины) // Геоморфология. 2014. № 4. С. 3–17.
3. Александровский А.Л., Ершова Е.Г., Пономаренко Е.В., Кренке Н.А., Скрипкин В.В. Природно-антропогенные изменения почв и среды в пойме Москвы-реки в голоцене: педогенные, пылецевые и антракологические маркеры // Почвоведение. 2018. № 6. С. 659–673.
4. Баборыкин М.Ю., Жидиляева Е.В. Мониторинг оползней с использованием лазерного сканирования и геодезических наблюдений // Инженерные изыскания. № 3. 2014. С. 16–24.
5. Балабо П.Н., Снег А.А., Локалина Т.В., Щедрин В.Н. Почвы мелиорированной поймы верхнего течения реки Оки, используемые в интенсивном земледелии // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 3 (23). С. 116–137.
6. Беркович К.М., Злотина Л.В., Турыкин Л.А. Разрыв речных берегов: факторы, механизм, деятельность человека // Геоморфология. 2019. № 2. С. 3–17.
7. 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.
8. Гендельман М.М. К вопросу о механизме переработки берегов речных русел // Метеорология и гидрология. 1975. № 12. С. 89–94.
9. Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6–28.
10. Егоров И.Е. Экзогенные геоморфологические процессы и методы их изучения. Ижевск, Изд-во Удмуртского университета, 2017. 383 с.
11. Завадский А.С., Лобанов Г.В., Петухова Л.Н., Серебrenникова И.А., Смирнова Е.А., Чернов А.В. 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.
12. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
13. Кононова М.М. Органическое вещество почвы. М.: изд. АН СССР, 1963. 314 с.
14. Коралева 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.
15. Кривцов В.А., Воробьев А.Ю. Особенности пространственной организации и формирования локальных морфологических комплексов в пределах поймы реки Оки на ее рязанском участке // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. 2014. № 1 (42). С. 142–155.
16. Кривцов В.А., Воробьев А.Ю., Водорезов А.В., Зазовская Э.П. Особенности формирования поймы реки Оки в ее среднем течении (на примере Спасского расширения) // Геоморфология. 2020. № 3. С. 56–71.
17. Лазаренко А.А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны, Оки) // Труды ГИН, вып. 120. М.: Наука. 1964. 236 с.
18. Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф., Кирюхина З.П., Добровольская Н.Г. Экспериментальные исследования размыва береговых обрывов и откосов // Геоморфология. 2016. № 2. С. 51–58.

19. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: Академкнига, 2002. 256 с.
20. 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.
21. Маврин Л.Б., Воробьев А.Ю., Водорезов А.В., Чернов А.В., Рубцова Л.Ю., Бутко А.А. Ока: прошлое, настоящее и будущее. Рязань: Ряз. гос. ун-т имени С.А. Есенина, 2019. 86 с.
22. Мирихулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Ленинград. Гидрометеоздат, 1988. 303 с.
23. Муромцев Н.А., Мажайский Ю.А., Семенов Н.А., Лыткин И.И., Шуравилин А.В., Томин Ю.А. Почвы долин рек Оки и Угры и их продуктивность. Рязань: РГТУ им. Профессора П.А. Костычева, 2011. 203 с.
24. Назаров Н.Н., Копытов С.В., Чернов А.В. К вопросу о возрасте пойм прерывисто-динамического развития (на примере верхней Камы) // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 15–27.
25. Панин А.В., Матлахова Е.Ю., Аляутдинов А.Р., Семин В.Н. База данных по абсолютному возрасту аллювия речных долин Европейской России и Сибири и ее палеогидрологическая интерпретация // Пути эволюционной географии. Матер. всеросс. науч. конф., посв. пам. проф. А.А. Величко. 2016. С. 521–526.
26. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства. ПНИИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1987. 200 с.
27. Рысин И.И., Осипов Д.Н. Геоэкологическая напряженность пойменно-русловых комплексов на реках Удмуртии // Наука Удмуртии. 2021. № 1 (93). С. 43–63.
28. Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю., Кичигин А.Н. Элементарная морфолитосистема “днище долины” // Прогнозно-географический анализ территории административного района. М.: Наука, 1984. Т. 2. С. 14–31.
29. Смирнова Е.А., Лобанов Г.В., Бастраков Г.В. Влияние прочностных характеристик грунтов на интенсивность русловых деформаций в среднем течении р. Десны // Геоморфология. 2009. № 2. С. 75–84.
30. Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек северной Евразии. М.: ООО “Крона”, 2009. 684 с.
31. Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Труды Института геолог. Наук. Геологическая серия, вып. 135. М.: Наука. 1951. 271 с.
32. Эрозионно-русловые системы / под ред. Р.С. Чалова, В.Н. Голосова, А.Ю. Сидорчука. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с.
33. Barker R., Dixon L., Hooke J. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion // Earth Surface Processes and Landforms. V. 22. 1997. P. 1217–1227.
34. 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. V. 571. 2019. P. 87–102.
35. Belletti B., Rinaldi M., Bussetini M., Comiti F., Gurnell A.M., Mao L., Nardi L., Vezza P. Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units // Geomorphology. V. 283. 2017. P. 143–157.
36. Core Curriculum in GIS / Ed. by Goodchild M.F., Kemp K.K. Published by: National for Geographical Information and Analysis (NCGIA) University of California, Santa Barbara, USA. 1991. V. 1–3. P. 181–250.
37. Das V.K., Roy S., Barman K., Chaudhuri S., Debnath K. Study of clay–sand network structures and its effect on river bank erosion: an experimental approach // Environmental Earth Sciences. 2019. V. 78. Article number: 591.
38. Experimental fluvial geomorphology / ed. by S.A. Schumm, M.P. Mosley, W.E. Weaver. Wiley-Interscience, New York, 1987. 413 p.
39. Hamshaw S.D., Bryce T., Rizzo D.M., O’Neil-Dunne J., Frolik J., Dewoolkar M.M. Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning // River research and Applications. 2017. V. 33. Iss. 8. P. 1354–1367.
40. Janes K., Holman I., Birkinshaw S., O’Donnell G., Kilsby C. Improving bank erosion modelling at catchment scale by incorporating temporal and spatial variability // Earth Surface Processes and Landforms. 2018. V. 43. P. 124–133.
41. Jugie M., Goba F., Vermoux C., Brunstein D., Tamisiera V., Coeura C.L., Granchera D. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins // Journal of Hydrology. 2018. V. 563. P. 418–434.
42. Klösch M., Blatauer B., Habersack H. Intra-event scale bar–bank interactions and their role in channel widening // Earth Surface Processes and Landforms. V. 40. 2015. P. 1506–1523.
43. Lawler D.M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review // Earth Surface Processes and Landforms. V. 18. Iss. 9. 1993. P. 777–821.

44. 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. V. 558. P. 380–391.
45. Schnitzer M., Kerndolf H. // *Water, Air and Soil Pollutants*. 1981. V. 15. P. 97–108.
46. Zong Q., Xia J., Zhou M., Deng S., Zhang Y. Modelling of the retreat process of composite riverbank in the Jingjiang Reach using the improved BSTEM // *Hydrological processes*. 2017. V. 31. Iss. 26. P. 4669–4681.

Calculation of Seasonal Erosion on the Oka River Riverbanks Using Geodetic Modeling

A. Ju. Vorob'ev^{1, *}, A. S. Kadyrov^{1, **}, D. S. Lokteev^{2, ***},
E. V. Burgov^{3, 4, ****}, and A. A. Balobina^{1, *****}

¹Ryazan State University named for S. Yesenin, Rjazan, Russia

²Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

³Institute of Ecology and evolution A.N. Severtsov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

*E-mail: a.vorobyov90@mail.ru

**E-mail: alieksandr.kadyrov.93@mail.ru

***E-mail: lokteev@gmail.com

****E-mail: burgov.ev@yandex.ru

*****E-mail: balobina-anna@rambler.ru

Abstract—Directed erosion of riverbanks stands out among the dangerous geomorphological processes on large lowland rivers. In the middle reaches of the Oka river, horizontal channel deformations make a significant contribution to regional lithodynamics and the reduction in the area of floodplain lands. We carried out field geological and geomorphological studies in the valley of this large tributary of the Volga, which revealed the complex facies architecture of the floodplain. The forecast for riverbank erosion near the city of Ryazan has recently declined due to the unstable water regime of the Oka river. For a detailed assessment of the consequences of destabilization of the coastal slopes, their surface was surveyed using a total station and aerial photography from a UAV. Regular observations of erosion by the seasons of the hydrological year allowed us to obtain actual data on the redistribution of soils along the height of the slope. We have found that erosion in summer low water is three times weaker than during high water. The predominance of collapses of the uppermost (0.0–2.0 m from the day surface) part of the erosion fronts was also revealed. The article also discusses possible reasons for the mobilization of the geological filling of the river bank, arising from local differences in the Pleistocene-Holocene evolution of the morpholithic system of the Oka river floodplain and the fixation of geological information in it.

Keywords: Oka riverbed, lateral erosion, buried soils, alluvium, high water on rivers, aerial photography, AutoCAD

REFERENCES

1. AIS GMVO: inform. internet-portal. [2023]. URL: <https://gmvo.skniihv.ru/> (data obrashhenija: 10.01.2023).
2. Aleksandrovskij A.L., Glasko M.P. Vzaimodejstvie alljuvial'nyh i pochvoobrazovatel'nyh processov na raznyh etapah formirovanija pojm ravninnyh rek v golocene (na primere rek central'noj chasti Vostochno-evropejskoj ravniny) // *Geomorfologija*. 2014. № 4. S. 3–17.
3. Aleksandrovskij A.L., Ershova E.G., Ponomarenko E.V., Krenke N.A., Skripkin V.V. Prirodno-antropogennye izmenenija pochv i sredi v pojme Moskvy-reki v golocene: pedogennye, pyl'cevyje i antrakologicheskie markery // *Pochvovedenie*. 2018. № 6. S. 659–673.
4. Baborykin M.Ju., Zhidiljaeva E.V. Monitoring opolznej s ispol'zovaniem lazernogo skanirovanija i geodezicheskijh nabljudenij // *Inzhenernyje izyskanija*. № 3. 2014. S. 16–24.
5. Balabko P.N., Sneg A.A., Lokalina T.V., Shhedrin V.N. Pochvy meliorirovannoj pojmy verhnego techenija reki Oki, ispol'zuemye v intensivnom zemledelii // *Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii*. 2016. № 3 (23). S. 116–137.
6. Berkovich K.M., Zlotina L.V., Turykin L.A. Razmyv rechnykh beregov: faktory, mehanizm, dejatel'nost' cheloveka // *Geomorfologija*. 2019. № 2. S. 3–17.

7. Vorob'ev A.Ju., Kadyrov A.S. Polevye issledovanija otstupanija beregov rusla r. Oki v 2014–2018 gg. s pomoshh'ju metoda prostyh reперov // *Geograficheskij vestnik*. 2020. № 3 (54). S. 30–45.
8. Gendel'man M.M. K voprosu o mehanizme pererabotki beregov rechnyh rusel // *Meteorologija i gidrologija*. 1975. № 12. S. 89–94.
9. Gorbarenko A.V., Varenkova N.A., Kireeva M.B. Transformacija stoka vesennego polovod'ja i pavodkov v bassejne verhnej Volgi pod vlijaniem klimaticeskikh izmenenij // *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. 2021. № 4. S. 6–28.
10. Egorov I.E. Jezzogennnye geomorfologicheskie processy i metody ih izuchenija. Izhevsk, Izd-vo Udmurtskogo universiteta, 2017. 383 s.
11. Zavadskij A.S., Lobanov G.V., Petuhova L.N., Serebrennikova I.A., Smirnova E.A., Chernov A.V. Rezul'taty stacionarnyh issledovanij ruslovyh processov na rekah ETR // *Jerozionnye i ruslovyje processy / pod red. R.S. Chalova. M. izd-vo MGU, 2010. S. 220–251.*
12. Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snishhenko B.F. Osnovy gidromorfologicheskoj teorii ruslovogo processa. L.: Gidrometeoizdat, 1982. 272 s.
13. Kononova M.M. Organicheskoe veshhestvo pochvy. M.: izd. AN SSSR, 1963. 314 s.
14. Korableva O.V., Chernov A.V. Opyt monitoringa ruslovyh deformacij na shirokopojemnyh rekah (na primere r. Kerzhenec) // *Geografija i prirodnye resursy*. 2008. № 2. S. 158–165.
15. Krivcov V.A., Vorob'jov A.Ju. Osobennosti prostranstvennoj organizacii i formirovanija lokal'nyh morfologicheskikh kompleksov v predelakh pojmy reki Oki na ee rjazanskom uchastke // *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo universiteta imeni S.A. Esenina*. 2014. № 1 (42). S. 142–155.
16. Krivcov V.A., Vorob'ev A.Ju., Vodorezov A.V., Zazovskaja Je.P. Osobennosti formirovanija pojmy reki Oki v ee srednem techenii (na primere Spasskogo rasshirenija) // *Geomorfologija*. 2020. № 3. S. 56–71.
17. Lazarenko A.A. Litologija alljuvija ravninnyh rek gumidnoj zony (na primere Dnepra, Desny, Oki) // *Trudy GIN*, vyp. 120. M.: Nauka. 1964. 236 s.
18. Larionov G.A., Litvin L.F., Krasnov S.F., Kirjuhina Z.P., Dobvol'jskaja N.G. Jeksperimental'nye issledovanija razmyva beregovyh obryvov i otkosov // *Geomorfologija*. 2016. № 2. S. 51–58.
19. Litvin L.F. Geografija jerozii pochv sel'skohozjajstvennyh zemel' Rossii. M.: Akademkniga, 2002. 256 s.
20. Luchnikov A.I., Ljahin Ju.S., Lepihin A.P. Opyt primenenija bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlja ocenki sostojanija beregov poverhnostnyh vodnyh ob'ektov // *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. 2018. № 1. S. 37–46.
21. Mavrin L.B., Vorob'ev A.Ju., Vodorezov A.V., Chernov A.V., Rubcova L.Ju., Butko A.A. Oka: proshloe, nastojashhee i budushhee. Rjazan': Rjaz. gos. un-t imeni S.A. Esenina, 2019. 86 s.
22. Mirchulava C.E. Osnovy fiziki i mehaniki jerozii rusel. Leningrad. Gidrometeoizdat, 1988. 303 s.
23. Muromcev N.A., Mazhajskij Ju.A., Semenov N.A., Lytkin I.I., Shuravilin A.V., Tomin Ju.A. Pochvy dolin rek Oki i Ugry i ih produktivnost'. Rjazan': RGATU im. Professora P.A. Kostycheva, 2011. 203 s.
24. Nazarov N.N., Kopytov S.V., Chernov A.V. K voprosu o vozraste pojm preryvisto-dinamicheskogo razvitija (na primere verhnej Kamy) // *Geograficheskij vestnik*. 2016. № 3 (38). S. 15–27.
25. Panin A.V., Matlahova E.Ju., Aljautdinov A.R., Semin V.N. Baza dannyh po absolutnomu vozrastu alljuvija rechnyh dolin Evropejskoj Rossii i Sibiri i ee paleogidrologicheskaja interpretacija V sb.: *Puti jevoljucionnoj geografii. Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii posvjashhennoj pamjati professora A.A. Velichko*. 2016. S. 521–526.
26. Rekomendacii po ocenke i prognozu razmyva beregov ravninnyh rek i vodohranilishh dlja stroitel'stva. PNIIS Gosstroja SSSR. M.: Strojizdat, 1987. 200 s.
27. Rysin I.I., Osipov D.N. Geojekologicheskaja naprjazhennost' pojmenno-ruslovyh kompleksov na rekah Udmurtii // *Nauka Udmurtii*. 2021. № 1 (93). S. 43–63.
28. Simonov Ju.G., Simonova T.Ju., Kichigin A.N. Jelementarnaja morfолитосистема "dnishhe doliny" // *Prognozno-geograficheskij analiz territorii administrativnogo rajona*. M.: Nauka, 1984. T. 2. S. 14–31.
29. Smirnova E.A., Lobanov G.V., Bastrakov G.V. Vlijanie prochnostnyh charakteristik gruntov na intensivnost' ruslovyh deformacij v srednem techenii r. Desny // *Geomorfologija*. 2009. № 2. S. 75–84.
30. Chernov A.V. Geografija i geojekologicheskoe sostojanie rusel i pojm rek severnoj Evrazii. M.: OOO "Krona", 2009. 684 s.
31. Shancer E.V. Alljuvij ravninnyh rek umerennogo pojasa i ego znachenie dlja poznaniya zakonomenostej stroenija i formirovanija alljuvial'nyh svit // *Trudy Instituta geolog. Nauk. Geologicheskaja serija*, vyp. 135. M.: Nauka. 1951. 271 s.
32. Jerozionno-ruslovyje sistemy / pod red. R.S. Chalova, V.N. Golosova, A.Ju. Sidorchuka. M.: INFRA-M, 2017. 702 s.
33. Barker R., Dixon L., Hooke J. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion // *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 22. 1997. P. 1217–1227.
34. 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*. Vol. 571. 2019. P. 87–102.

35. Belletti B., Rinaldi M., Bussetini M., Comiti F., Gurnell A.M., Mao L., Nardi L., Vezza P. Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units // *Geomorphology*. V. 283. 2017. P. 143–157.
36. Core Curriculum in GIS / Ed. by Goodchild M.F., Kemp K.K. Published by: National for Geographical Information and Analysis (NCGIA) University of California, Santa Barbara, USA. 1991. Vol. 1–3. P. 181–250.
37. Das V.K., Roy S., Barman K., Chaudhuri S., Debnath K. Study of clay–sand network structures and its effect on river bank erosion: an experimental approach // *Environmental Earth Sciences*. 2019. Vol. 78. Article number: 591.
38. Experimental fluvial geomorphology / ed. by S.A. Schumm, M.P. Mosley, W.E. Weaver. Wiley-Interscience, New York, 1987. 413 p.
39. Hamshaw S.D., Bryce T., Rizzo D.M., O’Neil-Dunne J., Frolik J., Dewoolkar M.M. Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning // *River research and Applications*. 2017. Vol. 33. Iss. 8. P. 1354–1367.
40. Janes K., Holman I., Birkinshaw S., O’Donnell G., Kilsby C. Improving bank erosion modelling at catchment scale by incorporating temporal and spatial variability // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2018. Vol. 43. P. 124–133.
41. Jugie M., Goba F., Vermoux C., Brunstein D., Tamisiera V., Coeura C.L., Granchera D. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 563. P. 418–434.
42. Klösch M., Blamauer B., Habersack H. Intra-event scale bar–bank interactions and their role in channel widening // *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 40. 2015. P. 1506–1523.
43. Lawler D.M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review // *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 18. Iss. 9. 1993. P. 777–821.
44. Masoodi A., Noorzad A., Majdzadeh M.R., Samadi T.A. Application of short-range photogrammetry for monitoring seepage erosion of riverbank by laboratory experiments // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 558. P. 380–391.
45. Schnitzer M., Kerndolf H. // *Water, Air and Soil Pollutants*. 1981. Vol. 15. P. 97–108.
46. Zong Q., Xia J., Zhou M., Deng S., Zhang Y. Modelling of the retreat process of composite riverbank in the Jingjiang Reach using the improved BSTEM // *Hydrological processes*. 2017. Vol. 31. Iss. 26. P. 4669–4681.