



Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2023. № 2 (79). С. 174–190.
The Bulletin of Ryazan State University named for S. A. Yesenin. 2023; 2 (79): 174–190.

Научная статья

УДК 551.435

DOI 10.37724/RSU.2023.79.2.017

Методика измерения скорости рельефообразования на эрозионных берегах рек с помощью сложных реперов ¹

Алексей Юрьевич Воробьев ¹,
Александр Сергеевич Кадыров ²,
Анна Александровна Балобина ³

^{1, 2, 3} Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина,
Рязань, Россия

¹ a.vorobyov90@mail.ru

² alieksandr.kadyrov.93@mail.ru

³ balobina-anna@rambler.ru

Аннотация. Для поймы среднего течения реки Оки была апробирована авторская методика определения скорости боковой эрозии речного русла. В период с 2016 по 2020 год были проведены полевые исследования динамики горизонтальных русловых деформаций с помощью сложных (комплексных) реперов. В отличие от аналогичных подходов, при реализации которых также задействуются ручные измерения, апробированная методика позволяет получать количественные данные о скорости отступления не только пойменной бровки, но и самой плоскости откоса на различной высоте над урезом реки.

Установлено, что наибольшие разрушения эрозионных берегов на всех трех учетных площадках наблюдались в 2018 году при прохождении весеннего половодья с заметанием гребнем паводковой волны массивов центральной поймы. В остальные годы, с аномально низкими половодьями либо с высокими летними паводками, общая скорость отступления берегов снижалась в 5–7 раз. Затухание рельефообразования в наибольшей степени отражалось на весеннем размыве откосов, в то время как их отступление за период летней межени из года в год отличалось примерно одной и той же динамикой.

Ключевые слова: динамическая геоморфология, русло реки Оки, методика исследований, реперные точки, береговой откос, боковая эрозия, половодье.

Для цитирования: Воробьев А. Ю., Кадыров А. С., Балобина А. А. Методика измерения скорости рельефообразования на эрозионных берегах рек с помощью сложных реперов // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2023. № 2 (79). С. 174–190. DOI: [10.37724/RSU.2023.79.2.017](https://doi.org/10.37724/RSU.2023.79.2.017).

Original article

Method of complex benchmarks for assessing rates of relief formation on erosive river banks

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

Alexey Yuryevich Vorobyov ¹,
Aleksandr Sergeyeovich Kadyrov ²,
Anna Aleksandrovna Balobina ³

^{1, 2, 3} Ryazan State University named for S. A. Yesenin,
Ryazan, Russia

¹ a.vorobyov90@mail.ru

² alieksandr.kadyrov.93@mail.ru

³ balobina-anna@rambler.ru

Abstract. We have developed and applied a unique method (for the floodplain of the middle course of the Oka River) for determining the rate of lateral erosion of the river channel. In the period from 2016 to 2020, field studies of the dynamics of horizontal channel deformations were carried out using complex (complex) benchmarks. Unlike other similar approaches, whose implementation involves manual measurements, the new method allows obtaining quantitative data on the retreat rate not only of the floodplain crest, but also of a slope plane itself at different heights above the river's edge.

It is established that the greatest coasts erosion at all three accounting sites was observed in 2018, during the retreat of the spring flood, with the crest of the flood wave sweeping the massifs of the central floodplain. During other years, with abnormally low floods or high summer floods, the total rate of coastal retreat decreased by 5–7 times. The attenuation of relief formation was most reflected in the spring erosion of slopes, while their retreat during the summer low water period from year to year differed in approximately the same dynamics.

Keywords: dynamic geomorphology, The Oka River bed, research methodology, reference points, bank slope, lateral erosion, high water.

For citation: Vorobyov A. Yu., Kadyrov A. S., Balobina A. A. Method of complex benchmarks for assessing rates of relief formation on erosive river banks. *The Bulletin of Ryazan State University named for S. A. Yesenin*. 2023; 2 (79):174–190. (In Russ.). DOI: [10.37724/RSU.2023.79.2.017](https://doi.org/10.37724/RSU.2023.79.2.017).

Введение

Единство процессов эрозии и аккумуляции, равно как и взаимная регуляция потока и русловых берегов, по Н. И. Маккавееву [Эрозионно-русловые системы, 2017], являются фундаментальными закономерностями функционирования эрозионно-русловых систем. Эрозионно-аккумулятивные процессы в пределах речных пойм морфологически наиболее четко проявляются на границе поймы и русла, ежегодное обновление которой в условиях центра Восточно-Европейской равнины связано с прохождением весенних половодий. Пойменная часть долины реки Оки в ее среднем течении (770–306 км от устья) отличается сложным рельефом (рис. 1), представленным сменяющими друг друга морфологическими комплексами локального уровня [Кривцов, Водорезов, Воробьев, Тобратов, 2020] с неодинаковым геологическим наполнением. В свою очередь, и окское русло представлено здесь всеми тремя основными морфодинамическими типами [Эрозионно-русловые системы, 2017], что создает сложную мозаику ареалов аллювиальной аккумуляции и русловой эрозии.

Простые реперы (эрозионные штифты), устанавливаемые на определенной дистанции от берега, расстояние от которых до бровки измеряется рулеткой, исторически были основным инструментом полевых измерений боковой эрозии речных русел [Xia, Deng, Lu, Xu, 2016]. Примечательно, что в таких случаях практически всегда рассматриваются главным образом морфологические результаты горизонтальных русловых деформаций в самой верхней части берегового откоса. Опора на результат процесса — общий признак большинства геоморфологических исследований [Симонов, 2005 ; Knighton, 1998], поскольку причины мобилизации поверхности далеко не всегда удается установить. Однако теоретические изыскания, преследующие цель определения изменчивости формы всего берега, уже несколько десятилетий назад вызвали к жизни разнообразные классификации кривизны поверхности фронтов размыва [Гендельман, 1975 ; Abernethy, Rutherford, 1998].

С внедрением в практику работы геоморфологов новых методов съемки (в первую очередь — воздушного лазерного сканирования) стало возможным получение массовых данных о пространственной локации любой точки на фронтах размыва речного русла [Биненко, Иванов, Родионов, 2014]. Последующая цифровая обработка полевых изображений позволяет формировать континуальные цифровые модели рельефа и осуществлять сложные расчеты объемов морфолитодинамики. За последние 20–25 лет в динамической геоморфологии стали популярны геодезические методы. Недостатки подобных подходов тесно связаны с их достоинствами,

поскольку автоматизация и количественный рост информации предполагают концептуальное усложнение расчетных алгоритмов и повышают требования к квалификации специалиста, осуществляющего измерения.

Настоящая работа посвящена рассмотрению достоинств и недостатков метода сложных реперов и обзору достигнутых при его применении результатов. Три ключевых участка берегов реки Оки в ее среднем течении были избраны (рис. 1) для стационарных исследований динамики эрозии береговых откосов еще в 2016 году. Апробация оригинального подхода, осуществляемая в течение пяти лет, позволила с достаточной точностью определить скорость отступления берегов на разном уровне относительно уреза Оки на всем протяжении выбранных участков фронтов размыва. Фактические данные, получаемые в ходе осуществления полевых работ, несмотря на свою дискретную природу, предполагают возможность проведения пространственной интерполяции и статистической обработки результатов для возможно более полного понимания сущности эрозионно-аккумулятивных процессов на границе русла и поймы.

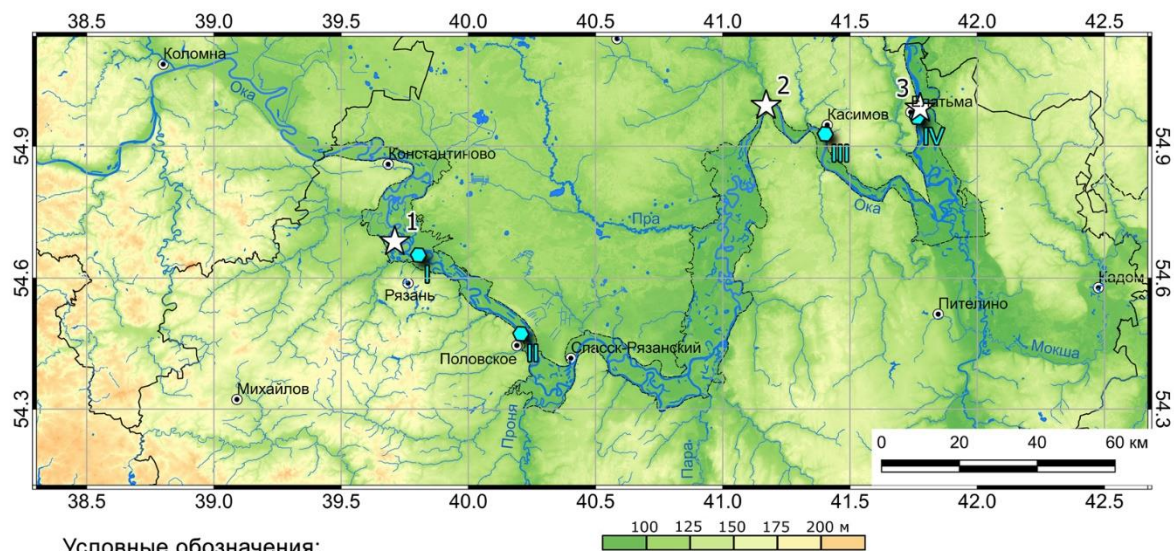
Основная часть

Методика исследований

Цель создания всякой методики — получение фактических новых данных (в нашем случае — в области динамической геоморфологии) путем выполнения определенного алгоритма действий [Симонов, 2005]. Содержание алгоритма и число звеньев в нем зависят от сложности выполняемых работ и от целеполагания. Конечным результатом исследований отступления берегов крупных рек, как следует из опыта подобных работ на реках бывшего СССР, США и Китая [Завадский, Лобанов, Петухова [и др.], 2010 ; Завадский, Кораблева, Чернов, 2016 ; Stefanovic, Bryan, 2007], являются скорости эрозионного процесса.

Ранее мы, анализируя фактические результаты своих работ за 2014–2018 годы на эрозионных берегах окских излучин, отмечали трудоемкость метода реперов [Воробьев, Кадыров, 2020]. Кроме того, на крупных реках длина фронтов размыва обычно измеряется в километрах, следовательно, обеспечение достаточного охвата при плотном расположении реперов (через 2–3 м, как принято за рубежом [Jugie, Goba, Virmoux [et al.], 2018]) физически маловероятно. Единственным выходом становится организация контрольных площадок на различных элементах меандров для учета гидродинамического воздействия на откосы при том или ином угле разворота излучины.

Особенностью большинства геоморфологических процессов в гумидных условиях умеренного климата является приуроченность фазы их активной динамики к определенному времени года. Как известно, разрушение речных берегов осуществляется речным потоком, создающим напряжения в массиве грунтов, слагающих откос [Далматов, 1988 ; Tapas, Dutta, 2011 ; Zong, Xia, Zhou, 2017]. Подразумевается, что прямой размыв вносит основной вклад в горизонтальные русловые деформации рек, и берега Оки в среднем ее течении не должны быть исключением. Окская пойма здесь широкая, а берега (за исключением коренного борта долины) имеют среднюю высоту (5–7 м) и сложены рыхлым слоистым аллювием. Многочисленные исследования свидетельствуют, что быстрое смещение положения окских берегов происходит во время весеннего половодья, обычно в апреле-мае [Лазаренко, 1964 ; Баровский, Чалов, 2004 ; Беркович, Злотина, Турыкин, 2019 ; Воробьев, Кадыров, 2020]. Но и летне-осенняя межень должна обеспечивать некоторый вклад в процесс их разрушения за счет антропогенной эрозии и склоновых процессов. Распределение этого вклада по плоскости откоса, в том числе сезонного перераспределения кластического материала, не учитывается в методике простых реперов, и ранее данный вопрос практически не поднимался.



Условные обозначения:

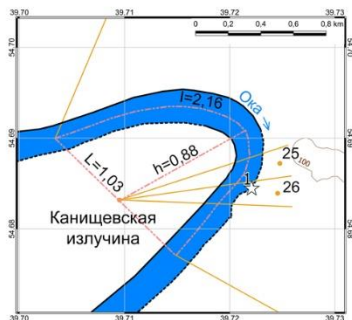
--- граница поймы р. Оки
 ● Рязань - крупные населенные пункты

Гидропосты на р. Оке и мониторинг гидрологических параметров:

I ● - «Рязань» (уровень реки)
 II ● - «Половское» (уровень и расходы реки)
 III ● - «Касимов» (уровень реки)
 IV ● - «Елатьма» (уровень реки)

Картосхемы ключевых участков исследования - морфология русла Оки

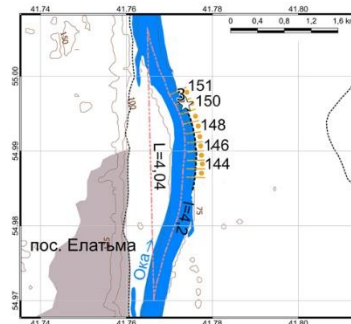
Участок «Заокское» (сектор берега № 26)



Участок «Клетино» (сектор берега № 131)



Участок «Елатьма» (сектор берега № 150)



Условные обозначения:

L - шаг руслового изгиба
 l - длина руслового изгиба
 h - длина шпоры излучины

131 - номера секторов берегов Оки и их границы
 --- линии морфометрических параметров русла Оки
 - фронты размыва берегов Оки

Рис. 1. Район исследований в пределах долины средней Оки и морфологические параметры ее русла на ключевых участках

Фактор антропогенного беспокойства описан нами как одна из причин затруднений при контроле отступления окских берегов [Воробьев, Кадыров, 2020 ; Кривцов, Водорезов, Воробьев, Тобратов, 2020]. Рекреанты нередко ломают или уносят реперные кольца, и, если бы последние не имели геодезических координат в системе МСК-62 (установлены нами при помощи тахеометра Sokkia CX-106 (Sokkia, Япония)), данные частично оказались бы утеряны. Зачастую берега Оки в Рязанском расширении ее поймы представлены сенокосами и пастбищами, из-за чего высокие реперы (0,5–1,5 м высотой) заметны издали, а поиск на местности низких колец (<0,5 м) затруднителен. Соответственно, необходимо было применить технологию, позволяющую получать большой объем данных малозаметным способом, а неотъемлемой частью новой методики, очевидно, станет процедура скрытия опорной точки.

Сопоставив все требования к новым реперам, а также проведя в течение двух лет (2014–2015 годы) измерения простыми реперами и рекогносцировку местности на всех контрольных площадках, нами была разработана оригинальная методика измерений скорости горизонтальных русловых деформаций. Изготавливались реперы особой конструкции, представлявшие собой квадратную раму из

стальной арматуры (рис. 2). Размеры ее сторон колебались от 20 до 40 см, строгость длины и ширины не имеет большого значения, но линейные размеры должны обеспечивать возможность приложения к раме измерительной линейки. К стальному квадрату привариваются четыре малые арматуры под углами 45° и 90°, общая форма его при этом усложняется. В дальнейшем реперы доставлялись в центры учетных площадок, на которых ранее производились наблюдения с помощью эрозионных штифтов (рис. 2).

Сложный репер и крепкий угол



Получение точки на бровке от сложного репера



Ручные измерения расстояния от репера рулеткой



Простые реперы (штифты) на учетных площадках



Измерения на крутом откосе



Измерения на участке «Заокское»



Принципиальная (гипотетическая) схема продольного профиля отступающего откоса с допустимой аккумуляцией обломочного материала у его основания

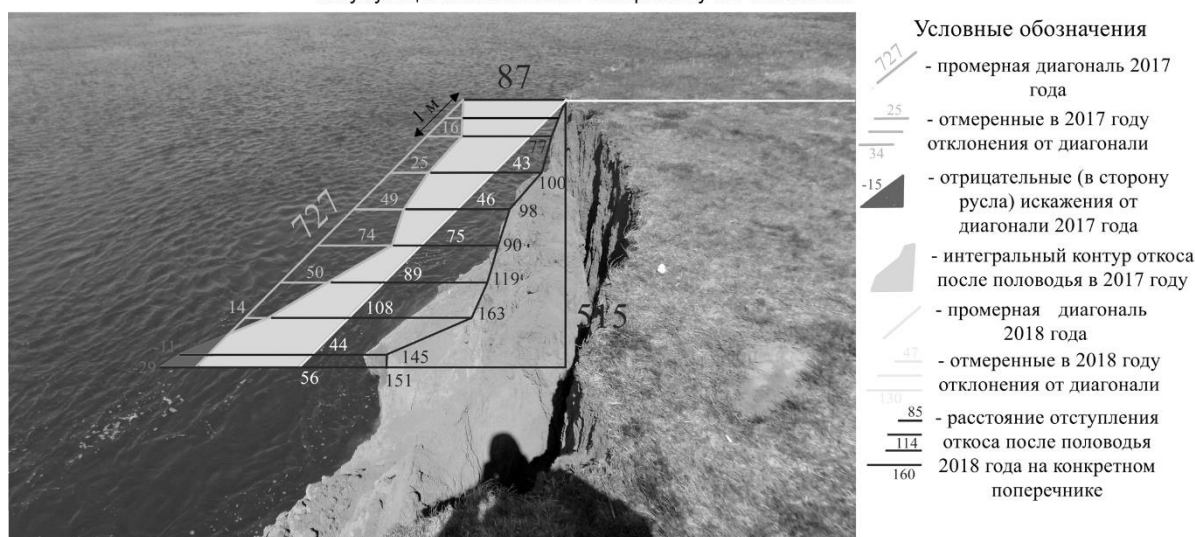


Рис. 2. Иллюстрации сложных реперов, операций, выполняемых в ходе полевых работ, и их теоретических результатов

Всего к концу 2015 года было изготовлено более 80 реперов, заложение их на местности осуществлялось под дерновый слой аллювиальной почвы (горизонт A_d) на расстоянии, по крайней мере, 5 м от пойменной бровки. Местоположение каждого репера фиксировалось тахеометром, но в рамках самостоятельной геоморфологической методики реперы обнаруживались нами путем использования неодимовых магнитов и металлоискателя. Накрытые дерном, изделия из арматуры остаются практически незаметными, обеспечивая тем не менее надежную точку отсчета для полевых измерений. Общая продолжительность последних, по нашему опыту, составляет примерно 1–2 часа для одного репера.

Для оценки скорости отступления пойменной бровки в микромасштабе потребовались небольшие куски арматуры, приваренные с двух сторон к раме репера под углом 90°. Геодезическая рулетка (10, 20 или 50 м длиной) прикладывается к раме и прутьям два раза на ширине рамы, по обе стороны от нее. В результате этой операции на пойменной бровке можно получить три точки (от репера

и рядом с ним), позволяющие установить скорость ее смещения. Остальная же часть контрольной площадки охватывается измерениями от сложного репера при прикладывании геодезической рулетки к раме по арматурам, соединенным с рамой под прямым углом. На пойменной бровке при этом можно получать любое количество точек, а от них осуществлять определение скорости отступления более низких частей фронта размыва. В последнем случае потребуется так называемый крепкий угол, изготовленный из дерева. Два деревянных бруса скреплены под углом 135° , при этом образующийся промежуток больше, чем угол естественного откоса для сыпучих тел [Далматов, 1988]. Отметим, что в разработанной методике допускается возможность накопления осадков у основания откоса, что важно при неустойчивом [Киреева, Илич, Гончаров [и др.], 2018] водном режиме реки Оки в последнее десятилетие (рис. 3).

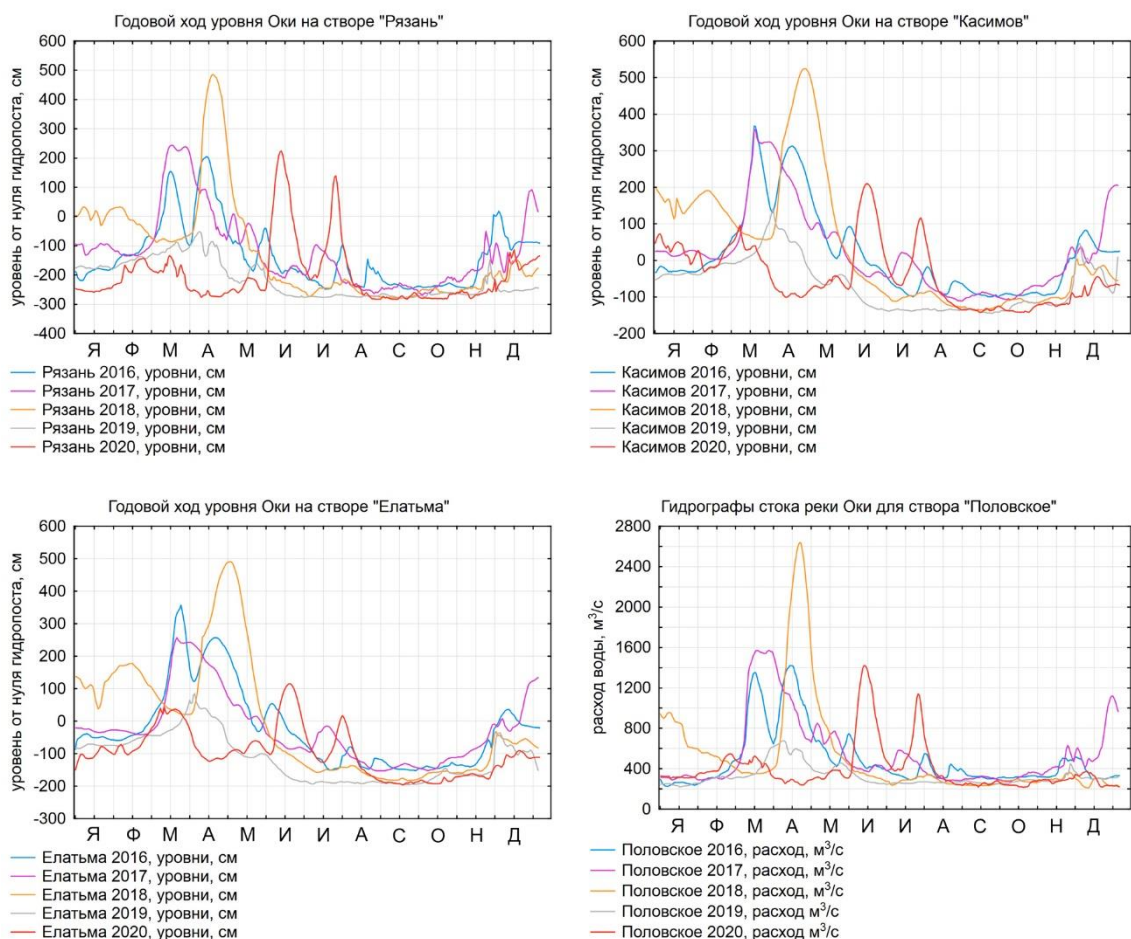


Рис. 3. Гидрографы стока и кривые уровней реки Оки в период исследования

Большая часть времени в процессе измерений затрачивается на оценку отступления плоскости откоса от окского уреза до пойменной бровки. Мониторинг динамики этого процесса сопряжен с заложением промерных горизонталей от диагонали, которую, в свою очередь, следует получить от крепкого угла. Последний располагается на пойменной бровке в точке соответствия выбранного интервала расстояния от сложного репера (например, 2, 4, 6 м и т. д.). Мощность аллювиальных фаций в надводной части фронтов размыва для средней Оки обычно исчисляется в метрах [Шанцер, 1951 ; Лазаренко, 1964 ; Кривцов, Водорезов, Воробьев, Тобратов, 2020], такой же может быть и мощность некоторых голоценовых палеопочв [Лазаренко, 1964 ; Александровский, Гласко, 2014], включенных в пойменные отложения. Измерения отступления берега через каждый метр его высоты соответствуют физическим возможностям исследователя (рис. 2), единственное исключение делается для самого верхнего интервала, к которому приурочен плодородный слой почвы. Обозначение границ интервалов идет от уреза реки. Примерные интервалы для промерных горизонталей в таком случае могут соответствовать ряду: 6,0, 5,5, 5,0, 4,0, 3,0, 2,0, 1,0 и 0,0 м (урез Оки). Разделение верхнего интервала на два полуметровых интервала связано с типичной мощностью гумусового горизонта дневной почвы, которая в районе исследования обычно не превышает 0,5 м [Александровский, Гласко, 2014 ; Воробьев, Кадыров, 2020 ; Кривцов, Водорезов, Воробьев, Тобратов, 2020].

Первые измерения отступления берегов сложными реперами были произведены после половодья 2016 года. Учитывая 60-метровую протяженность площадок для измерений эрозионными штифтами, на откосе закладывалось 30 линий измерений через каждые 2 м его длины. При 6-метровой высоте берега, таким образом, в распоряжении исследователя оказывается 180 значений скорости эрозионного процесса. Статистическая обработка подобных полученных множеств дискретных значений проводилась в программе STATISTICA 10.0. В пакете STATISTICA подобная процедура осуществляется аксонометрическим методом, когда строится параметрическая поверхность по данным трех матриц (x — номер репера, длина по откосу; y — высота промерной линии от уреза реки; z — скорость эрозии). Сглаживание поверхности не производилось, поскольку значение имеют как раз единичные пессимумы и выпуклости поверхности, фиксирующие частное смещение окрестностей конкретной точки на откосе.

Контроль над отступанием берегов осуществляется два раза в год — после половодья и в конце летне-осенней межени. Благодаря периодичности измерений, основанных на каноничной для района исследований модели гидрографа Оки [Киреева, Илич, Гончаров [и др.], 2018 ; Кривцов, Водорезов, Воробьев, Тобратов, 2020], возможен учет размыва берега русловым потоком и оценка вклада нерусловых процессов в его разрушение. Ширина проективных поверхностей, представляющих фактические данные обоих сезонов (весны и осени) при этом должна быть различной, поскольку, в силу падения уровня Оки в меженный период, ее берега осенью на 1–1,5 м выше, чем в мае-июне (табл.). Экспонированная ранней осенью нижняя часть откосов, таким образом, является их подводной частью при весенних измерениях, анализ ежегодных данных о ее русловой переработке может быть информативен для учета размыва оснований берегов.

Таблица

Разница между нулевым уровнем местного гидропоста и нормальным меженным уровнем и сезонные изменения относительной высоты берегов Оки на ключевых участках исследования

Название створа и номер сектора берега Оки		Высота берега во время весенней съемки	Дата съемки	Высота берега во время осенней съемки	Дата съемки	Годы
Нуль поста, м	Нормальный меженный уровень, м					
створ Рязань, сектор берега № 26		4,5	14.05	5,5	06.11	2016
93,4	92,2	4,5	28.05	5,5	10.10	2017
		4,5	28.05	5,5	15.11	2018
		4,5	26.04	5,5	15.11	2019
		4,5	27.06	5,5	22.11	2020
		4,5	27.06	5,5	22.11	2020
створ Касимов, сектор берега № 131		5,5	21.05	6,5	02.11	2016
82,8	82,0	5,5	01.06	6,5	15.10	2017
		5,5	03.06	6,5	04.11	2018
		5,5	28.04	6,5	20.11	2019
		5,5	01.07	6,5	05.11	2020
створ Елатьма, сектор берега № 150		5,0	13.06	6,5	17.10	2016
79,5	77,9	5,0	19.05	6,5	13.10	2017
		5,0	11.05	6,5	06.11	2018
		5,0	24.04	6,5	13.11	2019
		5,0	28.06	6,5	24.11	2020

К недостаткам методики относится, в частности, растягивание ячеек данных по длине (их размеры — 1 м по вертикали и 2 м по горизонтали) и сам размер ячеек, который может быть больше габаритов блоков пойменного аллювия, отделившихся от основного массива породы [Смирнова, Лобанов, Бастраков, 2009 ; Knighton, 1998 ; Zong, Xia, Zhou [et al.], 2017]. Это приводит к неточностям оценок объемов перемещенных почвогрунтов (точность меньше, чем при лазерном сканировании), тем не менее разведочные расчеты все равно могут быть произведены.

Полученные результаты

Как можно видеть на проецированных поверхностях (рис. 4), все три участка окских берегов весной разрушались не только с различной скоростью (параметр U_6), но и с неодинаковой пространственной плотностью эрозионного процесса. Обрушения в виде отдельных блоков были характерны для берегового сектора № 26 (окрестности села Заокское), причем отделение блоков могло происходить на всем диапазоне высот фронта размыва. Воздействие руслового потока на

береговые откосы берегов участков Клетино и Елатьма привело к совершенно разным морфологическим результатам: в первом случае небольшие неровности осложняют плоскость проекции, а на Елатомском участке полученная поверхность испещрена глубокими провалами, разделенными узкими мысами. Усредненная по всей плоскости берега «весенняя» скорость его отступления примерно одинакова на участках Заокское (0,09 м/год) и Клетино (0,13 м/год). Активнее размывается берег напротив русловой отмели у поселка Елатьма (0,21 м/год).

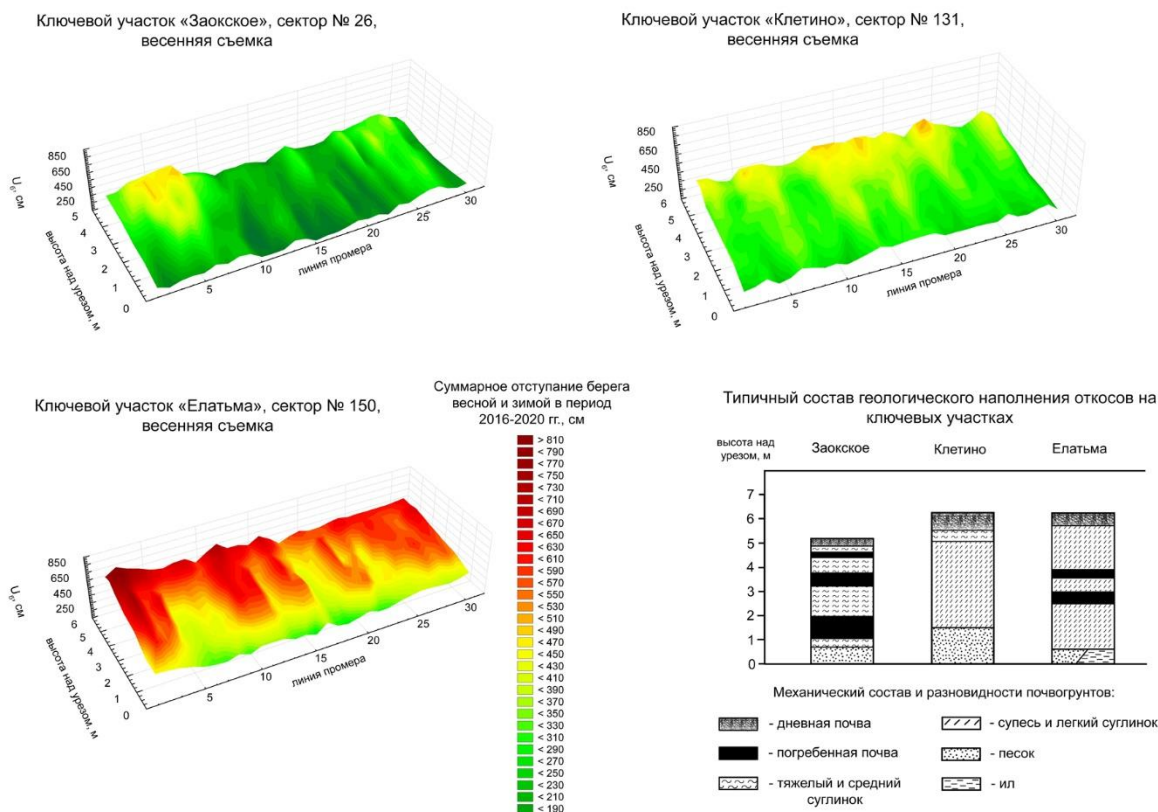
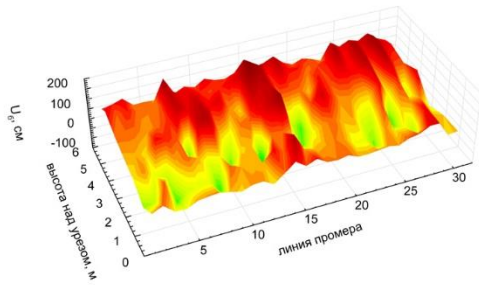


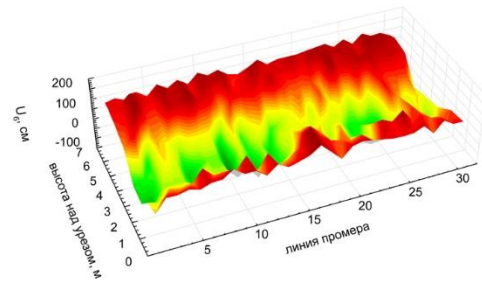
Рис. 4. Строение берегов реки Оки на ключевых участках исследования и моделирование их разрушения за зимние и весенние сезоны 2016–2020 годов

Смещение фронтов размыва на учетных площадках за летне-осенний период относительно их положения весной показано на аналогичных проекциях (рис. 5). Рельефообразование в межливневый период приводит к накоплению материала в срединной части фронтов размыва и на нижней их половине, что выражается в отрицательных значениях параметра U_6 . Но и на фрагментах проекций, соответствующих претерпевшим разрушения в 2016–2020 годах участкам фронтов размыва, «летние» скорости процесса относительно невелики. На уровне бровки средние значения боковой эрозии на участках Заокское, Клетино и Елатьма (если первые из них взять за единицу) относятся друг к другу по этому параметру как 1/1, 2/0,7 соответственно, в то время как «весенние» данные имеют соотношение 1/1, 5/2,4. В целом плоскость откосов смещается в маловодный период года не более чем на первые сантиметры: в пределах всех трех учетных площадок усредненная скорость ее отступления составляет 0,02–0,03 м/год.

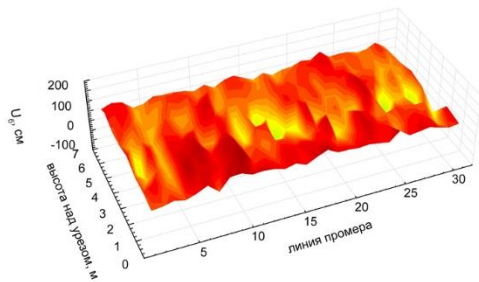
Ключевой участок «Заокское», сектор № 26, осенняя съемка



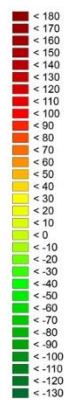
Ключевой участок «Клетино», сектор № 131, осенняя съемка



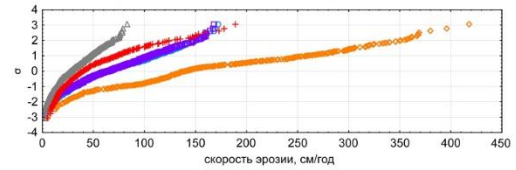
Ключевой участок «Елатьма», сектор № 150, осенняя съемка



Суммарное отступление берега летом и осенью в период 2016-2020 гг., см



Отступление береговых откосов на всех участках, измерения после: весеннего половодья



летне-осенней межени

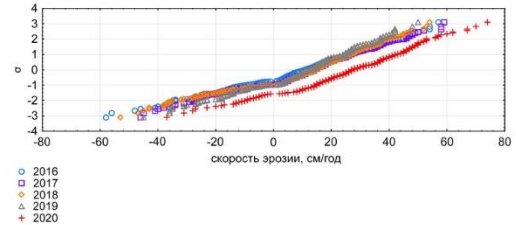


Рис. 5. Моделирование разрушения берегов Оки во время летне-осенней межени и вероятностные графики эрозии за отдельные годы

Общий результат разрушения берегов отражен в обобщенных проекциях откосов (рис. 6), полученных сложением данных съемки после половодья и на исходе межени. Данные лимитированы границами надводной в весеннее время части берегов и показаны в несколько более крупном масштабе. Пространственная плотность эрозии (число и амплитуда изменений на единицу площади фронта размыва) велика на учетной площадке у поселка Елатьма. За годы мониторинга берег в верхней своей части отступил здесь на 8–10 м, в средней части скорость эрозии снижается до 5–6 м/5 лет за счет сохранения части геологического наполнения в виде выступов, разделяющих крупные выемки. Основание берега довольно устойчиво, скорость его отступления — всего 0,7–1,0 м/год. Результатом морфолитодинамики стало формирование крутого откоса с развитым бечевником либо (реже) террасированного берега. Высота двух террасоступеней составляет 1,5–3,0 м, как видно на соответствующих схемах поперечных профилей (рис. 6). Нижняя ступень, опирающаяся на урез реки, обычно мощнее верхней на 40–100 %.

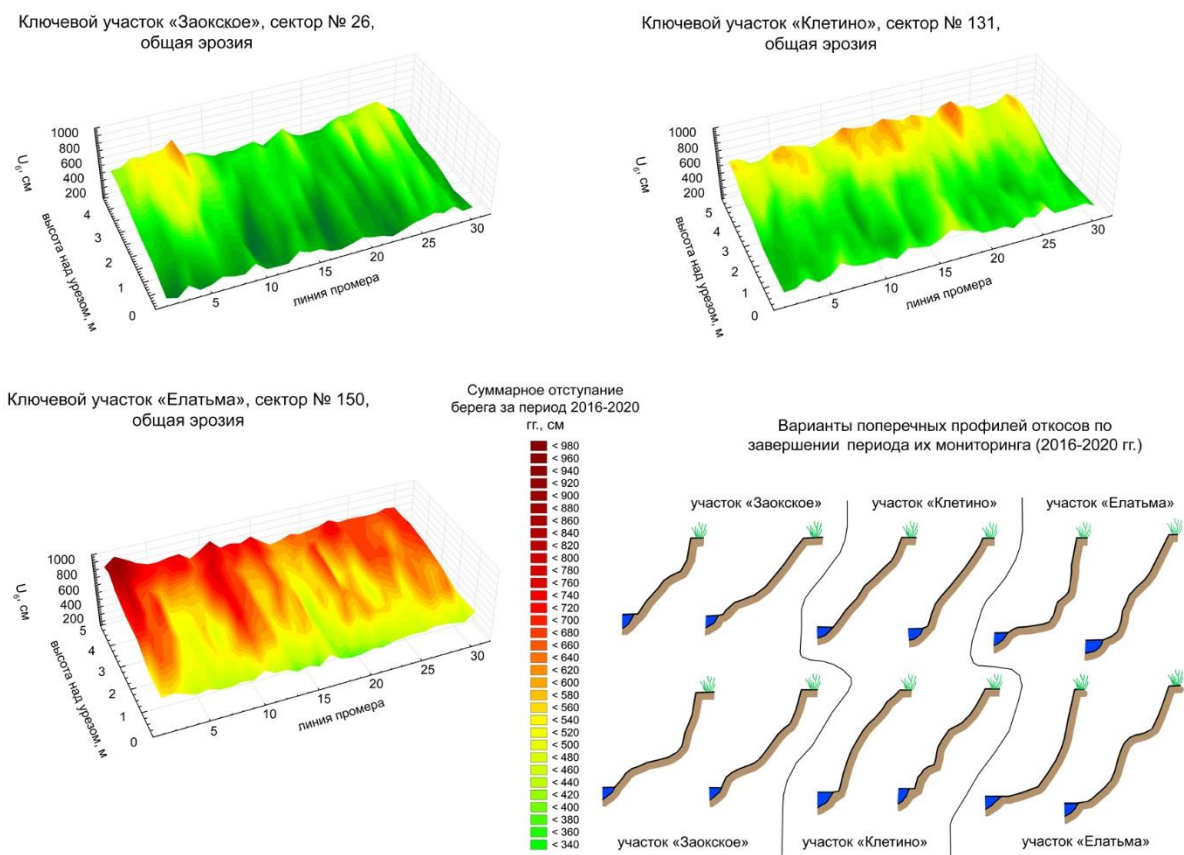


Рис. 6. Общее смещение плоскости берегов реки за годы наблюдений и приобретенные поперечные профили откосов

На секторе берега № 26 в ходе горизонтальных деформаций русла берег за 2016–2020 годы отступил на 4–5 м на уровне бровки и всего на 1,5–2,5 м — на уровне уреза Оки. Его морфоскульптура представлена крупными выемками, внешне схожими с фестонами, но являющимися, по нашим наблюдениям, результатами обрушения и выноса потоком значительных масс пойменного аллювия. Нижняя часть откоса при этом сохраняется, и берег за годы мониторинга приобрел пологий поперечный профиль. Бечевник неровный, в теплое время года осложнен многочисленными блоками пойменного аллювия, оползшими или отсевшими из верхней части откоса. Многочисленные выровненные фрагменты проекции откоса при моделировании его эрозии свидетельствуют о его равномерном отступании в нижней части, а узкие «ложбины» на проективном покрытии детерминированы остаточным перемещением отделившихся аллювиальных блоков и спуском к воде отдыхающих.

Простыми очертаниями кривой поперечного профиля отличается берег у села Клетино. Область наименьшей интенсивности боковой эрозии в нижней части откоса, как видно на визуализации моделирования береговой морфолитодинамики, находится не на урезе реки, а на высоте 1–2 м от него. Суммарная скорость эрозии в верхней части берега Оки в 2 раза выше, чем на уровне поверхности водоема (4–6 м/5 лет против 2–2,5 м/5 лет). Отметим, что, в отличие от прочих учетных площадок, берег на секторе фронта размыва № 26 представлен не двумя-тремя, а одним элементарным уклоном, крутизна которого приближается к 40–50° (рис. 6).

Вклад половодного потока в эрозию берегов был наиболее очевидным в 2018 году (рис. 5) (размывы со скоростью до 4–4,5 м/год), а в 2019 году эрозия по итогам весеннего паводка и летне-осенней межени была сопоставимой. Промежуточное положение в данном контексте занимают данные 2016–2017 годов, при этом самые активные «летние» разрушения берегов наблюдались в межень 2020 года.

Обсуждение полученных результатов

Как уже упоминалось, период с 2016 по 2020 год отличался заметной нестабильностью водного режима реки Оки в ее среднем течении, в частности максимальные расходы на створе «Половское»

колебались от 670 м³/с до 2 620 м³/с (рис. 3). Выход воды на пойму во время половодья считается благоприятным фактором развития береговых деформаций [Abernethy, Rutherford, 1998 ; Tapas, Dutta, 2011], что подтверждается ординацией значков фактических данных U_6 для 2018 года (рис. 5). Только при полном заполнении русла фиксировалось отступление берега более чем на 2 м/год. Напротив, в 2019 году поток при максимальных расходах всего в два раза больше нормальной меженной водности вызвал разрушения берегов, соответствующие обычным летне-осенним данным мониторинга. В 2020 году эрозия в межень была в 2,7 раза больше, чем в аналогичные сезоны прочих лет мониторинга. Причиной резкой мобилизации откосов стало прохождение летнего паводка, обеспечившего отступление нижних частей откосов на всех ключевых участках. Верхние их части к середине лета уже не были насыщенными влагой и разрушались, как правило, под действием антропогенного фактора.

Из трех ключевых участков, выбранных в качестве учетных площадок, самый высокий берег приурочен к вогнутому берегу Лашминской макроизлучины в низовьях реки Гусь. Максимальная высота откоса достигает 6,7–6,8 м, почти такой же высоты берег достигает на относительно прямолинейном участке окского русла около поселка Елатьма. Значимым для анализа данных половодного размыва оказывается литологический фактор: откос на секторе № 26 сложен преимущественно суглинками с развитыми палеопочвами. Последние выполняют у села Заокское 35–50 % высоты откоса, причем Ока размывает здесь древний морфологический комплекс рельефа с пачкой погребенной почвы мощностью около 1 м. Судя по многочисленным палеокротовинам и палеослепышинам, а также по другим диагностическим признакам, данную почву можно классифицировать как лугово-черноземную.

Формирование таких почв происходило в долине средней Оки около 6–9 тыс. лет назад, в атлантическую эпоху голоцена [Александровский, Гласко, 2014 ; Кривцов, Водорезов, Воробьев, Тобратов, 2020]. Типичные для них материнские породы — тяжелые суглинки и легкие глины, которые склонны сохранять форму при сдвиговых деформациях, особенно в сухой консистенции [Далматов, 1988]. Блоки, выполненные горизонтами отмеченной почвы, равно как и верхней, более молодой почвы лесного типа, отседают по магистральным трещинам во все сезоны года, за исключением зимы. Смещение таких блоков в нижнюю часть откоса объясняет фиксацию резких минимумов эрозионного процесса в межень на модели (рис. 5). Некоторые фрагменты откоса из-за меньшей внутренней прочности на сдвиг (в том числе при недостаточной связности грунтов) разрушаются быстрее соседних, по этой причине общая проекция скоростей эрозии берега рельефа ребристая (рис. 6).

Наличие рыхлых песков и супесей первой надпойменной террасы в основании откоса в привершинной части Канищевской излучины, казалось бы, должно способствовать интенсивному местному размыву вогнутого берега. Однако за последние 150 лет русло здесь было стабильным в плане [Воробьев, Пузаков, 2017], отмель на выпуклом берегу меандра практически не наращивалась. Очень медленное отступление основания берега объясняется еще и недостаточным локальным углом разворота излучины (100–110°) и в целом неблагоприятными гидродинамическими условиями для активной русловой переработки берега на вершине меандра с соотношением радиуса кривизны излучины и ширины русла $r/V_n=1,75$ (по форме излучина приближается к синусоидальной). Поэтому соотношение средней скорости размыва откоса весной и осенью здесь наименьшее среди ключевых участков — всего 2,75/1 для приборочной части берега и 3/1 для его основания (рис. 7).

Учетная площадка «Клетино» находится в привершинной части (угол разворота — 60–70°) Лашминской макроизлучины, очертания которой определяются в первую очередь морфоструктурным планом местности [Шанцер, 1951 ; Кривцов, Водорезов, Воробьев, Тобратов, 2020]. Эрозия осваивает только верхнее крыло меандра, который является вынужденным: нижнее его крыло примыкает к левому коренному борту долины, вскрывающему отложения Ковров-Касимовского плато в пределах Окско-Клязьминского вала. Тем не менее Лашминский меандр относится к сегментным крутым излучинам [Эрозионно-русловые системы, 2017], и от интенсивности размыва его тех или иных морфологических элементов будет зависеть, эволюционирует ли русловая форма далее в омеговидную или в синусоидальную. Очевидно, что горизонтальные русловые деформации в подобных условиях осуществляются медленно, за тысячи лет, однако ежегодный геоморфологический мониторинг все же может иметь фундаментальное значение в контексте контроля короткопериодных вариаций локальной морфолитодинамики в Касимовском сужении [Кривцов, Водорезов, Воробьев, Тобратов, 2020] днища окской долины — внутренних самостоятельных процессов пойменных звеньев эрозионно-русловой системы [Завадский, Кораблева, Чернов, 2016 ; Эрозионно-русловые системы, 2017].

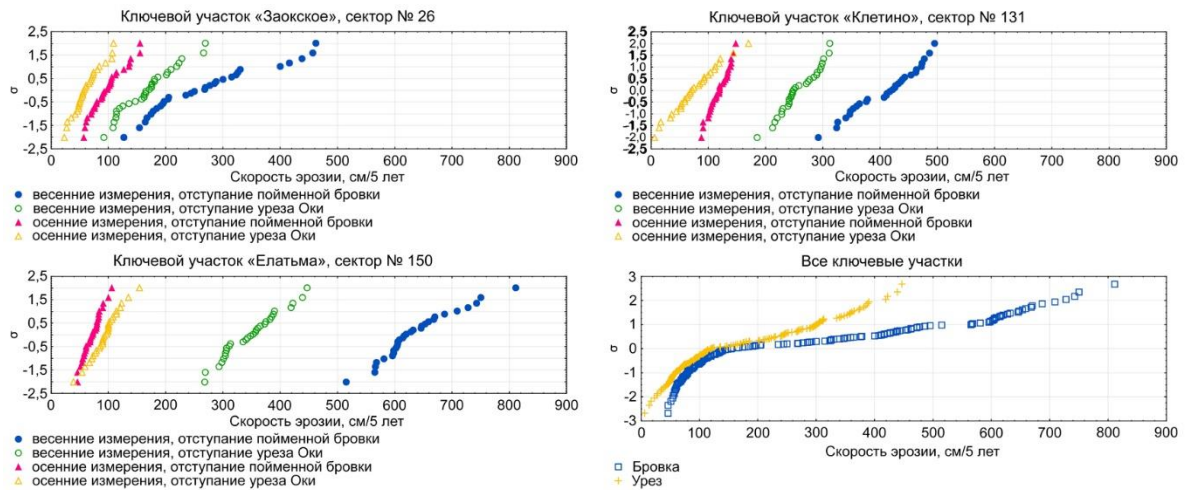


Рис. 7. Сравнительные скорости отступления пойменной бровки и уреза реки Оки на ключевых участках исследования

В настоящее время размыв пойменного берега на фрагменте вогнутого берега Оки № 131 достаточно интенсивен: откос лишен растительности и относится к первому типу по типизации М. М. Гендельмана (равномерный размыв) [Гендельман, 1975]. Большая часть фронта размыва здесь контактирует с потоком, что должно было вызвать интенсивное промачивание толщи почвогрунтов. При относительно однородном составе геологического наполнения берега молодой поймы процесс размыва на участке Клетино также происходил равномерно, что показано на соответствующей проекции плоскости скорости эрозии (рис. 5). Значительная крутизна откоса поддерживается за счет отседания блоков аллювия средних габаритов в зоне волнобоя в теплый период года. Тем не менее отношение средней скорости размыва откоса весной и осенью на урезе больше (3,8/1), чем на уровне пойменной бровки (3,4/1), то есть вклад половодного размыва в эрозию основания берега выше, чем роль летне-осенней эрозии. Кроме того, морфолитодинамика берега в межень характеризуется выполаживанием кривой поперечного профиля берега на фоне вертикального перераспределения почвогрунтов без их существенного гидродинамического экспорта.

Русловой изгиб реки Оки у поселка Елатьма (316–312 км от устья) имеет степень развитости менее 1,15, что не позволяет считать его полноценной излучиной [Кораблева, Чернов, 2008 ; Эрозионно-русловые системы, 2017]. Аттрактором интенсивного размыва правого окского берега является остановка макроформы донного рельефа (побочня) на противоположном берегу и наращивание высоты крупных гряд, осложняющих его поверхность. Направленная аккумуляция нарушает правило Э. Лейна [Lane, 1955], соблюдение которого необходимо для сохранения устойчивости русла, и на секторе берега Оки № 150 наблюдается компенсирующая боковая эрозия при отклонении динамической оси потока к правому пойменному берегу.

Как и в районе села Заокское, пойма в Елатомском расширении обладает распространенными в днищах долин крупных водотоков Русской равнины признаками прерывисто-динамического развития (наличие погребенных почв, смена морфодинамического типа русла) [Лазаренко, 1964 ; Кораблева, Чернов, 2008 ; Александровский, Гласко, 2014 ; Назаров, Копытов, Чернов, 2016], но, предположительно, более молодая. Погребенные почвы слагают лишь 10–15 % высоты откоса, берег сложен легкоразмываемыми породами, причем более мобильны почвогрунты в обнажениях пойменных грив по сравнению с пачками старичного аллювия в межгривных понижениях. Морфология фронта размыва позволяет отнести его, как и вогнутый берег на Канищевской излучине, к третьему типу (откос обрушения). Критические динамические нагрузки откоса, нарушающие его сложение, вызываются весенним размывом при наполнении половины русла или при выходе воды на центральную пойму. Эрозионные ниши существуют длительное время и различимы на проекциях скорости эрозии во все сезоны года. Прогресс их разрушения в межень обусловлен оползанием и отседанием блоков аллювия, в том числе и из-за посещения берега рекреантами. Но ведущее значение для отступления берега Оки на данной ключевой площадке имеет именно его половодный размыв. Отношение средней скорости

отступления откоса весной и осенью для приборочной части берега на секторе берега Оки № 150 самое широкое среди ключевых участков (8,8/1) и снижается вдвое (3,7/1) на уровне уреза водоема (рис. 7).

Соотнося результаты настоящего исследования с классификацией русел рек по степени устойчивости [Эрозионно-русловые системы, 2017], все наблюдаемые фрагменты фронтов размыва можно отнести к устойчивым ($U_{\text{сред.}} < 2$ м/год, $U_{\text{макс.}} = 2-5$ м/год) по скорости среднегодовой и максимальной эрозии. Берег у поселка Елатьма по этим показателям приближается к относительно устойчивому типу ($U_{\text{сред.}} = 2-5$ м/год, $U_{\text{макс.}} = 5-20$ м/год). Необходимо отметить, что в границах учетных площадок не выявлено наличие протяженных пачек грунтов, устойчивых, по результатам экспериментальных исследований [Смирнова, Лобанов, Бастраков, 2009], к размыву на водотоках, подобных реке Оке. Скальные породы и глинистые пачки не встречаются в исследованных обнажениях, а в практике мониторинга состояния слоистых, литологически однообразных откосов значимым оказывается количество актуальной информации о скорости рельефообразования, получаемой методом сложных реперов.

Заключение

В ходе исследования подтверждена высокая эффективность метода сложных реперов для геоморфологического мониторинга, несмотря на ряд его недостатков. Оценка скорости боковой эрозии русла реки Оки, проведенная за 2016–2020 годы, свидетельствует о повышенной скорости смещения откосов в верхней части на всех ключевых участках, в то время как основания берегов отстают в 1,5 раза медленнее. Эрозия почв и материнских аллювиальных пород происходит и в маловодные годы, когда река не выходит из берегов, и при затоплении поймы. Однако резкие проявления рельефообразования со скоростью более 2 м/год отмечались только во время половодья 2018 года. Применение метода сложных реперов позволило регистрировать подобные случаи, и выяснилось, что почти все они характерны для фрагмента берега относительно прямолинейного русла Оки у поселка Елатьма. Усредненное значение скорости эрозии откосов на данном участке на 150–200 % больше, чем в пределах фрагментов вогнутых берегов на излучинах Оки у сел Заокское и Клетино, и составляет 0,6 м/год. Общий план морфологии фронтов размыва на учетных площадках закладывается при весеннем воздействии потока на их поверхность. Детали морфологического плана добавляются в маловодную фазу водного режима реки Оки, хотя в каждом отдельном году эта простая двучленная схема может существенным образом трансформироваться.

Список источников

1. 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.
2. Баровский Н. А., Чалов Р. С. Гидролого-морфологический анализ и условия развития русел рек в бассейне р. Оки // Вестник Московского университета. Сер. 5 : География. — 2004. — № 2. — С. 63–68.
3. Беркович К. М., Злотина Л. В., Турыкин Л. А. Размыв речных берегов: факторы, механизм, деятельность человека // Геоморфология. — 2019. — № 2. — С. 3–17.
4. Биненко В. И., Иванов Р. В., Родионов В. З. Мониторинг рек, озер, суши на основе использования беспилотных летательных аппаратов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. — 2014. — № 34. — С. 106–114.
5. 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.
6. Воробьев А. Ю., Пузаков С. В. Динамика боковой эрозии на вогнутых берегах излучин реки Оки в ее среднем течении в XIX–XX веках и на современном этапе // Вестник Рязанского государственного университета. — 2017. — № 3 (56). — С. 150–157.
7. Вуколов Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. — М. : ФОРУМ, 2008. — 464 с.
8. Гендельман М. М. К вопросу о механизме переработки берегов речных русел // Метеорология и гидрология. — 1975. — № 12. — С. 89–94.
9. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты. — Л. : Стройиздат, 1988. — 415 с.
10. 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., 2010. — С. 220–251.
11. Завадский А. С., Кораблева О. В., Чернов А. В. Проявления дискретности флювиальных рельефообразующих процессов // Материалы XXXV Пленума Геоморфологической комиссии РАН. — 2016. — С. 139–143.

12. Киреева М. Б., Илич В. П., Гончаров А. В. [и др.]. Влияние маловодья 2007–2015 гг. в бассейне р. Дон на состояние водных экосистем // Вестник Московского университета. Сер. 5 : География. — 2018. — № 5. — С. 3–13.
13. 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.
14. Кривцов В. А., Водорезов А. В., Воробьев А. Ю., Тобратов С. А. Особенности и результаты проявления экзогенных рельефообразующих процессов в долине р. Оки в ее среднем течении в голоцене / под общ. ред. В. А. Кривцова. — Рязань : Ряз. гос. ун-т им. С. А. Есенина, 2020. — 174 с.
15. Лазаренко А. А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны, Оки) // Труды Геологического института. — М. : Наука, 1964. — Вып. 120. — 236 с.
16. 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.
17. Симонов Ю. Г. Геоморфология. Методология фундаментальных исследований. — СПб. : Питер, 2005. — 302 с.
18. 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.
19. Эрозионно-русловые системы / под ред. Р. С. Чалова, В. Н. Голосова, А. Ю. Сидорчука. — М. : ИНФРА-М, 2017. — 702 с.
20. Шанцер Е. В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Труды Института геологии Академии наук СССР. Геологическая серия. — М. : Наука, 1951. — Вып. 135. — 271 с.
21. Abernethy B., Rutherford I. D. Where along a rivers's length will vegetation most effectively stabilize stream banks? // Geomorphology. — 1998. — Vol. 23, iss. 1. — Pp. 55–75.
22. Jugie M., Goba F., Virmoux 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.
23. Knighton A. D. Fluvial forms and processes. A New Perspective, Arnold. — London, 1998. — 383 p.
24. Lane E. W. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering // Proceedings, American Society of Civil Engineers. — 1955. — Vol. 81, iss. 7. — Pp. 1–17.
25. Lawler D. M., Grove J. R., Couperthwaite J. S., Leeks G. J. L. Downstream change in river bank erosion rates in the Swale-Ouse system, northern England // Hydrological Processes. — 1999. — Vol. 13, iss. 7. — Pp. 977–992.
26. Shu A., Li F., Liu H. [et al.]. Characteristics of particle size distributions for the collapsed riverbank along the desert reach of the upper Yellow River // International Journal of Sediment Research. — 2016. — Vol. 31. — Pp. 291–298.
27. 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.
28. Tapas K., Dutta S. Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India // Hydrological Processes. — 2011. — Vol. 25, iss. 1. — Pp. 104–111.
29. Xia J., Deng S., Lu J., Xu Q. Dynamic channel adjustments in the Jingjiang Reach of the Middle Yangtze River // Scientific Reports. — 2016. — Vol. 6, iss. 1. — Pp. 228–242.
30. Zong Q., Xia J., Zhou M. [et al.]. Modelling of the retreat process of composite riverbank in the Jingjiang Reach using the improved BSTEM // Hydrological processes. — 2017. — Vol. 31, iss. 26. — Pp. 127–141.

References

1. A. L. Aleksandrovsky and M. P. Glasko. Interaction of alluvial and soil-forming processes at different stages of the formation of floodplains of lowland rivers in the Holocene (on the example of the rivers of the central part of the East European Plain. *Geomorphologiya* [Geomorphology]. 2014, iss. 4, pp. 3–17. (In Russian).
2. Barovsky N. A., Chalov R. S. Hydrological and morphological analysis and conditions for the development of river channels in the basin of the River Oka. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography]. 2004, iss. 2, pp. 63–68. (In Russian).
3. Berkovich K. M., Zlotina L. V., Turykin L. A. Erosion of river banks: factors, mechanism, human activity. *Geomorphology* [Geomorphology]. 2019, iss. 2, pp. 3–17. (In Russian).
4. Binenko V. I., Ivanov R. V., Rodionov V. Z. Monitoring of rivers, lakes and land based on the use of unmanned aerial vehicles. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Scientific Notes of Russian State Hydrometeorological University]. 2014, iss. 34, pp. 106–114. (In Russian).
5. Vorobyov A. Yu., Kadyrov A. S. Field studies of the retreat of the banks of the Oka River bed in 2014–2018 based the method of simple benchmarks. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin]. 2020, iss. 3 (54), pp. 30–45. (In Russian).

6. Vorobyov A. Yu., Puzakov S. V. Dynamics of lateral erosion on concave banks of the bends of the Oka River in its middle reaches in the 19th–20th centuries and at the present stage. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Ryazan State University]. 2017, iss. 3 (56), pp. 150–157. (In Russian).
7. Vukolov E. A. *Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsiy s ispolzovaniyem paketov STATISTICA i EXCEL* [Basics of statistical analysis. Practical course on statistical methods and operations research using STATISTICA and EXCEL packages]. Moscow, FORUM Publ., 2008, 464 p. (In Russian).
8. Gendelman M. M. On the mechanism of processing the banks of river channels. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology i hydrology]. 1975, iss. 12, pp. 89–94. (In Russian).
9. Dalmatov B. I. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti* [Mechanics of soils, their bases and foundations]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1988, 415 p. (In Russian).
10. Zavadsky A. S., Lobanov G. V., Petukhova L. N. [et al.]. Results of stationary studies of riverbed processes in European Russia. *Eroziionnyye i ruslovyye protsessy* [Erosion and channel processes]. Ed. R. S. Chalov]. Moscow, 2010, pp. 220–251. (In Russian).
11. Zavadsky A. S., Korableva O. V., Chernov A. V. Manifestations of discreteness of fluvial relief-forming processes. *Materialy XXXV Plenuma Geomorfologicheskoy komissii RAN* [Proceedings of the XXXV Plenum of the Geomorphological Commission of the Russian Academy of Sciences]. 2016, pp. 139–143. (In Russian).
12. Kireyeva M. B., Ilich V. P., Goncharov A. V. [et al.]. 2007–2015 low water impact in the River Don basin on the state of aquatic ecosystems. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Ser. 5: Geography]. 2018, iss. 5, pp. 3–13. (In Russian).
13. Korableva O. V., Chernov A. V. Experience of monitoring channel deformations on wide floodplain rivers (example of the Kerzhenets River). *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and Natural Resources]. 2008, iss. 2, pp. 158–165. (In Russian).
14. Krivtsov V. A., Vodorezov A. V., Vorobyov A. Yu., Tobratov S. A. *Osobennosti i rezultaty proyavleniya ekzogennykh relyefoobrazuyushchikh protsessov v doline r. Oki v yeyo srednem techenii v golotsene* [Events and results of exogenous relief-forming processes in the Oka River in its middle course in the Holocene]. Gen. ed. V. A. Krivtsov. Ryazan, Ryazan State University named for S. A. Yesenin Publ., 2020, 174 p. (In Russian).
15. Lazarenko A. A. *Litologiya allyuviya ravninnykh rek gumidnoy zony (na primere Dnepra, Desny, Oki). Trudy Geologicheskogo instituta* [Works of Geology Institute]. Moscow, Nauka Publ., 1964, iss. 120, 236 p. (In Russian).
16. Nazarov N. N., Kopytov S. V., Chernov A. V. On the age of floodplains with discontinuous dynamic development (example of the upper flow of Kama). *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin]. 2016, iss. 3 (38), pp. 15–27. (In Russian).
17. Simonov Yu. G. *Geomorfologiya. Metodologiya fundamentalnykh issledovaniy* [Geomorphology. Methodology of fundamental research]. St. Petersburg, Piter Publ., 2005, 302 p. (In Russian).
18. Smirnova E. A., Lobanov G. V., Bastrakov G. V. Influence of strength characteristics of soils on the intensity of channel deformations in the middle reaches of the River Desna. *Geomorfologiya* [Geomorphology]. 2009, iss. 2, pp. 75–84. (In Russian).
19. *Eroziionno-ruslovyye sistemy* [Systems of riverbed erosion]. Ed. R. S. Chalov, V. N. Golosov, A. Yu. Sidorchuk]. Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 702 p. (In Russian).
20. Shantser E. V. *Allyuviiy ravninnykh rek umerennogo poyasa i yego znachenie dlya poznaniya zakonmernostey stroyeniya i formirovaniya allyuvialnykh svit. Trudy Instituta geologii Akademii nauk SSSR. Geologicheskaya seriya* [Proceedings of Institute of Geology of Academy of Sciences of USSR. Geological series]. Moscow, Nauka Publ., 1951, iss. 135, 271 p. (In Russian).
21. Abernethy B., Rutherford I. D. Where along a river's length will vegetation most effectively stabilize stream banks? *Geomorphology*. 1998, vol. 23, iss. 1, pp. 55–75.
22. 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.
23. Knighton A. D. *Fluvial forms and processes. A New Perspective*, Arnold. London, 1998, 383 p.
24. Lane E. W. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings, American Society of Civil Engineers*. 1955, vol. 81, iss. 7, pp. 1–17.
25. Lawler D. M., Grove J. R., Couperthwaite J. S., Leeks G. J. L. Downstream change in river bank erosion rates in the Swale-Ouse system, northern England. *Hydrological Processes*, 1999, vol. 13, iss. 7, pp. 977–992.
26. Shu A., Li F., Liu H. [et al.]. Characteristics of particle size distributions for the collapsed riverbank along the desert reach of the upper Yellow River. *International Journal of Sediment Research*. 2016, vol. 31, pp. 291–298.
27. 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.
28. Tapas K., Dutta S. Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India. *Hydrological Processes*. 2011, vol. 25, iss. 1, pp. 104–111.
29. Xia J., Deng S., Lu J., Xu Q. Dynamic channel adjustments in the Jingjiang Reach of the Middle Yangtze River. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, iss. 1, pp. 228–242.

30. Zong Q., Xia J., Zhou M. [et al.]. Modelling of the retreat process of composite riverbank in the Jingjiang Reach using the improved BSTEM. *Hydrological processes*. 2017, vol. 31, iss. 26, pp. 127–141.

Информация об авторах

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.

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.

Балобина Анна Александровна — студент 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.

Information about the authors

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.

Kadyrov Aleksandr Sergeyeovich — 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.

Balobina Anna Aleksandrovna — student 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 human settlement in floodplain territories, methods of field geomorphological studies.

Статья поступила в редакцию 01.02.2023; принята к публикации 15.03.2023.

The article was submitted 01.02.2023; accepted for publication 15.03.2023.