

УДК 551.4.042

ДЕФОРМАЦИИ РУСЕЛ МАЛЫХ РЕК БАСЕЙНА КУДЬМЫ И ИХ СВЯЗЬ С ФАКТОРАМИ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

(по данным стационарных наблюдений за 2010–2023 гг.)

А.Л. Варенов

Нижегородский государственный педагогический университет имени К. Минина,
г. Нижний Новгород, Россия
varenovgeo@gmail.com

Поступила в редакцию 10.02.2025

После доработки 19.02.2025

Принята к публикации 22.03.2025

Аннотация. Изменения русел малых рек происходят в условиях небольшой водоносности, значительной зависимости морфологии и морфометрии от местных факторов, чувствительности к антропогенному воздействию. Это обуславливает низкую интенсивность размыва и возникновение многообразия ее связей с факторами русловых процессов, что затрудняет анализ развития русловых деформаций. Проведение исследований на стационарах способствует решению указанной проблемы. В статье рассматриваются методы исследований, методика анализа и некоторые результаты исследований размывов берегов на 15 участках русел малых рек в бассейне Кудьмы за период с 2010 по 2023 г. Данные измерений показывают значительный разброс значений показателей размыва на разных участках: длина фронта размыва $l_{\text{разм}}$ составляет от 10 до 80 м, площадь размыва $F_{\text{разм}}$ — от 2 до 15 м²/год, средняя скорость размыва $C_{\text{ср.}}$ — от 0.1 до 0.3 м/год, максимальная скорость — от 0.4 до 1.0 м/год. Выявление связей этих величин с факторами русловых процессов (водность, геолого-геоморфологические условия, морфодинамический тип русла, местные условия) позволило разделить исследуемые русла на группы с качественными различиями проявления морфодинамики. На относительно прямолинейных участках русел развитие размывов в значительной степени определяется местными условиями. Наиболее четкие связи показателей размыва с определяющими их факторами характерны для свободных излучин. Наиболее тесные связи с условиями руслоформирования имеет площадь размыва $F_{\text{разм}}$.

Ключевые слова: размыв берегов, научные стационары

DOI: [10.71367/3034-4638-2025-2-1-61-72](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2025-2-1-61-72)

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов русловых исследований являются стационарные наблюдения за размывом берегов, проводившиеся в последние десятилетия на реках Европейской части России и Сибири (Завадский, Лобанов и др., 2010; Коркин, Исыпов, 2022). Мониторинг отступления берегов на стационарах позволяет получить детальные данные о пространственно-временной динамике смещения русел в плане, сравнить их с данными расчетов по картографическим источникам и космическим снимкам, выявить зависимость их темпов и направленности от водности потока, формы русла, его морфометрических характеристик, других факторов русловых процессов.

Небольшая водоносность малых рек, невысокая естественная зарегулированность стока, особые условия взаимодействия потока и русла вследствие соизмеримости его глубины и ширины, высокая степень зависимости морфологии и морфометрии русел от местных факторов, чувствительность к антропогенному воздействию обуславливают возникновение разных вариантов развития размывов берегов при их относительно низкой интенсивности. В этих условиях данные стационарных наблюдений становятся особенно ценными. Если учесть, что русловые процессы именно на малых реках относятся к числу наименее изученных, то организация и проведение таких наблюдений приобретают особую актуальность.

МЕТОДЫ

Стационарные исследования русловых процессов на малых реках бассейна Кудьмы (правый приток Волги ниже г. Кстово перед Чебоксарским водохранилищем) осуществляются с 2010 г. совместно с сотрудниками Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Макавеева МГУ имени М.В. Ломоносова, под общим руководством профессора Р.С. Чалова¹. В связи с многофакторностью процессов применялись разные методы исследования, уточнялась методика, расширялась программа наблюдений. В настоящее время наблюдения проводятся на 15 участках. Помимо измерения горизонтальных деформаций берегов (их отступления вследствие размыва), производятся отбор проб донных отложений, промеры глубин по стрежню потока, измерение расходов воды и уклонов водной поверхности, составляются детальные описания и планы с характеристикой ландшафтной обстановки.

При характеристике горизонтальных русловых деформаций используются следующие показатели размыва:

1) протяженность фронта размыва $l_{\text{разм}}$ — линия, по которой фиксируется отступление бровки берега, м;

2) площадь размыва $F_{\text{разм}}$ — площадь между начальным и конечным положениями бровок берегового уступа за определенный период времени, м²;

3) средняя скорость размыва $C_{\text{ср.}}$ — рассчитывается как отношение площади размыва к протяженности средней линии, соединяющей начало и конец участка размыва за определенный период времени, м/год;

4) максимальная годовая скорость размыва C_{max} — наибольшее расстояние между начальным и конечным положениями бровок, м/год;

5) удельная площадь размыва $F_{\text{уд.разм}} = F_{\text{разм}} / l_{\text{разм.}}$, м²/м.

Исходными данными для расчета показателей размыва являются данные съемок положения береговых бровок на стационарах от постоянной реперной сети, полученные методом полигонов (измерения перпендикуляров от линии между реперами), электронным тахеометром, GNSS-оборудованием и с помощью аэрофотосъемки БПЛА. Значения показателей определялись путем создания и сопоставления планов бровок в программах Microstation и Qgis.

При построении зависимостей использовались средние многолетние значения показателей размывов за период 2010–2023 гг. (табл. 1). Ряды наблюдений на стационарах составляют от 10 до 13 лет.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория — бассейн р. Кудьмы — расположена на севере Приволжской возвышенности, характеризуется разнообразием природных условий и длительной историей хозяйственного освоения. Главная река бассейна Кудьма (до впадения самого крупного притока — р. Озёрки) и ее притоки имеют длину $x < 120$ км, площадь водосбора $F < 2000$ км², средний многолетний расход воды $Q_{\text{ср.}} < 6.5$ м³/с, средний максимальный расход $Q_{\text{ср. max}} < 90$ м³/сек, порядок (модель А.Е. Шайдегера) $N < 8.4$. С точки зрения развития русловых процессов все реки бассейна являются малыми равнинными, за исключением участка нижнего течения р. Кудьмы (от слияния с р. Озёркой), который следует относить к средним рекам. Водотоки первых порядков обладают собственной спецификой морфологии и динамики русел.

Объектами исследования являются размываемые участки русел малых рек Кудьмы, Озёрки, Сетчуги и Печети, отличающиеся водностью, геоморфологическими условиями развития, морфодинамическими типами русел, локальными условиями размыва и видами хозяйственного воздействия, с которыми во многом связано развитие вертикальных русловых деформаций (табл. 2). Стационары полностью или частично охватывают форму русла в зависимости от распространения размывов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе горизонтальных русловых деформаций важным является учет условий формирования русел. Одними из активных факторов русловых процессов на малых реках являются сток воды, геолого-геоморфологические условия и форма русла.

Сток воды определяет размеры русла, которые находятся в прямой зависимости от его величины. Отмечается, что связь ширины русла b_p с расходом воды Q более тесная, чем глубины h_p . Водность реки зависит от площади водосбора F , которая, в свою очередь, связана с длиной реки x , поэтому условия руслоформирования, морфометрические характеристики и параметры форм русла изменяются по длине реки (Чалов, 2008).

При недостаточности гидрологических данных для проведения расчетов определяют порядок реки N — показатель, дающий осредненное представление о размере реки. Наиболее надежные оценки изменений гидрологических и русловых характеристик рек дает модель А.Е. Шайдегера

¹ На разных этапах в проведении натурных наблюдений участвовали Д.В. Ботавин, А.С. Завадский, Н.М. Михайлова, А.М. Тарбеева, Л.А. Турыкин, Д.И. Школьный и др.

Таблица 1. Средние годовые значения показателей размыва (по данным стационарных наблюдений за 2010–2023 гг.)**Table 1.** Average annual values of erosion indicators (based on stationary observations from 2010 to 2023)

№ п/п	Стационар	Ряд наблюдений, лет	Показатели размыва*				
			$l_{\text{разм}},$ м	$F_{\text{разм}},$ м ²	$C_{\text{ср.}},$ м/год	$C_{\text{тах}},$ м/год	$F_{\text{уд.разм}},$ м ² /м
1.	р. Кудьма – д. Лакша	12	10.24	3.11	0.13	0.46	0.30
2.	р. Кудьма – п. Буревестник-1	12	10.33	1.77	0.11	0.4	0.17
3.	р. Кудьма – п. Буревестник-2	13	13.47	2.03	0.09	0.39	0.15
4.	р. Кудьма – к.п. Зеленый город-1	13	24.6	5.69	0.15	0.56	0.23
3.	р. Кудьма – к.п. Зеленый город-2	13	14.7	2.26	0.12	0.38	0.15
4.	р. Кудьма – д. Зелецино-1	2	13	1.8	0.13	0.3	0.14
5.	р. Кудьма – д. Зелецино-2	11	34.8	9.77	0.17	0.7	0.28
6.	р. Кудьма – д. Зелецино-3	10	15.3	3.17	0.13	0.41	0.21
7.	р. Кудьма – д. Ветчак	13	17.56	3.76	0.13	0.56	0.21
8.	р. Озёрка – с. Чернуха	11	79.47	14.67	0.14	0.7	0.18
9.	р. Озёрка – с. Кужutki-1	13	52.76	15.33	0.26	0.93	0.29
10.	р. Озёрка – с. Кужutki-2	13	31.3	9.77	0.19	0.49	0.31
11.	р. Озёрка – д. Белозерово	11	18.39	3.73	0.15	0.59	0.19
12.	р. Сетчуга – с. Ивановское	11	35.3	6.61	0.16	0.69	0.18
13.	р. Печеть – д. Александровка	12	33.2	5.24	0.13	0.46	0.16

* Показатели размыва:

 $l_{\text{разм}}$ – протяженность фронта размыва, м $F_{\text{разм}}$ – площадь размыва, м² $C_{\text{ср.}}$ – средняя скорость размыва, м/год $C_{\text{тах}}$ – максимальная годовая скорость размыва, м/год $F_{\text{уд.разм}}$ – удельная площадь размыва, м²/м

(в модификации Н.И. Алексеевского), поскольку учитывает постепенное увеличение водности рек по мере впадения любого притока. Характер изменений зависимости между порядком N и характеристиками русла говорит о качественных различиях руслоформирования и применяется для определения «русловых» границ групп водотоков разного размера (Малые реки волжского бассейна, 1998; Пахомова, 2001). Так, $N = 9–10$ принято считать границей между малыми и средними реками.

На графиках $b_p = f(N)$ и $x = f(N)$ для рек бассейна р. Кудьмы перегибы кривых приходятся на порядки рек, равные 7.9 и 8.3 (рис. 1). Это позволяет разделить стационары на группы внутри категории «малые реки» и уточнить границу категории «средние реки» (табл. 3).

Подтверждением верности использования $N = 8.3$ в качестве «русловой» границы является резкое увеличение морфологических параметров свободных сегментных излучин в нижнем течении р. Кудьмы после впадения р. Озёрки (табл. 4).

По мере увеличения длины и водности рек происходят снижение уклонов русла и увеличение стока руслообразующих наносов, проявляющиеся во всё большем количестве прирусловых отмелей и других форм руслового рельефа, что сопровождается образованием излучин и фронтов размыва берегов. На р. Кудьме в условиях поступления большого количества наносов с залесенной песчаной задровой равнины формирование излучин начинается при $N = 3.1$ (9 км от истока) и уклоне русла $I = 0.007$. На р. Озёрке русло сохраняет прямолинейную форму до $N = 5.7$ (17 км от истока) и $I = 0.005$: здесь днище долины преимущественно заболоченное, сложенное торфяными отложениями, низкие берега покрыты травянистой растительностью.

Возможности проявления горизонтальных деформаций и местные условия размыва связаны, таким образом, с геолого-геоморфологическим строением долин рек.

Большинство стационаров расположено на участках широкопойменного русла с соотношением

Таблица 2. Основные характеристики объектов исследования (стационаров)**Table 2.** Main characteristics of monitoring sites

№ п/п	Стационар	F , км ²	N	$h_{\text{бер}}$, м	Тип русла	Основные виды антропо- генного воздействия
1.	р. Кудьма — д. Лакша	744.7	7.44	2.5	Относительно прямоли- нейное, адаптированное к надпойменной террасе	Мелиоративное спрямление и обвалование русла
2.	р. Кудьма — п. Буревестник-1	1101.9	7.9	3.0	Свободная излучина, $l/L^* = 1.13$	Мелиоративное спрямление русла, строительство дамбы и шлюза выше по течению
3.	р. Кудьма — п. Буревестник-2	1104.1	7.9	3.0	Относительно прямоли- нейное, адаптированное к надпойменной террасе	
4.	р. Кудьма — к.п. Зеленый город-1	1686.3	8.21	4.5	Свободная излучина, $l/L = 1.86$	Мелиоративное спрямление русла, строительство берегоукрепительных сооружений
5.	р. Кудьма — к.п. Зеленый город-2	1709.2	8.21	3.5	Адаптированная излучина, $l/L = 2.29$	
6.	р. Кудьма — д. Зелецино-1	1799.7	8.23	3.6	Свободная излучина, $l/L = 2.3$	Строительство пойменных карьеров, подпор от Чебоксарского водохранилища
7.	р. Кудьма — д. Зелецино-2	1799.7	8.23	3.6	Свободная излучина, $l/L = 2.3$	
8.	р. Кудьма — д. Зелецино-3	1799.7	8.23	3.6	Адаптированная излучина, $l/L = 2.4$	
9.	р. Кудьма — д. Ветчак	2497.4	9.18	4.0	Свободная излучина, $l/L = 1.6$	Подпор от Чебоксарского водохранилища
10.	р. Озёрка — с. Чернуха	995.2	7.84	4.0	Свободная излучина, $l/L = 1.4$	Подпор от Чебоксарского водохранилища
11.	р. Озёрка — с. Кужутки-1	687.7	7.31	4.3	Свободная излучина, $l/L = 1.71$	Спуск временных плотин
12.	р. Озёрка — с. Кужутки-2	645.9	7.29	6.0	Вписанная излучина, $l/L = 2.6$	Спуск временных плотин
13.	р. Озёрка — д. Белозерово	87.5	5.74	5.5	Врезанная излучина, $l/L = 2.4$	Спуск временных плотин, строительство мелиоративных каналов на пойме
14.	р. Сетчуга — с. Ивановское	332.3	6.12	1.5	Свободная излучина, $l/L = 2$	—
15.	р. Печеть — д. Александровка	215.7	4.42	1.2	Свободная излучина, $l/L = 1.8$	Подпор от постоянной плотины

* l/L — степень развитости излучин: l — длина, L — шаг.

ширины поймы и русла $B_n/b_p \approx 30-70$ и характери-
зуется свободными условиями развития русловых
деформаций, размеры и форма русла преимуще-
ственно определяются характеристиками потока.

При подходе рек к надпойменным террасам и
коренным берегам развитие форм русел полно-
стью или частично контролируется ими, создаются

адаптированные условия. В первом случае проис-
ходит формирование относительно прямолинейных
русел, заваливание и спрямление вынужденных
излучин (стационар р. Кудьма — к.п. Зеленый го-
род-2), в сужениях дна речной долины — размыв
террас с образованием вписанных излучин (стаци-
онар р. Озёрка — с. Кужутки-2). Во втором случае

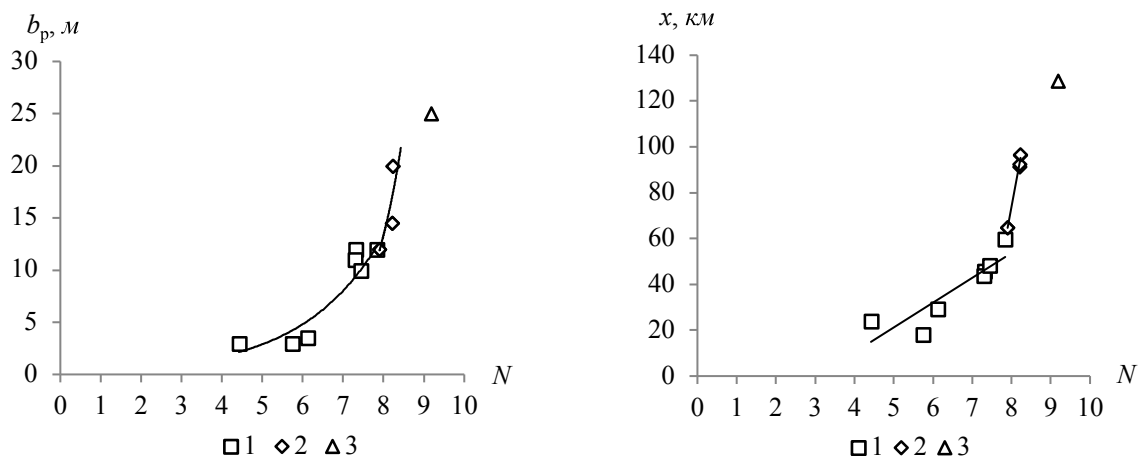


Рис. 1. Зависимость ширины русел b_p рек бассейна р. Кудьмы (на участках стационаров) и их длины (от истока) x от порядка N . Группы стационаров: 1 — $N < 7.9$; 2 — $N = 7.9-8.3$; 3 — $N > 8.3$

Fig. 1. Channel width—stream order chart and channel length—stream order chart for different groups of monitoring sites: 1 — $N < 7.9$; 2 — $N = 7.9-8.3$; 3 — $N > 8.3$

происходит сжатие излучин и приобретение ими гипертрофированной формы (р. Кудьма — д. Зелцеино-3).

Появление врезанных русел ($B_n/b_p < 2$) связано с антропогенными причинами: спуск мельничных плотин и строительство мелиоративных каналов на пойме (стационар р. Озёрка — д. Белозерово). Руслу отличаются наследованием формы, образовавшейся в период, когда они были широкопойменными, и стабильностью положения. Развитие горизонтальных русловых деформаций связано с образованием водоворотных зон в вершинах крутых сегментных и омеговидных излучин при нарушении условия безотрывного движения потока вдоль берегов ($b_p = 2.6r$).

В зависимости от того, с каким геоморфологическим элементом речной долины контактирует водный поток, меняется высота размываемых берегов. На стационарах с низкой поймой она составляет от 1.2 до 3 м, с высокой поймой — от 3 до 4.5 м, с надпойменной террасой — 6 м. На врезанных руслах пойма стала незатопляемой антропогенной террасой, высота береговых уступов значительно превышает естественную и увеличивается до 5.5 м.

Высота берегов влияет на их размывы совместно с воздействием других факторов — изменчивостью стока воды и условиями прохождения руслоформирующих расходов, литологией берегов, наличием неровностей береговых откосов.

На реках бассейна Кудьмы со свободными условиями развития русловых деформаций выделяются три интервала руслоформирующих расходов Q_f : верхний, проходящий при затопленной пойме; средний в пойменных бровках и нижний до выхода воды на пойму (Варенов, Ботавин и др., 2015). Для малых рек рассматриваемого бассейна

было выделено два пика в верхнем интервале обеспеченностью 0.06 и 0.2% и один пик в среднем интервале. Как правило, они имеют место во время половодья и играют основную роль в формировании формы русла. При значительной глубине затопления поймы интенсивность размывов может уменьшаться. В нижнем интервале выделяется несколько пиков, соответствующих паводкам, оказывающим в основном влияние на нижние части береговых уступов, и межени, при которых идет переформирование рельефа дна. Адаптированные, вписанные и врезанные русла на участках с незатопляемыми берегами характеризуются большей площадью взаимодействия водного потока и берегового откоса во время половодья, что приводит к увеличению размыва по сравнению с пойменными берегами. Также высокий берег может определять направление водного потока и тем самым влиять на распределение зон размыва.

Пойменные берега имеют неоднородное строение и сложены суглинками и песками, реже — только суглинками. Надпойменные террасы представлены песчаными отложениями, наиболее легко размываемыми. Берега врезанных русел сложены оторфованными суглинками, нижние части берегов и дно — коренными глинами, что обуславливает дефицит наносов и во многом определяет развитие русловых деформаций.

Перед неровностями берега возникает сопротивление движению воды, формируются водовороты. Чаще всего их образование связано с обрушением суглинистых блоков и наличием деревьев, частично перегораживающих русло, на берегах высотой до 3 м. Как правило, в таких местах наблюдаются

Таблица 3. Группы стационаров в зависимости от связей $b_p = f(N)$ и $x = f(N)$ **Table 3.** Groups of monitoring sites with different relationships $b_p = f(N)$, $x = f(N)$

Характеристика	Группы стационаров по порядку реки N		
Порядок	< 7.9	$7.9-8.3$	> 8.3
Площадь водосбора, км ²	< 1000	$1000-2000$	> 2000
Длина реки, км	< 60	$60-120$	> 120
Ширина реки, м	< 12	$12-20$	> 20
Уравнение связи $b_p = f(N)$	$b_p = 0.2247e^{0.5107N}$ $R = 0.91$	$b_p = 0.0015e^{1.1376N}$ $R = 0.82$	—
Уравнение связи $x = f(N)$	$x = 10.83N - 32.935$ $R = 0.88$	$x = 92.611N - 666.96$ $R = 0.99$	—

Таблица 4. Изменение морфологических параметров русла р. Кудьмы**Table 4.** Changes of morphological parameters of the Kudma river channel

Характеристика	Участок р. Кудьмы	
	Выше устья р. Озёрки	Ниже устья р. Озёрки
Длина от истока, км	117	144
Площадь водосбора, км ²	1951	3220
Порядок	8.3	9.4
Морфологические параметры излучин:		
- длина l , м	227	670
- шаг L , м	169	453
- радиус кривизны r , м	69	160
- стрела прогиба h_u , м	67	190

максимальные скорости размыва, очертания берега могут приобретать фестончатый характер.

На переформирования берегов влияет форма русла. На прямолинейных участках размывы наблюдаются только при возникновении условий, вызывающих локальное смещение потока в сторону берега под определенным углом. Наиболее распространенной формой русла малых рек являются излучины. Эволюция излучин от их зарождения до спрямления сопровождается увеличением кривизны русла и делится на стадии, характеризующиеся определенной формой излучин, распределением зон размыва и намыва, темпами горизонтальных деформаций (Чалов и др., 2004). По мере перехода излучины от одной стадии развития к следующей меняется степень развитости l/L — соотношение длины и шага излучины. Стационары представлены как сегментными ($l/L < 2$), так и петлеобразными излучинами ($l/L > 2$), стационар р. Кудьма — д. Зелецино-3 охватывает часть синусоидальной излучины ($l/L = 2.4$).

Условия размыва меняет хозяйственная деятельность. Одним из наиболее распространенных видов антропогенного воздействия в бассейне явля-

ется мелиоративное спрямление русла, проведенное на участках р. Кудьмы общей протяженностью 75 км. Оно привело к уменьшению извилистости русла, его врезанию (по данным кривых $Q = f(H)$ для г.п. Хвощевка и г.п. Новая), превращению большей части поймы в надпойменную террасу, отмиранию бывших излучин и формированию стариц уже на террасе. В начальный период существования спрямленное русло представляет собой канал с открытыми размываемыми берегами. Затем русло стабилизируется, берега зарастают преимущественно травянистой растительностью, участки размыва сосредотачиваются на немногочисленных пологих, реже крутых, изгибах русла и в местах слива воды с поймы по старичным понижениям во время половодья. Отсутствие древесной растительности снижает вероятность формирования локальных водоворотных зон, отсевшие блоки грунта блокируют отступление берега на несколько лет, значения показателей размыва снижаются.

Среди антропогенных факторов русловых процессов также следует отметить подпор от Чебоксарского водохранилища, влияющий на условия

прохождения руслоформирующих расходов и приводящий к уменьшению размыва.

Для анализа связей факторов динамики русел и показателей размыва стационары разделены на группы по основным условиям руслоформирования (табл. 5).

Согласно исследованиям Е.В. Камаловой (1988) и О.М. Пахомовой (2001), существует прямая связь между скоростью отступления берега и порядковой структурой рек: при увеличении порядка реки происходит рост скорости размыва берегов. При этом скорости размыва берегов рек разной водности в пределах морфологически однородных участков в каждом случае определяются конкретным сочетанием основных факторов деформаций. На малых реках Приволжской возвышенности ($Q_{\text{ср.мах}} < 100 \text{ м}^3/\text{сек}$) скорость отступления суглинистых берегов $C_{\text{ср.}}$ не меняется при увеличении порядка N и остается в пределах 2 м/год, скорость отступления песчаных берегов возрастает. И.И. Рысин и Л.Н. Петухова (2006) при анализе данных полевых наблюдений на реках Удмуртии также отмечают увеличение показателей размыва ($C_{\text{ср.}}$, $C_{\text{мах.}}$, $F_{\text{уд.разм}}$) с ростом порядка реки по выделенным группам: $N < 6$, $N = 6-9$, $N > 9$.

Анализ зависимости показателей размыва от порядка реки N по наблюдениям на стационарах в бассейне р. Кудьмы (рис. 2) позволяет сделать следующие выводы. Интенсивность размыва прямолинейных русел не зависит от водности реки; в целом она меньше, чем у русел других типов, но может быть сопоставима с адаптированными излучинами. Показатели врезанных и вписанных излучин выше, чем адаптированных и свободных излучин с $N = 7.9-8.3$, что можно объяснить высокой сосредоточенностью потока в русле при прохождении половодья, а также песчаным характером берегов у второго типа излучин.

Наблюдается дифференциация показателей размыва по группам свободных излучин. Для групп 5 и 6 (табл. 5) связи аппроксимируются экспоненциальными уравнениями (табл. 6). Стационары группы 5 характеризуются более высокими значениями размыва при меньших коэффициентах корреляции, что может свидетельствовать о менее тесной связи с водностью реки и большей ролью локальных факторов в возникновении размывов и увеличении темпов разрушения берегов по сравнению со стационарами на излучинах группы 6. Наиболее тесная зависимость характерна для связей порядка с протяженностью и площадью размывов:

$$l_{\text{разм}} = f(N), F_{\text{разм}} = f(N).$$

Стационар р. Кудьма — д. Ветчак, относящийся к группе 7, имеет сниженные значения

показателей размыва, несмотря на увеличение порядка N . Основной причиной этого может быть подпор от Чебоксарского водохранилища и частично от моста по магистральному шоссе, находящемуся в 130 м ниже по течению: предмостовая дамба полностью перекрывает пойму, создавая в половодье дополнительный подпор. На данном участке реки размывается уступ пойменного берега высотой 4.0 м, в верхней части сложенный суглинками мощностью 1.5 м, в нижней — песками. Благодаря подпору основной поток во время половодья нередко проходит при значительной глубине затопления поймы или выше литологической границы слоев. Максимальные показатели размыва не наблюдаются в годы с наиболее высокими уровнями воды (по данным г.п. Кстово). В отличие от этого стационара, на свободных излучинах в условиях отсутствия подпора (например, на стационаре р. Озёрка — с. Кужутки-1) многолетний ход размыва имеет прямую зависимость от водности года.

Получены параметры зависимости показателей размыва от высоты берега $h_{\text{бер}}$ (рис. 3). В целом, можно отметить рост их значений на излучинах с увеличением высоты берега $h_{\text{бер}}$. Графики имеют линейный вид, наиболее тесной связью характеризуется площадь размыва $F_{\text{разм}}$. Для свободных излучин с $N < 7.9$ (группа 5) уравнение имеет вид:

$$F_{\text{разм}} = 3.2427h_{\text{бер}} + 1.5451, R = 0.99.$$

Единой зависимостью связаны свободные излучины с $N > 7.9$ и $l/L \leq 2$ (группы 5, 6) и адаптированные излучины (группа 3):

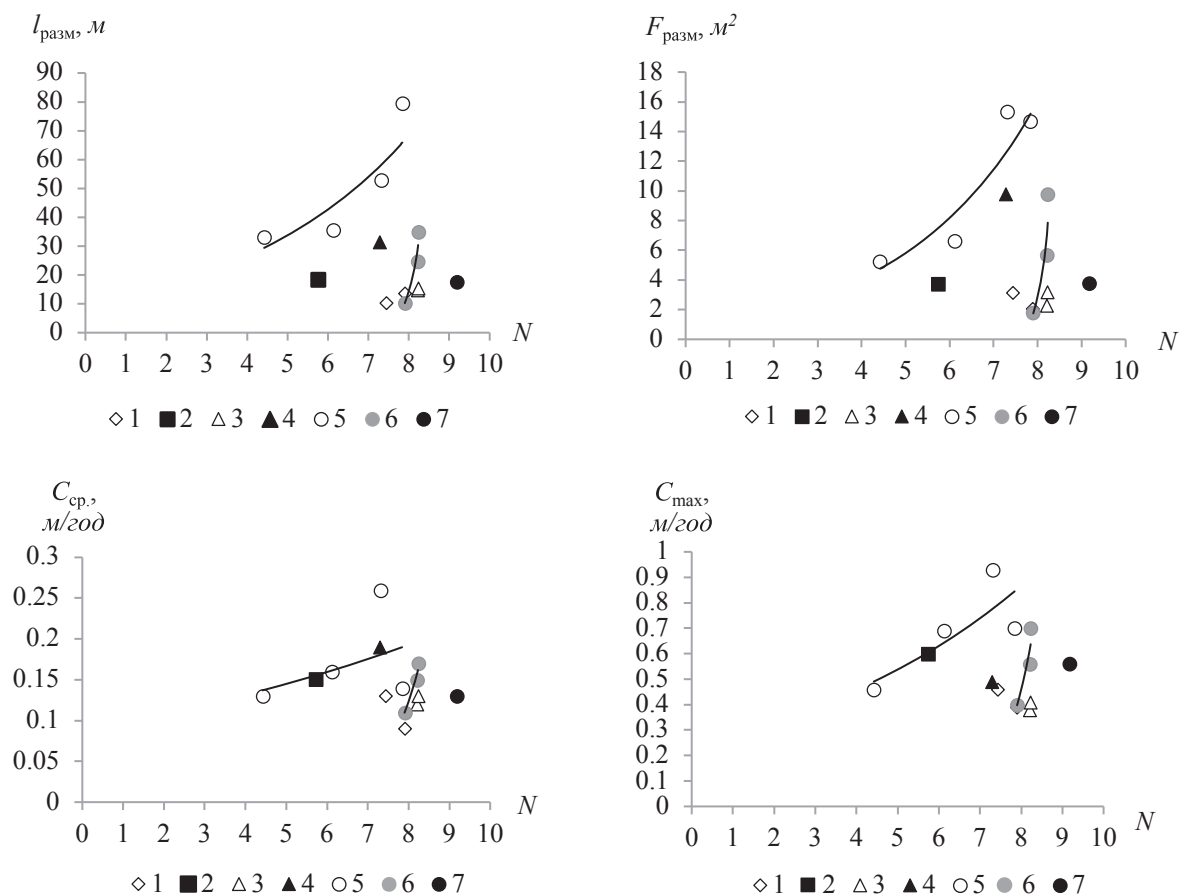
$$F_{\text{разм}} = 2.6333h_{\text{бер}} - 6.4658, R = 0.97.$$

Свободная излучина на стационаре р. Кудьма — к.п. Зелецино-2 имеет $l/L > 2$; этот и ряд других факторов определяют более высокие значения показателей размыва на данном участке русла и выделение его из выявленных закономерностей.

Остальные исследуемые типы русел не укладываются в полученные параметры зависимости. В появлении размывов на прямолинейных руслах более важную роль играют другие характеристики берега, например, наличие препятствий для водного потока и участков, лишенных растительности. Высота берегов вписанных излучин определяется высотой надпойменных террас, излучины имеют большую интенсивность смещения из-за высоких удельных руслоформирующих расходов и песчаного состава береговых отложений, что соответствует характерным особенностям динамики данного типа излучин (Чалов и др., 2004).

Таблица 5. Группы стационаров по основным условиям руслоформирования**Table 5.** Groups of monitoring sites according to the main forming conditions

№ п/п	Группа	Стационары
1.	Относительно прямолинейные русла, адаптированные к надпойменной террасе	р. Кудьма — д. Лакша, р. Кудьма — п. Буревестник-2
2.	Врезанные излучины	р. Озёрка — д. Белозерово
3.	Адаптированные излучины широкопойменного русла	р. Кудьма — к.п. Зеленый город-2, р. Кудьма — д. Зелецино-3
4.	Вписанные излучины адаптированного русла	р. Озёрка — с. Кужутки-2
5.	Свободные излучины $N < 7.9 / F < 1000 \text{ км}^2$	р. Печеть — д. Александровка, р. Сетчуга — с. Ивановское, р. Озёрка — с. Кужутки-1, р. Озёрка — с. Чернуха
6.	Свободные излучины $N = 7.9 - 8.3 / F = 1000 - 2000 \text{ км}^2$	р. Кудьма — п. Буревестник-1, р. Кудьма — к.п. Зеленый город-1, р. Кудьма — к.п. Зелецино-2
7.	Свободные излучины $N > 8.3 / F > 2000 \text{ км}^2$	р. Кудьма — д. Ветчак

**Рис. 2.** Зависимость показателей размыта от порядка реки N . Номера 1–7 соответствуют группам стационаров в таблице 5**Fig. 2.** Erosion indicators — stream order charts. Numbers — groups of monitoring sites in table 5

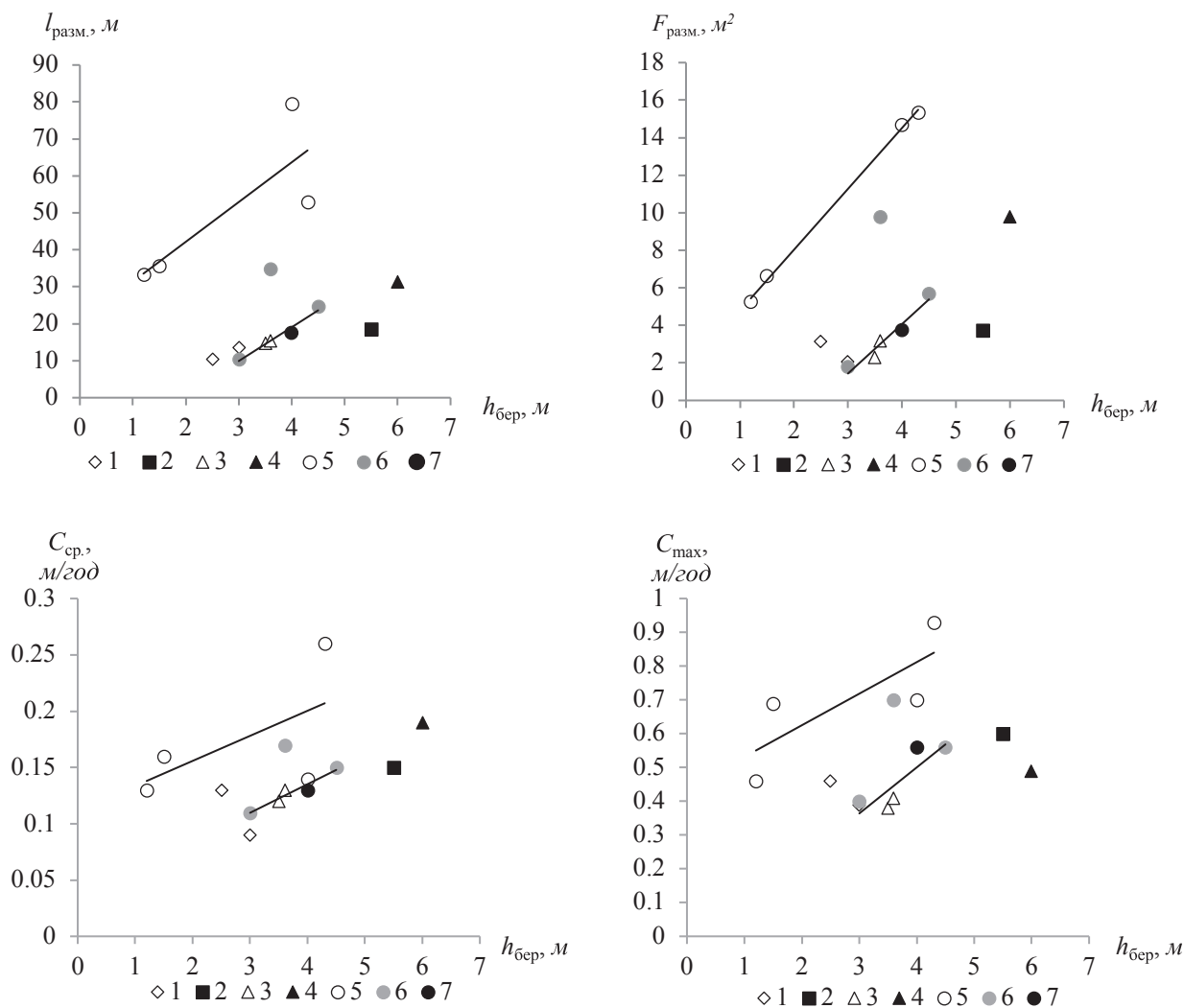


Рис. 3. Зависимость показателей размыва от высоты берега $h_{\text{бер}}$. Номера 1–7 соответствуют группам стационаров в таблице 5

Fig. 3. Erosion indicators — bank height charts. Numbers correspond with groups of monitoring sites in table 5

Зависимость $l_{\text{разм}}(C_{\text{ср.}}, C_{\text{мах}}, F_{\text{уд.разм}}) = f(h_{\text{бер}})$ для свободных излучин с $N < 7.9$ менее тесная, чем для свободных излучин с $N > 7.9$, $l/L \leq 2$ и адаптированных излучин; коэффициенты корреляции составляют $R = 0.61–0.82$ и $R = 0.81–0.98$ соответственно.

Зависимость показателей размыва берегов от степени развитости излучин l/L имеет различия по типам излучин и рекам бассейна, наряду с общей тенденцией — ростом с увеличением l/L (рис. 4). При близких значениях l/L берега врезаемых излучин размываются интенсивнее, чем адаптированных. Повышенная интенсивность отступания берегов вписанных излучин согласуется с высокой степенью их развитости l/L — вышеуказанные факторы также приводят к преимущественно поперечному смещению излучин.

Связи свободных излучин дифференцируются по наиболее крупным рекам бассейна и их притокам. Для стационаров на р. Озёрке характерны более высокие показатели размыва по сравнению с другими реками при близких значениях l/L . Для р. Кудьмы получены уравнения зависимости, имеющие линейный вид:

$$\begin{aligned} l_{\text{разм}} &= 21.167 l/L - 14.637, R = 0.99, \\ F_{\text{разм}} &= 6.8412 l/L - 6.5365, R = 0.98, \\ C_{\text{ср.}} &= 0.0525 l/L + 0.0496, R = 0.99, \\ C_{\text{мах}} &= 0.2445 l/L + 0.1339, R = 0.96, \\ F_{\text{уд.разм}} &= 0.0921 l/L + 0.0657, R = 0.99. \end{aligned}$$

Таблица 6. Уравнения зависимости показателей размыва от порядка реки N для групп свободных излучин**Table 6.** Erosion indicators — stream order equations for different wide-floodplain meander groups

Уравнения	Группы стационаров	
	Группа 5 ($N < 7.9$)	Группа 6 ($N = 7.9-8.3$)
$l_{\text{разм}} = f(N)$	$l_{\text{разм}} = 10.356e^{0.236N}, R = 0.89$	$l_{\text{разм}} = 5E - 11e^{3.2947N}, R = 0.97$
$F_{\text{разм}} = f(N)$	$F_{\text{разм}} = 1.0618e^{0.3395N}, R = 0.94$	$F_{\text{разм}} = 4E - 16e^{4.5597N}, R = 0.97$
$C_{\text{ср.}} = f(N)$	$C_{\text{ср.}} = 0.0899e^{0.0953N}, R = 0.46$	$C_{\text{ср.}} = 1E - 05e^{1.1797N}, R = 0.97$
$C_{\text{max}} = f(N)$	$C_{\text{max}} = 0.2427e^{0.1591N}, R = 0.83$	$C_{\text{max}} = 5E - 06e^{1.4286N}, R = 0.94$
$F_{\text{уд.разм}} = f(N)$	$F_{\text{уд.разм}} = 0.1025e^{0.1035N}, R = 0.59$	$F_{\text{уд.разм}} = 8E - 06e^{1.265N}, R = 0.94$

На свободных излучинах р. Озёрки (в пределах стационаров) отмечается уменьшение $l_{\text{разм}}$ при увеличении l/L . Это может быть вызвано усложнением форм более крупной омеговидной излучины благодаря начавшемуся образованию «вторичной» сегментной излучины в месте расположения стационара р. Озёрка — с. Чернуха и неустоявшемуся еще размеру фронта размыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные стационарных наблюдений на малых реках бассейна Кудьмы за период 2010–2023 гг. показали значительный разброс значений показателей размыва на разных участках — длина фронта размыва $l_{\text{разм}}$ составила от 10 до 80 м, площадь размыва $F_{\text{разм}}$ — от 2 до 15 м²/год, средняя скорость размыва $C_{\text{ср.}}$ — от 0.1 до 0.3 м/год, максимальная скорость — от 0.4 до 1.0 м/год. Рассмотрение основных факторов размыва — водности (порядка) реки, геолого-геоморфологических условий и морфодинамического типа русла — дает возможность выявить закономерности развития и проявления горизонтальных русловых деформаций.

На относительно прямолинейных участках русел отмечается отсутствие связи интенсивности размыва с основными факторами руслоформирования, она в значительной степени определяется местными условиями размыва.

Наиболее ярко зависимость показателей размыва от определяющих факторов проявляется на свободных излучинах. При этом для участков рек с $N < 7.9$ при больших значениях показателей размыва отмечаются больший разброс точек на графиках связей, меньшие значения коэффициентов корреляции, разнообразие связей со степенью развитости l/L . Это говорит о менее тесной зависимости размывов берегов рек от их водности и

существенном влиянии локальных факторов на динамику берегов. Для участков рек с $N > 7.9$ влияние местных условий нивелируется мощностью потока, коэффициенты корреляции уравнений у них более высокие.

Наиболее тесные связи с условиями руслоформирования имеет площадь размыва $F_{\text{разм}}$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен за помощь в проведении исследований коллективу Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева и бывшему директору Дальнеконстантиновского краеведческого музея В.В. Жилеву, а также научному сотруднику Лаборатории А.М. Тарбеевой за консультирование в использовании англоязычной терминологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Варенов А.Л., Ботавин Д.В., Завадский А.С. и др. Русловые процессы на малых реках староосвоенных территорий (на примере рек бассейна р. Кудьмы, Приволжская возвышенность) // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 6. М.: Географ. ф-т МГУ. 2015. С. 131–160.

Завадский А.С., Лобанов Г.В., Петухова Л.Н. и др. Результаты стационарных исследований русловых процессов на реках ЕТР // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 5. М.: МАКС Пресс. 2010. С. 220–251.

Камалова Е.В. Размывы берегов и горизонтальные деформации русел малых и средних рек бассейнов Волги и Верхнего Дона // Малые реки центра Русской равнины, их использование и охрана. М.: МФ ГО СССР. 1988. С. 25–32.

Коркин С.Е., Исыпов В.А. Анализ горизонтальных русловых деформаций средней Оби на основе

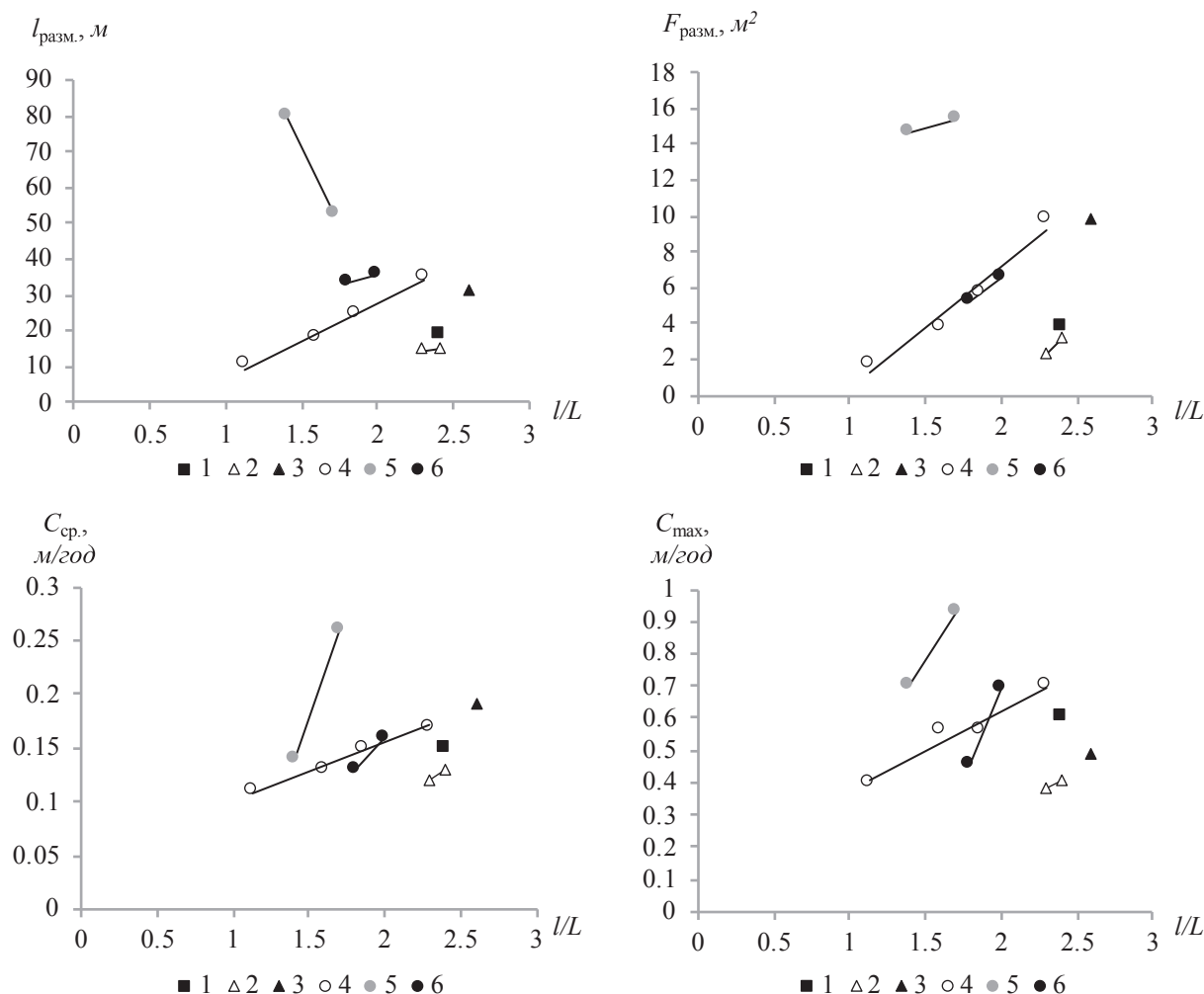


Рис. 4. Зависимость показателей размыва от степени развитости излучин l/L . Типы русел: 1 – врезанные излучины; 2 – адаптированные излучины широкопойменного русла; 3 – вписанные излучины; 4 – свободные излучины, р. Кудьма; 5 – свободные излучины, р. Озёрка; 6 – свободные излучины, р. Печеть и р. Сетчуга

Fig. 4. Erosion indicators – degree of curvature charts. Channel types: 1 – incised meanders, 2 – confined meanders, 3 – confined meanders with the top inside the river terrace, 4 – wide-floodplain meanders, Kudma River, 5 – wide-floodplain meanders, Ozerka River, 6 – wide-floodplain meanders, Pechet' and Setchuga Rivers

стационарных наблюдений // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 85–97.

<https://doi.org/10.31857/S043542812204006X>.

Малые реки волжского бассейна. М.: Изд-во МГУ, 1998. 236 с.

Пахомова О.М. Гидролого-морфологические характеристики русел рек и порядковая структура речной сети. Автореф. дисс. ...канд. геогр. наук. М.: МГУ. 2001. 28 с.

Рысин И.И., Петухова Л.Н. Русловые процессы на реках Удмуртии. Ижевск: Ассоциация «Научная книга», 2006. 176 с.

Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.

ОБ АВТОРЕ

Варенов Александр Леонидович – преподаватель кафедры географии, географического и геоэкологического образования естественно-географического факультета НГПУ имени К. Минина, младший научный сотрудник отдела природы Нижегородского государственного историко-архитектурного музея-заповедника.

E-mail: varenovgeo@gmail.com.

CHANGES OF SMALL RIVERS CHANNELS IN THE KUDMA BASIN AND THEIR RELATIONSHIP WITH FACTORS OF CHANNEL PROCESSES (based on stationary observations from 2010 to 2023)

A.L. Varenov

Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, Russia

varenovgeo@gmail.com

Abstract. Changes of small rivers channels occur in conditions of low water runoff, significant dependence of morphology and morphometry on local factors, sensitivity to anthropogenic impacts. This causes low intensity of bank erosion and the emergence of diversity of its relationships with factors of channel processes, which complicates the analysis of channel deformations. Field monitoring helps to solve this problem. The article examines the methods, analysis techniques and some results of monitoring of bank erosion at 15 sites of small rivers channels in the Kudma basin for the period from 2010 to 2023. The measurement data show a significant spread in the values of indicators of erosion rates: length of eroded bank varies from 10 to 80 m/year, eroded area — from 2 to 15 m²/year, average rate of bank retreat is from 0.1 to 0.3 m/year, maximum — 0.4 to 1.0 m/year. Identification of relationships with factors of channel processes (water runoff, geological and geomorphological conditions, morphodynamic type of channel, local conditions) made it possible to divide the studied channels into groups with qualitative differences in the manifestation of morphodynamics. On straight channel the development of bank erosion is largely determined by local conditions. The dependencies of erosion indicators are most clearly manifested on wide-floodplain meanders. The area of erosion has the closest relationship with the forming conditions.

Key words: bank erosion, monitoring sites

ACKNOWLEDGMENTS

The author is grateful for the help in conducting research to the staff of the Scientific Research Laboratory of Soil Erosion and Riverbed Processes named after N.I. Makkaveev and the former director of the Dalnekonstantinovsky Museum of Local Lore V.V. Zhilyaev, as well as a researcher at the Laboratory A.M. Tarbeeva for advising on the use of English terminology.

REFERENCES

Varenov A.L., Botavin D.V., Zavadskiy A.S. et al. Channel processes of small rivers in the old developed territory (on the example of the Kudma basin, Volga Upland) // *Erosion and channel processes*. Vol. 6. M.: Geograf. f-t MGU. 2015. P. 131–160.

Zavadskiy A.S., Lobanov G.V., Petukhova L.N. et al. Stationary observations results of channel processes on the European part of Russia // *Erosion and channel processes*. Vol. 5. M.: MAKSPress. 2010. P. 220–251.

Kamalova E.V. Bank erosion and horizontal channel deformations of small and medium rivers in the Volga basin and Upper Don basin // *Small rivers of the central Russian Plain, their use and protection*. M.: MF GO SSSR. 1988. P. 25–32.

Korkin S.E., Isypov V.A. Analysis of horizontal channel deformations based on stationary observations // *Geomorfologiya* (In Russ.). 2022. Vol. 53. No 5. P. 85–97. DOI: 10.31857/S043542812204006X.

Small rivers of the Volga basin. M.: Izd-vo MGU, 1998. 236 p.

Pakhomova O.M. Hydrological and morphological characteristics of channels and channel-ordering structure. M.: MGU, 2001. 28 p.

Rysin I.I., Petukhova L.N. Channel processes of the rivers of Udmurtia. Izhevsk: Assotsiatsiya «Nauchnaya kniga», 2006. 76 p.

Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Panin A.V. River meanders. M.: Izd-vo MGU, 2004. 371 p.

Chalov R.S. Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 1. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and forming conditions. M.: Izd-vo LKI, 2008. 608 p.

ABOUT THE AUTHOR

Varenov Aleksandr — lecturer of the Department of Geography, Geographical and Geoecological Education of the Faculty of Natural Sciences and Geography of Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University; junior researcher at the Department of Nature of Nizhny Novgorod State Reserve Museum of History and Architecture. E-mail: varenovgeo@gmail.com.