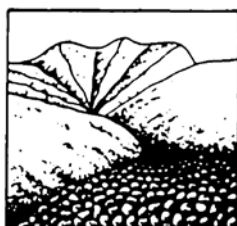


СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
8-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2025

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 8th International Conference

Tbilisi, Georgia, 6–10 October 2025



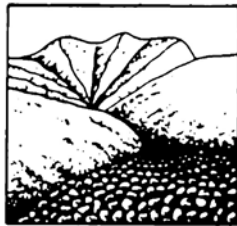
Edited by
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2025

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 6-10 ოქტომბერი, 2025



რედაქტორები
ს. ს. ჩერნომორეც, გ. ვ. გავარდაშვილი, კ. ს. ვისხაჯიევა

შპს „გეომარკეტინგი“
მოსკოვი
2025

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2025. 496 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC, 2025. 496 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო. – პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი, კ.ს. ვისხაჯიევა. – მოსკოვი: შპს „გეომარკეტინგი“, 2025. 496 ს.

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), Г.В. Гавардашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (M.V. Lomonosov Moscow State University), G.V. Gavardashvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University), K.S. Viskhadzhieva (M.V. Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-5-6053539-4-2

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава
Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute
of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა
მეურნეობის ინსტიტუტი



Особенности морфодинамики размыва берегов на реках Удмуртии

И.И. Рысин, И.И. Григорьев

*Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия,
rysin.iwan@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования смещения русел за 2003–2024 гг. на 8 ключевых участках, расположенных на размываемых излучинах. Протяженность, средняя и максимальная ширина, площадь и объем размыва определялись с применением тахеометрической съемки и беспилотных авиационных систем. Наибольшие значения ширины размыва достигают 8,1 м/год, а высота размываемого берегового уступа изменяется от 2,5 м на р. Нылга до 8,8 м на р. Лумпун. Протяженность размываемых участков варьировала в пределах 55–533 м. В многолетней динамике размывов на реках Чепца и Кырыкмас отчетливо прослеживается положительный тренд. На р. Сива отмечается слабый положительный тренд, подтверждаемый высокими половодными расходами в последние годы. Установлена очень тесная связь между максимальной шириной размыва на р. Чепца и максимальными годовыми расходами реки за период с 2004 по 2015 г. ($r = 0,899$). Достаточно тесная связь получилась с площадью и объемом размывов за указанные годы ($r = 0,787$). На р. Сива корреляционная связь между максимальной шириной размыва и максимальными годовыми расходами за указанный период оказалась чуть ниже ($r = 0,600$). Показатель же связи с площадным и объемным размывами получился более значимым ($r = 0,794$). Корреляционный анализ максимальной ширины размывов на р. Кырыкмас за 2004–2021 гг. с максимальными годовыми расходами на реке аналоге также показал достаточно значимую связь ($r = 0,617$). Расположение размываемых участков в пределах различных типов излучин характеризуется локальными особенностями, но чаще приурочены к участкам с наибольшей кривизной или немного смещены ниже по течению.

Ключевые слова: размыв берегов рек, мониторинг, тахеометрическая съемка, корреляционный анализ, Удмуртская Республика

Ссылка для цитирования: Рысин И.И., Григорьев И.И. Особенности морфодинамики размыва берегов на реках Удмуртии. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 363–377.

Peculiarities of morphodynamics of bank erosion on rivers of Udmurtia

I.I. Rysin, I.I. Grigoriev

Udmurt State University, Izhevsk, Russia, rysin.iwan@yandex.ru

Abstract. The results of a study of channel displacement for 2003–2024 at 8 key sites located on erodible bends are presented. The length, average and maximum width, area and volume of scour were determined using total station surveys and unmanned aerial systems. The highest values of scour width reach 8.1 m/year, and the height of the eroding bank scarp varies from 2.5 m on the Nylga River to 8.8 m on the Lumpun River. The length of eroded sections varied between 55 and 533 m. The long-term dynamics of scouring on the Cheptsa and Kyrykmas Rivers clearly show a positive trend. There is a weak positive trend on the Siva River, confirmed by high flood discharges in recent years. A very close relationship was found between the maximum scour width on the Cheptsa River and the



maximum annual river discharge for the period from 2004 to 2015 ($r = 0.899$). A fairly close correlation was obtained with the area and volume of scour for these years ($r = 0.787$). On the Siwa River, the correlation between maximum scour width and maximum annual discharge for the period was slightly lower ($r = 0.600$). The correlation with area and volume scour was more significant ($r = 0.794$). Correlation analysis of the maximum scour width at Kyrykmas River for 2004–2021 with the maximum annual discharge at the analogue river also showed a significant relationship ($r = 0.617$). The location of eroded areas within the different types of bends is characterised by localised features, but more often confined to the areas of greatest curvature or slightly displaced downstream.

Key words: river bank erosion, monitoring, tacheometric survey, correlation analysis, Udmurt Republic

Cite of this article: Rysin I.I., Grigoriev I.I. Peculiarities of morphodynamics of bank erosion on rivers of Udmurtia. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 363–377.

Введение

Селеподобные процессы на равнинных территориях обычно образуются при прорывах земляных плотин прудов, возникновении оползней, размыве берегов рек и др. Размывы берегов рек и наводнения во время аномальных половодий и паводков являются одним из опасных рельефообразующих процессов на низменных равнинах. Для их прогноза актуальными являются исследования морфодинамики русловых размывов на различных по водности реках в условиях современных климатических изменений. В дополнение к климатическим факторам, преобразование ландшафтов в результате хозяйственной деятельности оказывает еще более выраженное воздействие на изменения эрозионно-русловых систем [Чалов, 2008, 2011; Robert A., 2003 и др.]. Размыв берегов рек представляет собой наиболее заметное проявление русловых деформаций, что в свою очередь приводит к значительным потерям земельных угодий и инфраструктуры территории. Результаты этих исследований являются составной частью гидрологического обоснования проектов различных водохозяйственных мероприятий [Антроповский, 2006; Беркович, 2001; Чернов, 2009; Эрозионно-русловые..., 2017 и др.]. Целью данной статьи является количественная оценка многолетней динамики размывов берегов на малых и средних реках Удмуртии, полученных путем тахеометрической съемки участков излучин, различающихся как расходами воды, так и ландшафтными особенностями их бассейнов.

Равнинная территория Удмуртской Республики (УР) расчленена многочисленными водотоками со средней густотой $0,71 \text{ км/км}^2$. Преобладающими являются широкопойменные реки с активным развитием процессов свободного меандрирования [Рысин, Петухова, 2006].

Впервые работы по изучению русловых размывов берегов на реках Удмуртии нами были начаты в 1999 г. по заданию Государственного комитета по недрам УР [Петухова, Рысин, 2005; Rysin, Petukhova, 2004; Petukhova, Rysin, 2006 и др.]. На территории соседних регионов исследования русловых процессов проводились также достаточно активно [Назаров, Егоркина, 2004; Мозжерин, Курбанова, 2004 и др.]. Полный обзор работ по размыву берегов рек на равнинных территориях Европейской части России представлен в работе [Завадский и др., 2010]. Детальный анализ проблемы русловых деформаций в отечественных и зарубежных публикациях содержится в многочисленных работах Р.С. Чалова с соавторами [Чалов и др., 1998; Чалов, 2008, 2011 и др.].

Материалы и методы исследований

Одним из надежных и доступных методов изучения динамики рельефа является метод стержней и марок. Детальное описание применяемой методики и анализ результатов представлен в нашей работе [Рысин и др., 2024]. Здесь же представлены



результаты относительно регулярной геодезической съемки размываемых береговых уступов на 8 участках рек, которые проводились в течение 2003–2024 гг. (рис. 1).

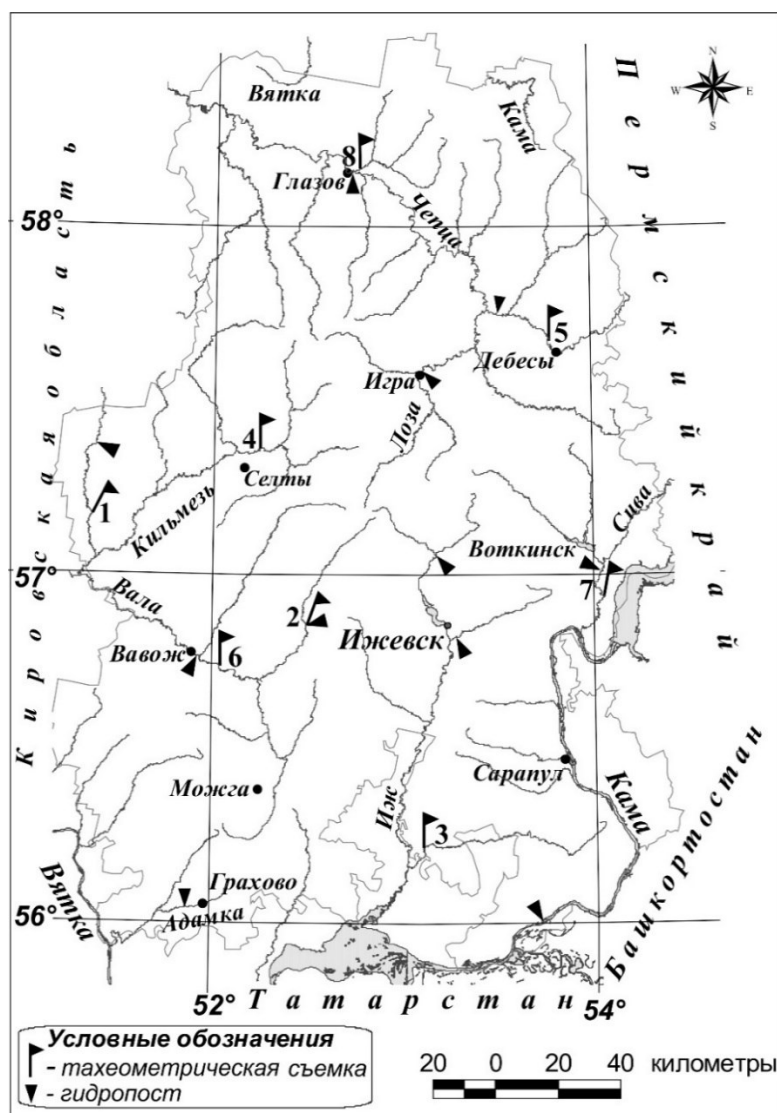


Рис. 1. Карта-схема расположения ключевых участков по изучению морфодинамики русел рек Удмуртии с применением инструментальных методов. Условные обозначения ключевых участков: 1 – р. Лумпун (д. Харламовская Пристань), 2 – р. Нылга (с. Нылга), 3 – р. Кырыкмас (д. Тавзямал), 4 – р. Кильмезь (д. Головизнин Язок), 5 – р. Чепца (д. Варни), 6 – р. Вала (д. Макарово), 7 – р. Сива (д. Метляки), 8 – р. Чепца (с. Адам)

Геодезическая съемка, как правило, проводилась на активно размываемых участках рек с помощью лазерных тахеометров: Trimble 3305, затем Nikon NPR-332. Тахеометрическая съемка позволяет рассчитать не только линейные параметры размыва, но также площадные и объемные показатели [Гафуров и др., 2018; Григорьев, Рысин, 2008].

С 2019 г. при инструментальной съемке исследуемых объектов нами применяется спутниковый приемник «EFT M1+» вместе с беспилотными авиационными системами (БАС): вначале DJI Phantom 4, позднее Autel Evo II PRO. Общая методика использования БАС для географических исследований обычно включает 6 этапов, в завершение которых создается цифровая модель местности и ортофотоплан [Григорьев, Рысин, 2020].



Обработка аэрофотоснимков проводится в отечественной программе Agisoft Metashape Professional. Подготовка топографических планов, расчет площадей и объемов размытого материала осуществляется с использованием программного комплекса «Кредо» [Григорьев, Рысин, 2009].

Результаты и обсуждение

Ниже впервые представлены к обсуждению количественные данные тахеометрических съемок на размываемых участках свободных излучин малых и средних рек УР за период 2003–2024 гг.

На р. Лумпун (пр. приток р. Кильмезь) у д. Харламовская Пристань (рис. 1) геодезическая съемка береговой линии осуществлялась на протяжении 110 м, здесь средняя высота размываемого берегового уступа равна 8,8 м. Как и в большинстве случаев, тахеометрическая съемка осуществлялась ежегодно с 2003 по 2014 г., в 2015–2022 г. съемка не проводилась. В эти годы осуществлялись только реперные наблюдения. Средний многолетний расход реки у д. Шмыки (23 км выше по течению от исследуемого участка) составляет $8,25 \text{ м}^3/\text{с}$ [Атлас..., 2020].

Протяженность размываемого участка за рассматриваемый период изменялась от 48 м в 2012 г. до 110 м в 2005 г. В 2012 г. была отмечена и минимальная ширина размыва, составившая всего 0,18 м. Максимальные значения ширины размывов на участке зафиксированы в 2005 (2,26 м) и 2006 г. (1,85 м) (таблица 1). Самые низкие значения площадей размыва приурочены к 2012, 2013 и 2004 г., в эти же годы были зарегистрированы и минимальные значения объемов (таблица 2).

Максимальные значения площадей и объемов размыва не всегда совпадают по годам с максимальной шириной размывов, что вполне очевидно, поскольку максимальный размыв часто имеет локальный характер и может быть связан, например, с небольшим оползнем-обвалом или обрушением одиночного дерева вместе с обширной корневой системой. В данном случае максимальные значения площади ($81,9 \text{ м}^2$) и объема размыва (737 м^3) были зафиксированы в 2006 г. (таблица 2), когда на реке в апреле был зафиксирован наивысший уровень (912 см) за весь рассматриваемый период.

Топографический план участков размыва по длине излучины выявил здесь особенности, существенно отличающиеся от ниже рассмотренных объектов (рис. 2). Анализ топографического плана и крупномасштабной карты исследуемого участка показывает, что излучина данной реки, согласно классификации МГУ [Чалов, 2011], в морфогенетическом плане относится к типу свободных, а по внешнему виду – к сегментным. Съемка осуществлялась в вершине излучины, которая характеризуется плавным уменьшением радиуса кривизны вниз по течению, соответственно наблюдается и аналогичное же возрастание ширины и площади размываемого участка вниз по течению. Участок выше по течению осложнен серией небольших оползней-обвалов.

Таблица 1. Средняя и максимальная ширина размывов на участках рек по данным тахеометрической съемки за 2004–2024 гг.

Годы наблюдения	Лумпун	Нылга	Кырык-мас	Кильмезь	Чепца/Варни	Сива	Вала	Чепца/Адам
2004	0,23/ 0,60*	0,66/ 1,26	0,75/2,76	0,38/ 1,10	0,35/ 0,97	0,87/ 1,86	0,72/ 1,70	0,25/ 1,53
2005	0,60/ 2,26	0,44/ 2,66	0,42/ 2,34	0,56/ 1,82	0,32/ 0,78	1,07/3, 40	0,96/ 2,60	0,62/ 2,90
2006	0,75/ 1,85	0,51/ 3,23	0,74/ 2,41	0,48/ 1,36	0,44/ 1,63	1,41/ 4,17	0,24/ 1,52	2,08/ 6,15
2007	0,40/ 1,02	0,39/ 1,97	0,71/ 3,82	0,38/ 1,66	0,42/ 2,20	0,53/ 2,59	0,64/ 1,64	0,49/ 2,13
2008	0,23/ 0,85	0,19/ 0,62	0,99/ 3,06	0,59/ 2,49	0,18/ 1,01	0,67/ 2,07	0,78/1, 82	0,39/ 1,30



Годы наблюде- ний	Лум- пун	Нылга	Кырык- мас	Киль- мезь	Чепца/ Варни	Сива	Вала	Чепца/ Адам
2009	0,32/ 0,84	0,36/ 1,37	0,46/ 1,52	0,24/ 0,93	0,33/ 1,08	0,64/ 2,59	0,25/0, 82	0,52/ 1,35
2010	0,45/ 1,44	0,19/ 0,50	2,34/ 4,74	0,54/ 1,77	0,32/ 1,05	1,99/ 3,50	0,27/0, 97	0,48/ 2,25
2011	0,41/ 1,07	0,18/ 0,69	1,24/ 3,08	0,33/ 0,76	0,48/1,46	1,29/2, 90	0,40/ 2,23	0,75/ 2,50
2012	0,18/ 0,52	0,48/ 1,24	1,50/ 5,01	1,11/ 2,46	0,68/2,23	1,54/ 5,96	0,60/ 1,91	2,02/ 5,42
2013	0,21/ 0,62	0,72/ 3,29	0,88/ 3,04	0,35/ 1,52	0,27/ 1,98	0,86/ 2,77	0,46/ 1,55	1,12/ 3,64
2014	0,23/ 0,69	0,54/ 1,43	0,71/1,98	1,13/ 1,73	0,53/1,63	0,86/ 2,90	0,28/ 1,14	0,86/ 3,13
2015	-	-	-	-	-	0,52/ 3,52	1,62/4, 15	-
2016	-	-	-	-	-	1,69/ 4,02	-	-
2017	-	-	0,39/ 0,81	-	-	-	-	-
2018	-	-	0,42/ 1,70	-	-	-	-	-
2019	-	-	0,75/ 3,59	-	-	-	-	-
2020	-	-	0,44/ 1,38	-	-	0,12/ 0,41	-	-
2021	-	0,15/ 0,27	2,44/ 8,14	-	-	0,58/ 2,65	0,13/ 0,39	-
2022	-	-	0,77/ 3,40	-	-	0,22/ 0,62	0,30/ 1,88	-
2023	0,19/ 0,32	0,19/ 0,33	2,12/ 5,16	0,20/ 0,49	0,39/ 0,71	0,23/0, 80	0,16/ 1,70	0,82/ 1,52
2024	0,73/ 2,88	0,46/ 1,60	0,99/ 2,88	0,21/ 0,70	0,25/ 1,62	0,80/2, 03	0,22/0, 65	0,98/ 3,98

*В числителе – средняя ширина, в знаменателе – максимальная ширина в метрах; полужирным шрифтом выделены средние многолетние значения

Таблица 2. Площади и объемы размылов на участках рек по данным тахеометрической съемки за 2004–2024 гг.

Годы наблю- дений	Лум-пун	Нылга	Кырык- мас	Киль- мезь	Чепца/ Варни	Сива	Вала	Чепца/ Адам
2004	13,4/ 121*	86,6/ 216	213,4/ 1088	51,7/ 114	61,3/ 264	182,9/ 640	212,6/ 891	92,6/ 500
2005	66/ 594	144,1/ 360	60,6/ 416	74,6/ 164	36,7/ 158	227,2/ 795	258,9/ 1085	211,7/ 1143
2006	81,9/ 737	127,3/ 318	94,8/ 646	65,1/ 143	65,2/ 280	258,6/ 1255	36,8/ 156	883,7/ 4772
2007	41,7/ 375	117,6/ 294	105/ 712	54,4/ 120	52,2/ 224	149,2/ 522	165,3/ 693	232,5/ 1256
2008	19,7/ 177	39,2/ 98	101,5/ 690	63,1/ 139	17,1/ 74	93,1/ 326	214,2/ 895	113,6/ 613
2009	25,9/ 233	84,5/ 211	84,1/ 570	17,2/ 19,0	36,8/ 158,0	148,2/ 519	51,4/ 216	187,2/ 1011
2010	46,4/ 418	42,5/ 106	348,8/ 2367	73,9/ 163	54,8/ 236	520,1/ 1820	47,5/ 199	152,4/ 823
2011	38,3/ 32,8/	32,8/ 32,8/	214,5/ 214,5/	50,5/ 50,5/	71,6/ 71,6/	342,3/ 342,3/	117,0/ 117,0/	274,7/ 274,7/



Годы наблю- дений	Лум-пун	Нылга	Кырык- мас	Киль- мезь	Чепца/ Варни	Сива	Вала	Чепца/ Адам
	345	82	1461	111	308	1198	494	1483
2012	8,9/ 80,0	100,1/ 250	313,9/ 2136	143,3/ 315	99,4/ 427	331,7/ 1161	143,8/ 601	977,1/ 5276
2013	12,9/ 116	137,7/ 344	149,6/ 1021	41,5/ 91	24,1/ 104	210,2/73 6	132,2/55 3	553,4/ 2988
2014	14,6/ 131	31,8/ 80	101/ 687	124,3/ 273	71,1/ 306	146,7/ 513	47,6/ 203	363,5/ 1963
2015	-	-	-	-	-	59,7/ 209	505,2/ 2120	-
2016	-	-	-	-	-	397,3/ 1391	-	-
2017	-	-	74,1/ 506	-	-	-	-	-
2018	-	-	54/ 369	-	-	-	-	-
2019	-	-	174,1/ 1184	-	-	-	-	-
2020	-	-	54,1/ 368	-	-	15,4/ 54	-	-
2021	-	42,8/10 7	596,8/ 4058	-	-	113,8/ 398	41,1/ 173	-
2022	-	-	212,2/ 1443	-	-	34,8/ 122	87,8/ 369	-
2023	20,1/ 181	10,2/ 26	402,1/ 2731	35,8/ 79	71,3/ 306	39/ 136	39,2/ 165	439/ 2370
2024	53,7/ 510	121,9/ 305	166,6/ 1133	27,1/ 60	36,6/ 157	86,7/ 303	55,3/ 232	367,3/ 1983

*В числителе – площадь размыва в м², в знаменателе – объем размыва в м³; полужирным шрифтом выделены средние многолетние значения

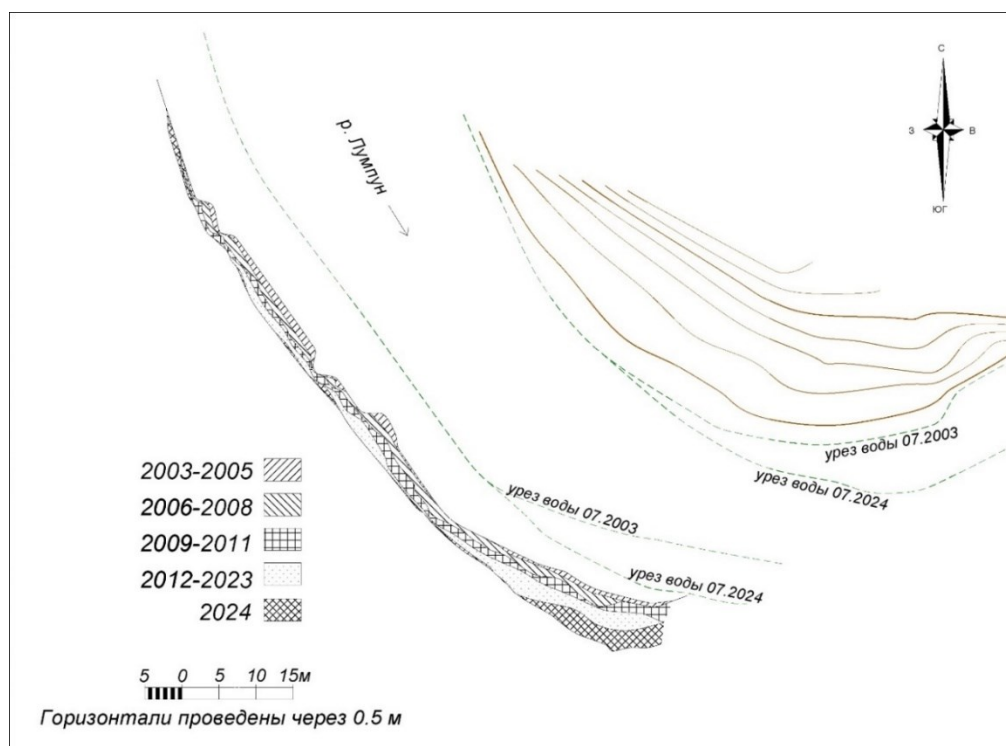


Рис. 2. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Лумпун за 2003–2024 гг.



Тахеометрическая съемка на р. Нылга (на юго-западной окраине с. Нылга), являющейся правым притоком р. Вала (рис. 1), осуществлялась с 2003 г. с 6-летним перерывом в 2015 г. С 2015 по 2020 гг. и в 2022 г. проводились наблюдения только с применением реперов. Средний многолетний расход реки у с. Нылга равен $6,28 \text{ м}^3/\text{с}$. Протяженность береговой линии, где осуществляется геодезическая съемка, составила в 2005 г. 330 м, а средняя высота размываемого берегового уступа – 2,5 м.

Анализ полученных данных показывает, что протяженность размываемого участка на реке изменялась в значительных пределах: от 55 м в 2023 до 329 м в 2005 г. Самые низкие значения ширины размывов отмечались за период с 2015 по 2021 гг. и составили всего 0,15 м. Наибольшие значения максимальной ширины размывов были зафиксированы в 2013 (3,29 м) и 2006 г. (3,23 м) (таблица 1). Максимальные же площади и объемы размывов расположились по годам в несколько ином порядке: здесь в лидерах оказался 2005 г., затем следует 2013 г. и на последнем месте оказался 2006 г. (таблица 2), что хорошо согласуется с высокими уровнями и расходами половодий.

По топографическому плану исследуемого участка видно, что излучина данной реки, в соответствии с вышеупомянутой классификацией, относится также к свободной, но по внешнему виду она – петлеобразная. Наименьший радиус кривизны излучины находится чуть ниже по течению от шейки петли, именно в этом месте фиксируются максимальные значения ширины размывов, достигающие в сумме до 15 м (рис. 3). На схеме отчетливо видно, что зона с максимальными размывами немного смещена вниз по течению от участка с наивысшей крутизной.

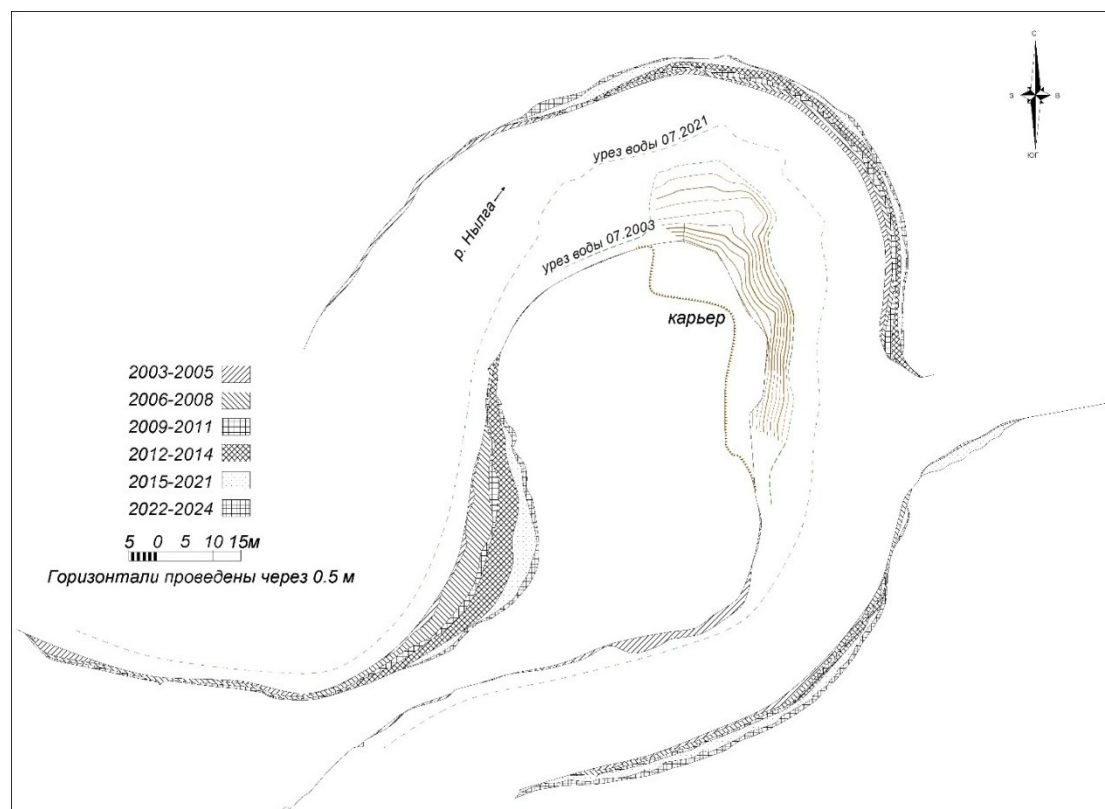


Рис. 3. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Нылга за 2003–2024 гг.

Наиболее продолжительный ряд непрерывных инструментальных наблюдений на малых реках в настоящее время имеется для реки Кырыкмас (лев. приток р. Иж) (рис. 1). Здесь геодезическая съемка около д. Тавзамал началась в 2003 г. и продолжается до настоящего времени. Перерывы в съемочных работах были только в 2015 и 2022 г. Протяженность береговой линии, где осуществляется тахеометрическая съемка составляет 290 м, средняя высота размываемого берегового уступа, соответственно 6,8 м.



Ключевой участок расположен около 10 км выше устья реки. Река по длине, площади водосбора, расходам и ландшафтным условиям близка к р. Позимь (лев. приток р. Иж). Поскольку на исследуемой реке отсутствует гидрологический пост, то для анализа динамики расходов мы использовали указанную реку в качестве аналога.

За 20-летний период наблюдений длина размываемой береговой линии здесь изменялась в значительных пределах: от 102 м в 2008 до 284 м в 2004 г. Среднегодовая ширина размывов на реке изменялась в небольших пределах: от 0,39 м до 2 м и более. Максимальные значения размывов варьировали более существенно: от 1,38 м до 3,5–8 м и более в 2012, 2019–2021 гг. (таблица 1). Наибольшие значения площадей и объемов размывов отмечались в 2021, 2016, 2010 и 2012 г. (таблица 2).

Представленные данные показывают, что в нижнем течении р. Кырыкмас наибольшие значения протяженности, ширины, площади и объемов размыва приурочены ко второй половине периода наблюдений, что свидетельствует о хорошо выраженной положительной тенденции во временной динамике исследуемого процесса. Положительный тренд подтверждается здесь и данными реперных наблюдений.

Корреляционный анализ максимальной ширины размывов на р. Кырыкмас за 2004–2021 гг. с максимальными годовыми расходами на р. Позимь за эти же годы показал достаточно значимую связь, о чем свидетельствуют значения коэффициентов корреляции ($r = 0,617$) и детерминации ($R^2 = 0,381$) (рис. 4). Достоверная положительная связь выявлена также между площадями ($r = 0,58$) и объемами ($r = 0,59$) размывов на р. Кырыкмас и максимальными годовыми расходами на р. Позимь за указанный период.

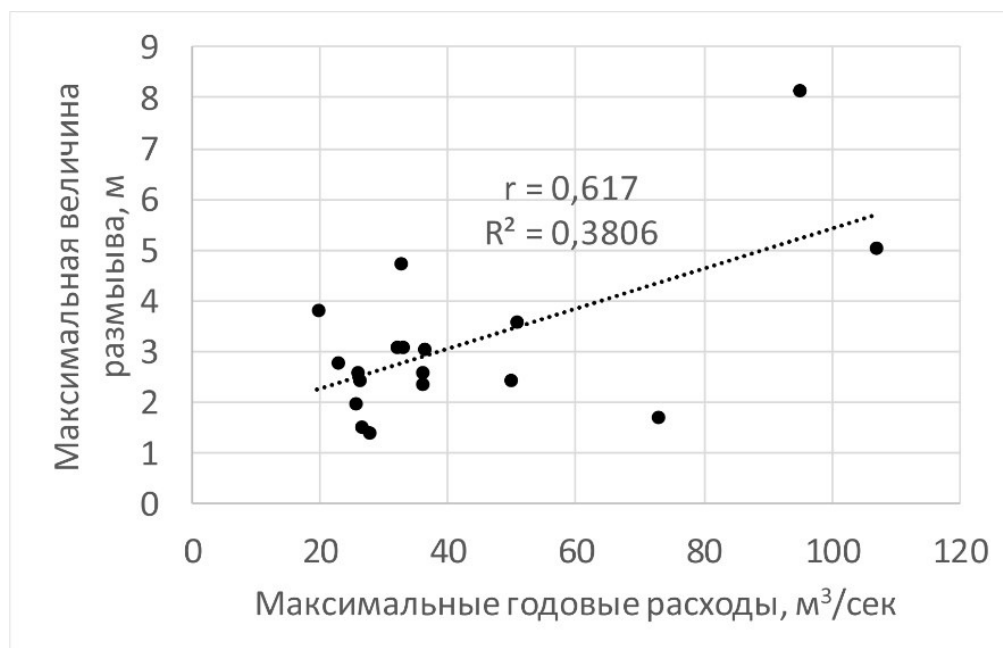


Рис. 4. График зависимости между максимальной величиной размыва на р. Кырыкмас и максимальными годовыми расходами на р. Позимь за 2004–2021 гг.

Пространственное распределение зон размыва представлено на топографическом плане участка (рис. 5). Согласно вышеупомянутой классификации, данную излучину можно охарактеризовать как развитую сегментную, исследуемый участок находится в ее нижнем крыле, где отчетливо выделяются 3 зоны размыва. Верхняя часть крыла соответствует зоне слабого размыва, достаточно протяженная центральная часть характеризуется максимальными размывами, достигающими суммарно 23–25 м. В самой нижней части крыла излучины расположена 3-я зона умеренного размыва с наибольшей кривизной со значениями размыва до 8–10 м, куда в последние годы смещается зона интенсивного размыва. В зоне слабого размыва имеется участок со значительной шириной размыва, который приурочен к мысовидному выступу.

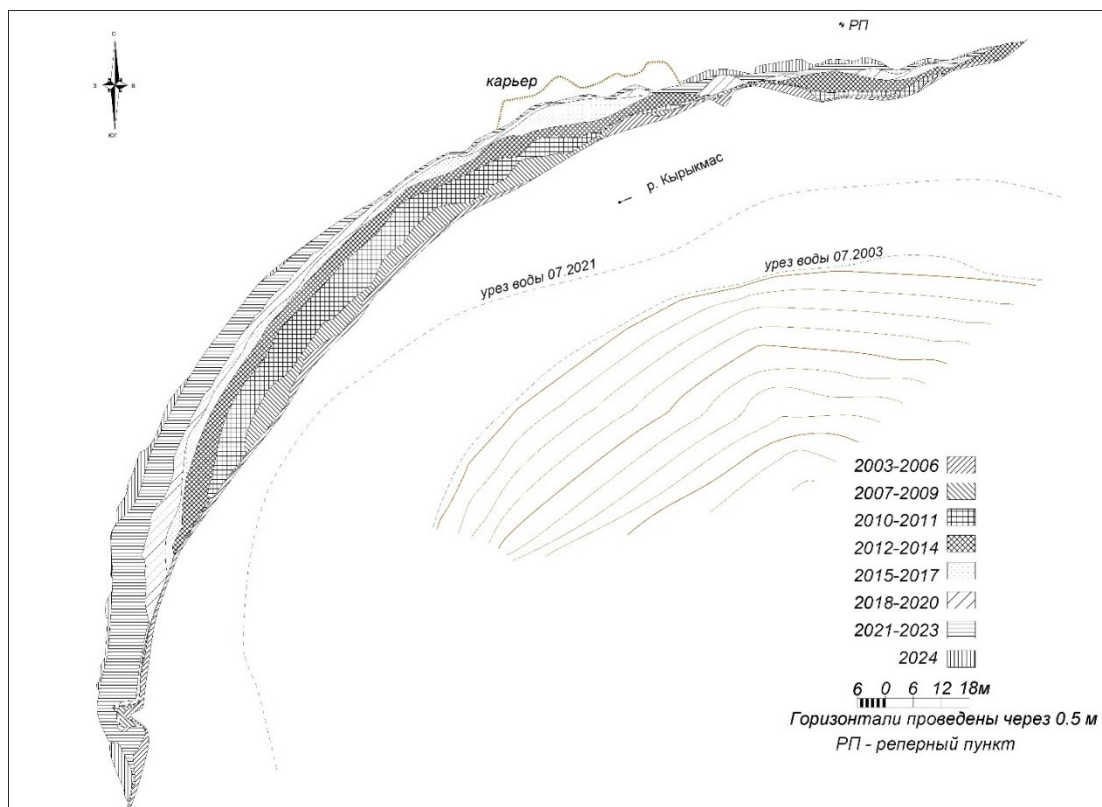


Рис. 5. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Кырымас за 2003–2024 гг.

Аналогичные исследования проводятся и в верхнем течении р. Кильмезь (лев. приток р. Вятка) в д. Головизнин Язок (рис. 1). Геодезическая съемка береговой линии здесь осуществляется на протяжении 176 м, средняя высота размываемого берегового уступа – 2,8 м. Тахеометрическая съемка на этом участке проводится с 2003 г. с 8-летним перерывом после 2015 г. Средний многолетний расход реки у с. Малые Сюмси (45 км ниже по течению от исследуемого участка) составляет 24,9 м³/с.

Длина линии размываемого участка изменялась в небольших пределах: от 90 м в 2009 г., до 175 м в 2023 г. Максимальные линейные размывы были зафиксированы в 2008 (2,49 м) и 2012 г. (2,46 м) (таблица 1). Максимальные площадные размывы немного отличаются от линейных, они были зарегистрированы в 2012 и 2014 г. В эти же годы отмечались и рекордные для ключевого участка объемы размыва (таблица 2). Анализ пространственного распределения участков размыва по длине излучины не выявил существенных особенностей.

На реке Чепца (лев. приток р. Вятка) исследования русловых деформаций проводятся в ее верхнем (д. Варни) и среднем течении (с. Адам) (рис. 1). Длина береговой линии в д. Варни, где осуществляется съемка, составляет 190 м. Средняя высота размываемого берегового уступа на этом ключевом участке равна 3,9 м. Тахеометрическая съемка осуществлялась здесь с 2003 г. с 8-летним перерывом в 2015 г. Средний многолетний расход реки у с. Полом, расположенного в 28 км ниже по течению, равен 37,5 м³/с.

Протяженность размываемого участка у д. Варни изменялась от 88 м в 2013 г. до 184 м в 2023 г. Высокие значения максимальной ширины размывов зарегистрированы в 2012, 2007, 2013 и 2014 г. (таблица 1), когда на реке были зарегистрированы наибольшие значения расходов половодья. Высокие значения максимальных площадей и объемов размывов были отмечены преимущественно в последние годы наблюдения (таблица 2). Таким образом, в верховьях р. Чепца максимальные значения ширины, площади и объемов размыва приурочены ко второй половине периода наблюдений, следовательно, здесь отчетливо выявляется положительный тренд в многолетней динамике размыва берегов.



Пространственное распределение зон размыва иллюстрирует топографический план исследуемого участка, полученный при тахеометрической съемке (рис. 6). На представленном рисунке показано нижнее крыло пологой сегментной излучины, имеющей сравнительно малую кривизну, где достаточно четко выделяются 3 неравномерные по протяженности зоны: зоны слабого размыва в самой верхней и самой нижней частях крыла, протяженностью не более 20–25 м каждая и центральная зона сильного размыва, где ширина размыва достигает 8–12 м.

На реке Вала (лев. приток р. Кильмезь) на участке у д. Макарово тахеометрическая съемка проводилась в течение 15 лет, начиная с 2003 г. В 2015–2019 гг. геодезическая съемка не проводилась, наблюдения осуществлялись с помощью реперов. Высота размываемого берегового уступа здесь составляет 4,2 м, а длина съемки береговой линии – 314 м. Средний многолетний расход реки у с. Вавож составляет 22,4 м³/с.

Здесь протяженность размываемого участка излучины изменялась от 155 м (2006 г.) до более 300 м в 2020 и 2021 гг. Наибольшие значения средней ширины размывов отмечены в 2005, 2021 и 2011 г. (таблица 1). Наибольшие площади отступления береговых уступов здесь также не всегда совпадают по времени наибольшим линейным значениям. Так, существенные площади размыва отмечены в 2005, 2021, 2008 и 2004 г. (таблица 2).

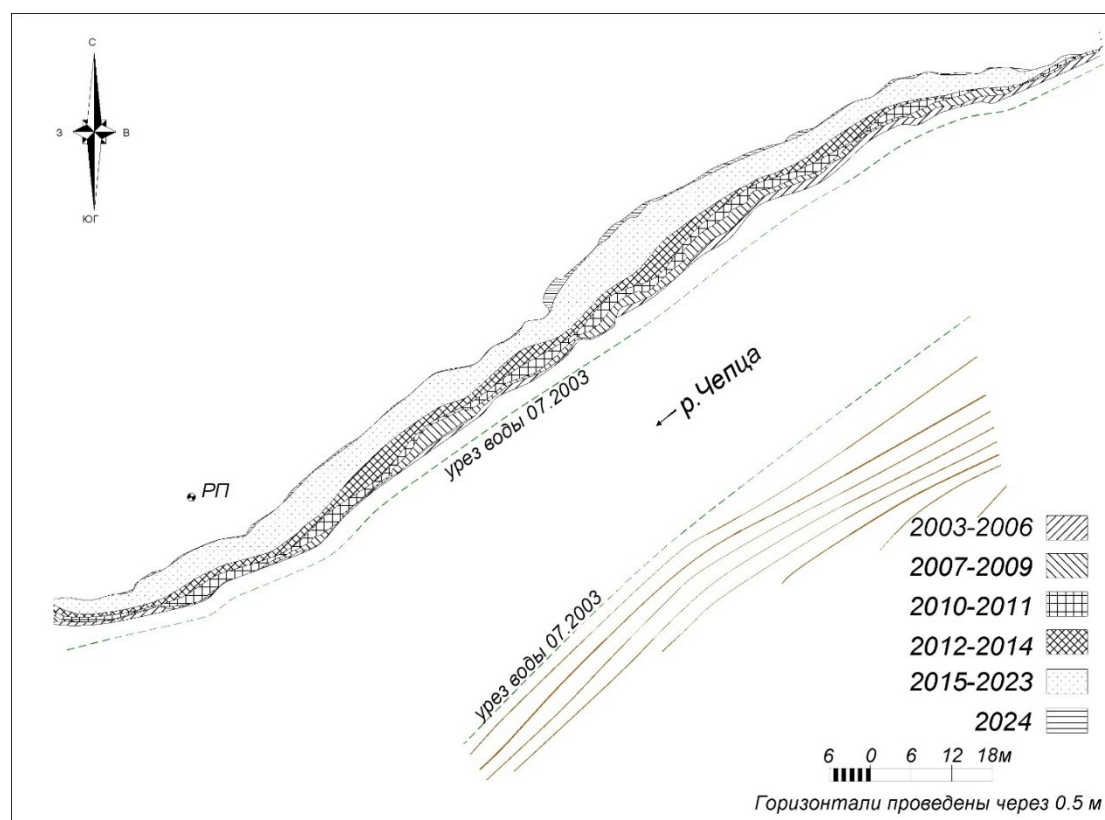


Рис. 6. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Чепца за 2003–2024 гг.

Максимальные величины линейного и площадного размывов по годам соответствуют высоким значениям максимальных годовых расходов, так в 2005 г. он составил 217 м³/с, а в 2021 – 304 м³/с, что лишь незначительно уступает расходу 2016 г. (319 м³/с), он наивысший за весь период исследований на реке. К сожалению, в этот год инструментальные наблюдения не проводились, а по данным реперных замеров в 2016 г. здесь был зафиксирован второй по величине максимум среднегодового размыва за весь период наблюдений и один из высоких значений максимального размыва. Значительные вариации характерны и для объемов размыва. Наиболее высокие объемы размыва были зарегистрированы, как и в случае с площадями, в 2005, 2021 и 2008 г. (таблица 2).



Рассмотрим, как изменяются величины размывов в пределах исследуемой излучины, являющейся по типу свободной, а по внешнему виду сегментной (рис. 7). Для удобства анализа разделим исследуемый участок на 4 части с юга на север, затем на запад вниз по течению, при этом середина излучины (вершина) оказывается в том месте, где она имеет наибольшую кривизну. Максимальные значения ширины и площадей размыва располагаются ниже по течению от вершины излучины и в основном соответствуют третьей части излучины. Здесь суммарные размывы достигают 12–15 м. Вторая часть излучины, расположенная выше по течению, немного уступает по величине размывов от ниже расположенного участка. На 3-м месте по величине размыва находится нижняя (четвертая) часть излучины. Наименьшая зона размыва расположена в самой верхней части излучины, где прослеживаются локальные оползни-обвалы в береговых уступах.

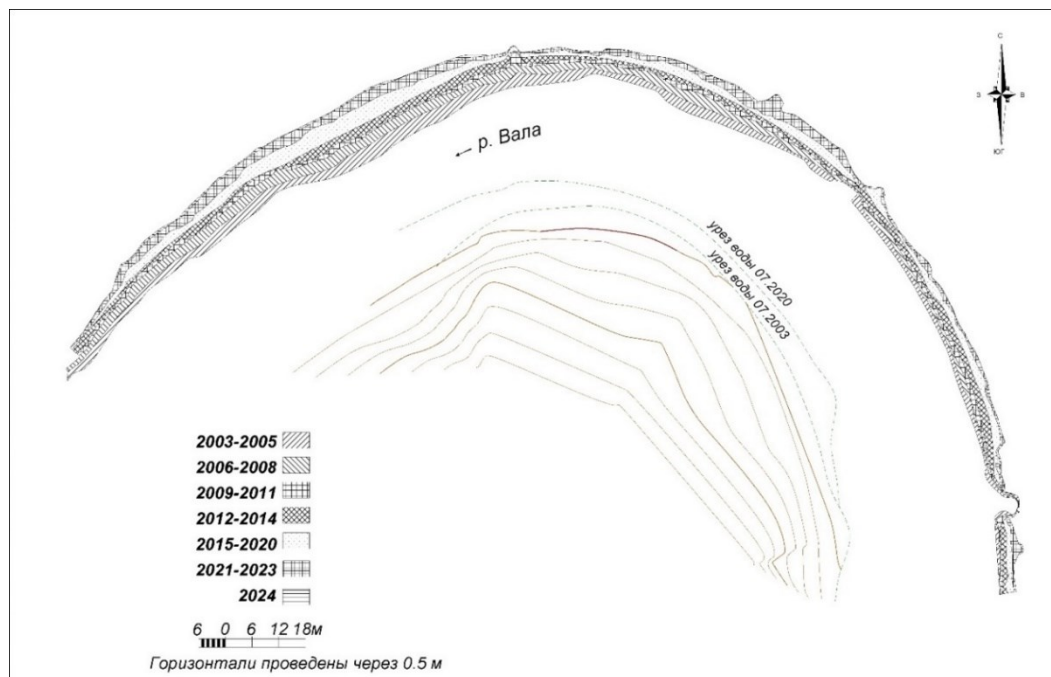


Рис. 7. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Вала (д. Макарово) за 2003–2024 гг.

О расположении максимальных участков размыва ближе к нижнему крылу излучины описывается также в исследованиях на р. Керженец в Нижегородском Заволжье [Кораблева, Чернов, 2019]. Механизм размыва излучин и отложения наносов в русловом потоке весьма дискутируемый и не до конца разработанный вопрос [Матвеев, 1985; Knighton, 1977 и др.].

На р. Сива (пр. приток р. Кама) у д. Метляки геодезическая съемка береговых размывов осуществляется на двух площадках. Здесь представлены данные лишь по первой площадке, расположенной в 500 м к западу от северной окраины деревни. Протяженность рассматриваемой площадки, где осуществляется тахеометрическая съемка составляет 300 м, средняя высота размываемого берегового уступа 3,5 м. Инструментальная съемка здесь проводится с 2003 г. с перерывом в 2017–2019 гг. Средний многолетний расход реки у с. Гавриловка, расположенного в 9 км выше по течению, равен 22,27 м³/с.

За рассматриваемый период протяженность размываемого участка излучины варьировалась от 115 м в 2015 до 283 м в 2007 г. Величины средней ширины отступления береговых уступов изменялись от 0,22 м (2022 г.) до 1,99 м (2010 г.), при этом значительные показатели были получены также в 2006 и 2012 г. Высокие значения максимальной ширины размывов были зарегистрированы в 2012, 2006, 2015 и 2016 гг. (таблица 1). В эти же годы на реке были зарегистрированы наиболее высокие паводковые расходы. Наибольшие значения площадей и объемов размывов были



зарегистрированы в 2006, 2010–2012 и 2016 г. (таблица 2), что свидетельствует о наличии слабо выраженной положительной тенденции в динамике развития береговых размывов на р. Сива.

Изучение топографического плана исследуемого участка показывает, что здесь представлена часть нижнего крыла развитой сегментной излучины свободного типа с достаточно выраженной кривизной в ее вершине, где и фиксируются максимальные значения ширины и площади размывов, суммарно достигающие 18–20 м (рис. 8). В зоне максимальной кривизны излучины находится активно растущий пойменный овраг и локальное оползневое обрушение берегового уступа, образовавшееся в 2014 г. Здесь отмечается классическое смещение максимальной зоны размыва к нижнему крылу излучины, о чем указывалось выше.

Тахеометрическая съемка в среднем течении р. Чепца у с. Адам проводилась в те же годы, что и на выше рассмотренном участке у д. Варни. Длина участка, где проводится геодезическая съемка наиболее протяженная и составляет 533 м. Средняя высота размываемого берегового уступа здесь 5,6 м. Протяженность размываемого участка изменялась от 291 м в 2008 г. до 533 м в 2023 г., при этом наиболее высокие значения отмечались в последние 12 лет. Средний многолетний расход реки у г. Глазов, расположенного в 10 км ниже по течению, равен 65,8 м³/с.

Средняя ширина размыва на участке изменялась в небольших пределах: от 0,25 м в 2004 г. до более 2 м в 2006 и 2012 гг. Наибольшие значения максимальной ширины размывов были зафиксированы в 2006, 2012, 2013 и 2014 г. (таблица 1). Наиболее высокие значения площадей и объемов размывов отмечены в 2012, 2006, 2013, 2014 и 2015–2023 гг. (таблица 2). В указанные годы были зарегистрированы и высокие расходы половодий. Приведенные данные показывают, что и в среднем течении р. Чепца максимальные значения ширины, площади и объемов размыва приурочены ко второй половине периода наблюдений, следовательно, на этом участке отчетливо выявляется положительный тренд в динамике размыва берегов.

Анализ топографического плана исследуемого участка показывает, что здесь представлено нижнее крыло пологой сегментной излучины с очень малой кривизной. В верхней части крыла наблюдаются 2 мысовидных выступа, к которым приурочены локальные максимумы размывов, достигающие 25 м и более. На большей части излучины зоны размыва относительно однородные, за исключением самой верхней и нижней частей крыла, где ширина размыва заметно уменьшается.

Поскольку для выше рассмотренных участков на реках имеются гидрологические посты с данными о среднегодовых и максимальных (половодных) расходах, включая период с 2004 по 2015 г., то нами был проведен корреляционный анализ между максимальной шириной размыва и максимальными расходами. Корреляционная связь между максимальной шириной размыва и с максимальными годовыми расходами на р. Чепца получилась очень высокой ($r = 0,899$), а для р. Сива высокой ($r = 0,600$) (рис. 9). На р. Чепца для участка у с. Адам связь между площадью и объемом размыва с одной стороны и максимальными годовыми расходами с другой, также оказалась высокой и получилась равной для обоих показателей ($r = 0,787$). Аналогичная ситуация возникла и для р. Сива на участке Метляки, где зависимость площадей и объемов размыва от максимальных годовых расходов также высокая ($r = 0,794$).

Анализ размывов на трех реках показал, что главным фактором, обеспечивающим размыв береговых уступов в условиях свободного развития излучин, являются максимальные годовые расходы, наблюдающиеся в период весеннего половодья. Участки с наибольшими размывами часто приурочены к нижнему крылу излучины и немного смещены вниз по течению от точек с наибольшей кривизной.

В литературе приводятся сведения в основном о средних многолетних размывах береговых уступов для крупных и крупнейших равнинных рек России, достигающих 10–15 м/год [Махинов, Ким, 2018; Попов, Кондитерева, 1974; Чалов и др., 2016 и др.]. По данным стационарных наблюдений на малых и средних реках Европейской части России среднегодовые величины смещения береговых уступов редко превышают 2–4 м, в основном они варьируют в пределах 0,2–1,5 м [Завадский и др., 2010].

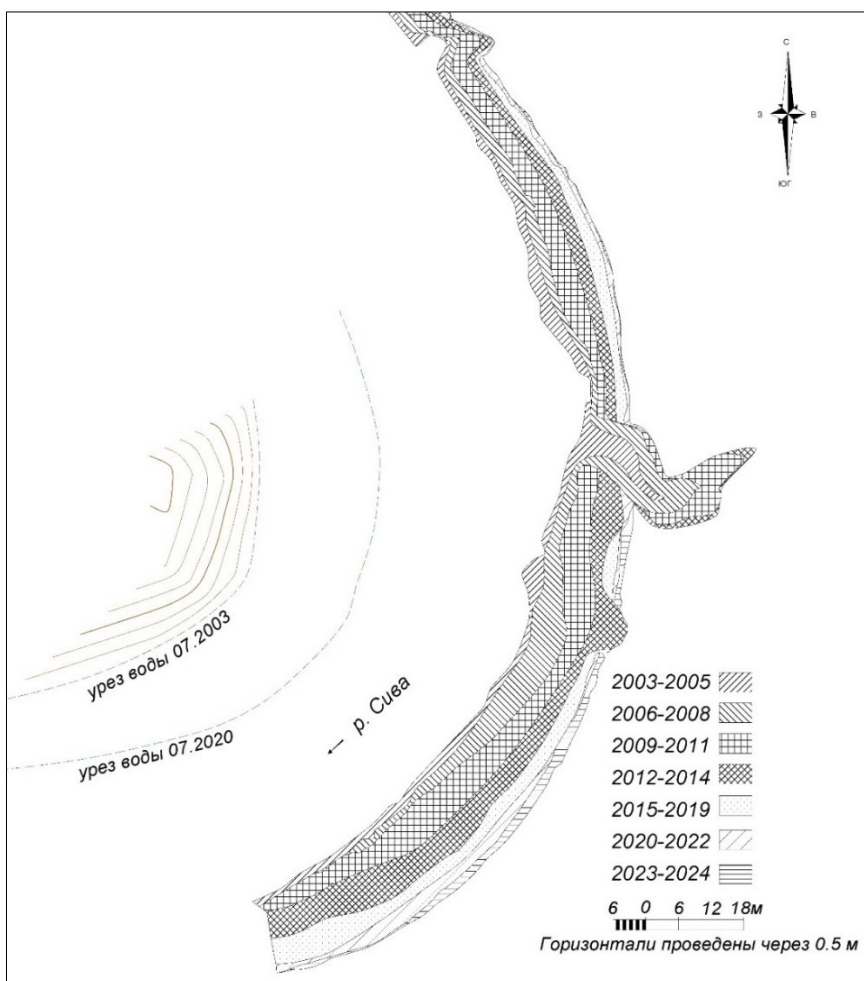


Рис. 8. Схема смещения размываемого берегового уступа на р. Сива за 2003–2024 гг.

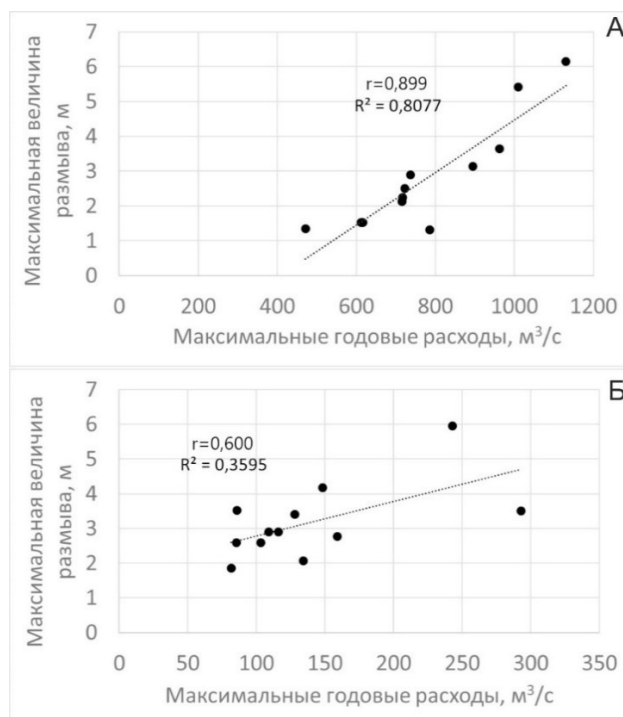


Рис. 9. Зависимости между максимальной шириной размыва на р. Чепца у с. Адам (А) и р. Сива у д. Метляки (Б) и их максимальными годовыми расходами за 2004–2015 гг.



Выводы

Анализ многолетних инструментальных наблюдений показал, что для исследуемых рек УР наибольшие значения ширины размыва достигают 8,1 м/год, а высота размываемого берегового уступа изменяется от 2,5 м на р. Нылга до 8,8 м на р. Лумпун. В пространственном отношении размываемые участки приурочены к участкам излучин с наибольшей кривизной или смещены ниже по течению. В многолетней динамике размывов на рр. Чепца и Кырыкмас отчетливо прослеживается положительный тренд. Для других рек из-за больших перерывов в съемках после 2015 г. о каких-либо тенденциях в динамике судить невозможно. На р. Сива в отношении многолетней динамики размывов отмечается слабая положительная тенденция, подтверждаемая высокими половодными расходами в последние годы.

Установлена очень тесная связь между максимальной шириной размыва на р. Чепца (с. Адам) и максимальными годовыми расходами реки за период с 2004 по 2015 г., о чем свидетельствуют очень высокие коэффициенты корреляции ($r = 0,899$). Достаточно тесная связь получилась с площадью и объемом размывов за указанные годы ($r = 0,787$). На р. Сива корреляционная связь между максимальной шириной размыва и максимальными годовыми расходами за указанный период оказалась чуть ниже ($r = 0,600$), но тоже существенная. Показатель же связи с площадным и объемным размывами получился более значимым ($r = 0,794$). Корреляционный анализ максимальной ширины размывов на р. Кырыкмас за 2004–2021 гг. с максимальными годовыми расходами на реке аналогично также показал достаточно значимую связь ($r = 0,617$).

Полученные результаты могут быть использованы как для аналогичных рек Удмуртии, так и рек равнинных территорий Европейской части РФ. Необходимость многолетних полевых исследований размывов береговых уступов рек с применением современных инструментальных методов определяется важностью выявления закономерностей русловых процессов для составления надежных прогнозов их развития в конкретных ландшафтно-геоморфологических условиях с целью предотвращения опасных геоэкологических ситуаций.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 25-27-20003.

Список литературы

- Антроповский В.И. Гидролого-морфологические закономерности и фоновые прогнозы переформирования русел рек. СПб, 2006, 216 с.
- Атлас Удмуртской Республики / под общей ред. И.И. Рысина. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Феория; Ижевск: Удмуртия, 2020, 288 с.
- Беркович К.К. Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов. М.: ГЕОС, 2001, 164 с.
- Гафуров А.М., Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Шарифуллин А.Г. Оценка современного роста вершин оврагов южного мегасклона Восточно-Европейской равнины с применением набора инструментальных методов // Вестник Моск. ун-та, Сер. 5, География, 2018, 5: 61–71.
- Григорьев И.И., Рысин И.И. Исследования техногенных и сельскохозяйственных оврагов в Удмуртии с применением ГИС-технологий // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле, 2008, 1: 49–58.
- Григорьев И.И., Рысин И.И. Применение геоинформационных систем при исследованиях техногенных и сельскохозяйственных оврагов в Удмуртии // Геоморфология, 2009, 1: 69–75.
- Григорьев И.И., Рысин И.И. Использование беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера) с применением цифровых технологий в географических исследованиях // В сб.: Цифровая география - материалы Всерос. науч.-практ. конференции с междунар. участием (г. Пермь, 16–18 сентября 2020 г.): в 2 т. Т. 1: Цифровые и геоинформационные технологии в изучении природных процессов в экологии, природопользовании и гидрометеорологии. Пермь, 2020, с. 54–57.



- Завадский А.С., Лобанов Г.В., Петухова Л.Н., Серебренникова И.А., Смирнова Е.А., Чернов А.В. Результаты стационарных исследований русловых процессов на реках ЕТР // В сб.: Эрозионные и русловые процессы: Сборник трудов. М.: МАКС Пресс, 2010, 5: 58–87.
- Кораблева О.В., Чернов А.В. Современная динамика пойменно-русловых комплексов средней реки Керженец (по мониторинговым наблюдениям 2001-2018 гг.) // В сб.: Научные проблемы оздоровления Российских рек и пути их решения. М.: ИВП РАН, 2019, с. 172–176.
- Матвеев Б.В. Влияние геолого-геоморфологических факторов на образование и морфологию речных излучин // Геоморфология, 1985, 3: 51–57.
- Махинов А.Н., Ким В.И., Аношкин А.В., Лю Ш., Махинова А.Ф., Дугаева Я.Ю. Преобразование локальных пойменно-русловых систем рек Амур и Уссури как фактор возникновения трансграничных проблем // Региональные проблемы, 2018, 21(2): 61–68.
- Мозжерин В.И., Курбанова С.Г. Деятельность человека и эрозионно-русловые системы Среднего Поволжья. Казань: Арт. Дизайн, 2004, 128 с.
- Назаров Н.Н., Егоркина С.С. Реки Пермского Прикамья: Горизонтальные русловые деформации. Пермь: ИПК «Звезда», 2004, 155 с.
- Петухова Л.Н., Рысин И.И. О факторах развития горизонтальных русловых деформаций на реках Удмуртии // Вестник Удмуртского университета, № 11, спец. вып. Науки о Земле, с. 153–168.
- Петухова Л. Н., Рысин И.И. Факторы русловых процессов и их влияние на морфодинамику русел рек Удмуртии // Геоморфология, 2006, 4: 70–78.
- Попов И.В., Кондитерева Э.А. Прогноз русловых деформаций Волги на участке Саралёвского водного узла в связи с проектированием улучшения его судоходных условий // Труды ГГИ, 1974, 216: 65–93.
- Рысин И.И., Петухова Л.Н. Русловые процессы на реках Удмуртии. Ижевск: Ассоциация «Научная книга», 2006, 176 с.
- Рысин И.И., Григорьев И.И., Петухова Л.Н., Перевошиков А.А. Многолетняя динамика скоростей горизонтальных русловых размывов на реках Удмуртии // Геоморфология и палеогеография, 2024, 55(1): 26–39.
- Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. / Под ред. Р.С. Чалова. М.: ГЕОС, 1998, 288 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008, 608 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 2. Морфодинамика речных русел. М.: Красанд, 2011, 960 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н. и др. Морфология, деформации, современные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология, 2016, 3: 22–35.
- Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. М.: ООО «Крона», 2009. 614 с.
- Эрозионно-русловые системы: монография / Под ред. Р.С. Чалова, В.Н. Голосова, А.Ю. Сидорчука. М.: ИНФРА-М., 2017, 702 с.
- Knighton A.D. The meander problem // Geography, 1977, 2(275): 106–111.
- Petukhova, L.N., Rysin I.I. Patterns in the development of horizontal river channel transformations in the Republic of Udmurtia, Russian Federation // In: Channel processes in the rivers of mountains, foothills and plains / edited by R. S. Chalov, M. Kamykowska, K. Krzemien. Cracow, 2006, p. 119–131.
- Robert A. River processes: an introduction to fluvial dynamics. London: Arnold, 2003, 214 p.
- Rysin I., Petukhova L. Monitoring of channel processes on the interfluvium between the Kama and the Vyatka rivers // Sediment Transfer through the Fluvial System: [Proceedings of the International Symposium held at Moscow, Russia from 2 to 6 August 2004] / V. Golosov, V. Belyaev, E. Walling. – [Wallingford], 2004, p. 261–268.