



ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

SOIL EROSION AND RIVER CHANNEL PROCESSES

№ 1

январь — март 2025 г.

No. 1

January — March 2025

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. М. – 2025. – № 1. – 107 с.

Журнал освещает вопросы исследования:

- теоретических и экспериментальных механизмов эрозионных и русловых процессов;
- проявления эрозии и русловых процессов в различных природных и природно-антропогенных условиях;
- формирования и движения речных наносов, их геохимических и экологических проявлений;
- исследования эффективности различных средств борьбы с эрозией;
- управления русловыми процессами и регулирования русел рек;
- устьевых процессов;
- воздействия хозяйственной деятельности на эрозионно-русловые системы.

Журнал координируется Межвузовским научно-координационным советом по эрозионным, русловым и устьевым процессам и лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**СОСТАВ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА
«ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ»**

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

С.Р. Чалов — д-р геогр. наук, профессор кафедры гидрологии суши, заведующий научно-исследовательской лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

О.А. Макаров — д-р биол. наук, заведующий кафедрой эрозии и охраны почв, факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

М.М. Иванов — канд. геогр. наук, лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник (г. Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д-р техн. наук **В.В. Беликов**, заведующий лабораторией численного гидродинамического моделирования, главный научный сотрудник, Институт водных проблем РАН (г. Москва, Россия)

канд. геогр. наук **Ю.Р. Беляев**, кафедра геоморфологии и палеогеографии, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент (г. Москва, Россия)

д-р техн. наук **Г.Л. Гладков**, кафедра водных путей и водных изысканий, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, заведующий (г. Санкт-Петербург, Россия)

д-р геогр. наук **В.Н. Голосов**, лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник (г. Москва, Россия)

д-р **А.К. Дарвишан**, кафедра управления водосборными бассейнами, факультет природных ресурсов, Университет Тарбиат Модарес, профессор (г. Тегеран, Иран)

д-р биол. наук **В.В. Демидов**, кафедра эрозии и охраны почв, факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор (г. Москва, Россия)

д-р геогр. наук **О.П. Ермолаев**, кафедра ландшафтной экологии, Институт экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский федеральный университет, профессор (г. Казань, Россия)

канд. геогр. наук **А.П. Жидкин**, лаборатория эрозии почв, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, заведующий (г. Москва, Россия)

канд. геогр. наук **А.С. Завадский**, лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник (г. Москва, Россия)

д-р **М. Златич**, факультет лесного хозяйства, Белградский университет, профессор (г. Белград, Сербия)

канд. техн. наук **В.М. Католиков**, отдел русловых процессов, Государственный гидрологический институт, заведующий (г. Санкт-Петербург, Россия)

д-р биол. наук **Г.С. Куст**, отдел физической географии и проблем природопользования, Институт географии РАН, главный научный сотрудник (г. Москва, Россия)

д-р **Э. Латрубесс**, программа аспирантуры по экологическим наукам, Федеральный университет штата Гояс, профессор (г. Гояния, Бразилия)

д-р геогр. наук **Ф.Н. Лисецкий**, кафедра природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, профессор (г. Белгород, Россия)

д-р **Лю Шугуан**, кафедра гидротехники, факультет гражданского строительства, Университет Тунцзи, профессор (г. Шанхай, Китай)

д-р **М. Маеркер**, факультет наук о Земле и окружающей среде, Павийский университет, профессор (г. Павия, Италия)

д-р **Ж. Минелла**, кафедра почвоведения, Федеральный университет Санта-Марии, профессор (г. Санта-Мария, Бразилия)

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук **А.В. Панин**, отдел палеогеографии четвертичного периода, Институт географии РАН, заведующий, заместитель директора (г. Москва, Россия)

д-р **С.Х. Садеги**, кафедра управления водосборными бассейнами, факультет природных ресурсов, Университет Тарбиат Модарес, профессор (г. Тегеран, Иран)

д-р геогр. наук **А.Ю. Сидорчук**, лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник (г. Москва, Россия)

д-р **В. Спалевич**, биотехнический факультет, Университет Черногории, профессор (г. Подгорица, Черногория)

д-р **А. Цыпленков**, научно-исследовательский институт «Manaaki Whenua — Landcare Research», научный сотрудник (г. Палмерстон Норт, Новая Зеландия)

д-р геогр. наук **Р.С. Чалов**, кафедра гидрологии суши, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор (г. Москва, Россия)

канд. с.-х. наук **А.Н. Червань**, кафедра почвоведения и ГИС, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет, заведующий (г. Минск, Беларусь)

д-р **М. Шлеттерер**, институт гидробиологии и управления водными экосистемами, Университет природных ресурсов и наук о жизни, профессор (г. Вена, Австрия)

КООРДИНАТОР РЕДАКЦИИ

канд. геогр. наук **Е.Д. Павлюкевич**, лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

РЕДАКТОР-КОРРЕКТОР **Р.М. Синаюк**

ОРИГИНАЛ-МАКЕТ И ДИЗАЙН **Л.В. Езерова**

ФОТО НА 1-й ОБЛОЖКЕ: река Анадырь, июнь 2024 года
(фото Школьного Данилы Игоревича, н.с. кафедры гидрологии суши и НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова)

АДРЕС РЕДАКЦИИ

119619 Россия, Москва, улица Лазенки 6-я, д. 2, стр. 15

E-mail: erpr@geogr.msu.ru

Сайт: <https://journal.sediment.ru/>

УЧРЕДИТЕЛЬ

Общество с ограниченной ответственностью «Экспертная лаборатория
«Гидроинформационные системы»

© Редколлегия журнала «Эрозия почв и русловые процессы» (составитель), 2025

© ООО «Экспертная лаборатория

«Гидроинформационные системы», 2025

ISSN (PRINT) 3034-4638

Журнал основан в 2024 году
Периодичность издания — 4 раза в год

SOIL EROSION AND RIVER CHANNEL PROCESSES. М. – 2025. – № 1. – 107 p.

The journal covers issues of research of theoretical and experimental mechanisms of erosion and channel processes, manifestations of erosion and channel processes in various natural and natural-anthropogenic conditions, development of new methods of combating erosion applicable to various branches of the economy and research of efficiency of various means of combating erosion. The journal is coordinated by the Interuniversity Scientific Coordination Council on Erosion, Channel and Estuary Processes.

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF
Prof. Dr. S.R. Chalov

DEPUTY OF THE EDITOR-IN-CHIEF
Prof. Dr. O.A. Makarov

EDITORIAL SECRETARY
Dr. M.M. Ivanov

EDITORIAL BOARD

Dr. V.V. Belikov, Dr. Yu.R. Belyaev, Prof. Dr. R.S. Chalov, Dr. A.N. Chervan, Dr. A.K. Darvishan (Iran),
Prof. Dr. V.V. Demidov, Prof. Dr. O.P. Ermolaev, Prof. Dr. G.N. Gladkov, Dr. V.N. Golosov, Dr. G.S. Kust,
Prof. Dr. E. Latrubesse (Brazil), Prof. Dr. F.N. Lisetsky, Prof. Dr. M. Maerker (Italy), Prof. Dr. J.P.G. Minella (Brazil),
Dr. A.V. Panin, Prof. Dr. S.H. Sadeghi (Iran), Prof. Dr. M. Schletterer (Austria), Prof. Dr. Liu Shuguang (China),
Dr. A.Yu. Sidorchuk, Prof. Dr. V. Spalevic (Montenegro), Dr. A. Tsyplenkov (New Zealand), Dr. A.S. Zavadsky,
Dr. A.P. Zhidkin, Prof. Dr. M. Zlatic (Serbia)

EDITORIAL COORDINATOR
Dr. E.D. Pavlyukevich

EDITOR R.M. Sinaiuk

ORIGINAL LAYOUT AND DESIGN L.V. Ezerova

PHOTO ON THE 1ST COVER – Anadyr River, June 2024

(photo by Danila Shkolnyi, researcher of the Department of Land Hydrology and The Makkaveev laboratory of Soil Erosion and River Channel Processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University)

EDITORIAL OFFICE ADDRESS

119619 Russia, Moscow, st. Lazenki 6, 2, build. 15
E-mail: eprp@geogr.msu.ru

<https://journal.sediment.ru/>

FOUNDER

Limited Liability Company “Expert Laboratory
“Hydroinformational Systems”

© Editorial Board of the journal “Soil Erosion and River
Channel Processes” (editor-compiler), 2025
© Expert Laboratory “Hydroinformational Systems” LLC, 2025

ISSN (PRINT) 3034-4638

The journal was founded in 2024
Published 4 times a year

ОТ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Этот номер представляет собой тематический сборник трудов членов Межвузовского научно-координационного совета по эрозионным, русловым и устьевым процессам. Всего за историю Совета было выпущено семь таких сборников, имевших название «Эрозионные и русловые процессы». Последний, седьмой сборник вышел в свет в 2020 году. Все статьи сборника доступны на сайте Совета sediment.ru, а также в системе РИНЦ. Фактически данный номер журнала, как и следующий (№ 2 за 2025 год), — прямое продолжение этих сборников, но уже в формате периодического издания. В связи с этим номер открывает редакционная заметка, посвященная Совету, его жизни в последние годы.

В данный номер журнала вошло восемь статей, представляющих труды ученых МГУ имени М.В. Ломоносова, Уфимского государственного университета науки и технологий, Удмуртского государственного университета, Нижегородского государственного педагогического университета имени К. Минина, Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина и Брянского государственного университета имени И.Г. Петровского.

Номер имеет русловую направленность. Сразу в трех статьях приведен анализ результатов стационарных наблюдений за эрозией берегов — на реках Удмуртии, в бассейне р. Кудьмы и на одном из участков р. Оки. Две статьи посвящены аспектам изучения пойм. Кроме того в номер вошли статьи, где изложены гидролого-экологическая характеристика малых рек бассейна р. Урал и методические аспекты картографирования устьевых систем.

*Профессор, д.г.н.,
заведующий НИЛ эрозии почв и русловых процессов
им. Н.И. Маккавеева*

С.Р. Чалов



СОДЕРЖАНИЕ

Р.С. Чалов, С.Р. Чалов, А.В. Чернов, Н.М. Михайлова. МЕЖВУЗОВСКАЯ КООРДИНАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭРОЗИОННЫХ И РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ: ИТОГИ 2021–2025 гг., ПРОБЛЕМЫ, ПУТИ РЕШЕНИЯ	8
В.В. Сурков, Д.В. Ботавин. ФОРМИРОВАНИЕ, ЭВОЛЮЦИЯ И МОРФОЛОГИЯ ПОЙМ РЕК С РАЗВЕТВЛЕННЫМ РУСЛОМ	14
А.М. Гареев. ГИДРОЛОГО-ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАЛЫХ РЕК БАССЕЙНА р. УРАЛ (в пределах России)	32
И.И. Рысин, И.И. Григорьев, Л.Н. Петухова. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ НА РЕКАХ УДМУРТИИ	46
А.Л. Варенов. ДЕФОРМАЦИИ РУСЕЛ МАЛЫХ РЕК БАССЕЙНА КУДЬМЫ И ИХ СВЯЗЬ С ФАКТОРАМИ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ (по данным стационарных наблюдений за 2010–2023 гг.)	61
А.Ю. Воробьев, А.С. Кадыров, Д.С. Локтеев, Е.В. Бургов, А.А. Балобина. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛОКАЛЬНОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БОКОВОЙ ЭРОЗИИ р. ОКИ	73
Г.В. Лобанов, Г.В. Чекин. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЙМЕННОГО АЛЛЮВИЯ В СРЕДНЕМ И ВЕРХНЕМ ТЕЧЕНИИ р. ДЕСНЫ И ФАКТОРЫ, ЕГО ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ	96
В.Н. Коротаев, Е.Р. Чалова. МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ АТЛАСОВ ПО РУСЛОВОЙ МОРФОДИНАМИКЕ И ГЕОМОРФОЛОГИИ УСТЬЕВЫХ СИСТЕМ РЕК РОССИИ	101

УДК 551.435.11(470.51) + 551.4.04

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ НА РЕКАХ УДМУРТИИ

И.И. Рысин*, И.И. Григорьев**, Л.Н. Петухова***

Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Россия

rysin.iwan@yandex.ru, **ivangrig@yandex.ru, *petlar75@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.01.2025

После доработки 17.02.2025

Принята к публикации 25.03.2025

Аннотация. Представлены результаты исследования смещения русел за 2000–2023 гг. на 55 ключевых участках, расположенных на реках разной величины, протекающих в условиях различных ландшафтов Удмуртии. Скорости размыва определялись с помощью реперов и инструментальной съемки с применением беспилотных летательных аппаратов. Для анализа полученных результатов реки были разделены на 4 группы по величине их порядков (по методике А. Шайдеггера). Максимальные размывы характерны для рек с порядком выше 14 (до 15 м/год), для средних рек с порядком 9–14 эти величины составляют 6–8 м/год. Для малых рек с порядком 6–9 максимальные размывы достигали 5.5 м/год, а для очень малых рек (порядок 6 и менее) соответственно до 4.2 м/год в естественных условиях и до 8.1 м/год при техногенном вмешательстве. Получены статистические показатели среднегодовых и максимальных размывов на реперных участках за рассматриваемый период. Корреляционный анализ показал наличие высокой достоверной связи между скоростью размыва и порядком реки и, соответственно, среднегодовыми и максимальными расходами. Приводится анализ размывов за 23-летний временной интервал с определением уравнения тренда по выделенным группам рек.

Ключевые слова: скорость размыва рек, реперы, мониторинг, корреляционный анализ, Удмуртская Республика

DOI: [10.71367/3034-4638-2025-2-1-46-60](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2025-2-1-46-60)

ВВЕДЕНИЕ

Для рационального использования и охраны водных ресурсов необходимы исследования характеристик русел и русловых деформаций, поскольку они тесно взаимосвязаны и являются составной частью эрозионно-русловых систем, где на протяжении геологического времени происходит размыв и переотложение материала. Размывы берегов рек — наиболее заметное проявление русловых деформаций. Они сопровождаются образованием прирусловых отмелей у противоположных берегов и обуславливают изменение различных параметров русловых форм. Экологически значимые связи в эрозионно-русловых системах обуславливаются обменом веществом и энергией между различными звеньями системы. Характер и направленность этих связей во многом зависят от климатических и ландшафтных условий территории. Наряду с климатом еще более значимую роль в изменении эрозионно-русловых систем играет хозяйственное преобразование ландшафтов (Маккавеев,

1955; Чалов С.С., 1998, 2008, 2011; Knighton, 1998; Robert, 2003). Особую актуальность имеет эволюция эрозионно-русловых систем в процессе интенсивного земледелия с мелиоративными мероприятиями и его трансформации при изменении эколого-экономических условий. Слабоизученным до сих пор является вклад русловых деформаций в балансовую составляющую стока наносов (Чалов С.С., 2021). Разработка гидротехнических мероприятий не может быть решена без исследования закономерностей русловых процессов. Результаты этих исследований являются составной частью гидрологического обоснования проектов различных водохозяйственных мероприятий и имеют большое практическое значение (Антроповский, 2006; Беркович, 2001; Чалов, 2011; Чернов, 2009; Эрозионно..., 2017 и др.).

Целью данной статьи являются оценка многолетней динамики скоростей горизонтальных русловых размывов на различных реках Удмуртии, различающихся как порядком, так и ландшафт-

ными особенностями их бассейнов, и выявление наиболее значимых факторов с помощью корреляционного анализа, а также сопоставление данных реперных измерений с показателями, полученными в результате инструментальных съемок на отдельных участках. Данные мониторинга русловых размывов послужат в дальнейшем основой для прогнозирования развития излучин в конкретных ландшафтно-геоморфологических условиях с целью предотвращения опасных геоэкологических ситуаций.

Равнинная территория Удмуртской Республики (УР) расчленена густой сетью рек, общая протяженность которых составляет почти 30 000 км, при этом средняя густота речной сети составляет 0.71 км/км². Проявляется зональное увеличение и густоты речной сети с юга на север (0.45–0.95 км/км² и более), и модулей стока рек (от 4.5–5.0 на юге до 8–9 л/с·км² на севере). Преобладают широкопойменные реки с активным развитием процессов меандрирования (Рысин, Петухова, 2006; Петухова, Рысин, 2006; Атлас..., 2020). В пределах территории УР преобладают южно-таежные ландшафты в северной и центральной частях, на юге они сменяются сильно преобразованными хозяйственной деятельностью ландшафтами смешанных (хвойно-широколиственных) лесов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью исследования особенностей развития горизонтальных русловых деформаций на территории УР по топографическим картам было выделено 55 ключевых участков, охватывающих реки разной величины и различные ландшафты (рис. 1). Основными критериями выбора участков являлись: 1) яркое проявление русловых процессов на данной территории; 2) типичность развития русловых процессов с соседними территориями; 3) транспортная доступность участка. Полевые работы на изучаемых реках проводятся ежегодно (с 1999 г.) в летний период (чаще в июле), а на отдельных участках (около г. Ижевска) еще дополнительно весной (май) и осенью (октябрь) (Рысин, Петухова, 2006).

Одним из методов изучения динамики рельефа является метод стержней и марок (Спиридонов, 1970). Сущность его заключается в проведении повторных замеров расстояний до неподвижных стержневых реперов или марок. Детальное описание применяемой методики и анализ результатов представлены в нашей работе (Рысин и др., 2024). В пределах 30 участков осуществлялась тахеометрическая съемка размываемого берегового уступа. В случае смещения размываемого участка вниз по

течению в исследуемой излучине закладывались новые реперы (что случалось крайне редко), на неразмываемых участках реперные объекты также сохранялись и замеры продолжались. Учитывались также локальные участки размывов в виде небольших оползней-обвалов, где отсутствовали реперы.

Наряду с полевыми данными широко использовались крупномасштабные топографические карты, аэрофото- и космические снимки, по которым определялись различные морфологические и морфометрические характеристики русла. Реки от истока до устья были разделены на отдельные достаточно однородные по водности участки, границами которых служили места впадения крупных притоков. Общее количество выделенных участков на реках составило 245. Для каждого из участков рек определялись модальные значения параметров излучин: шаг L , радиус кривизны r , стрела прогиба h , длина l , высота размываемого уступа H и другие. Для безразмерных параметров — l/L и r/h — использовались осредненные значения. Расчеты были проведены для 3827 отдельных излучин, и результаты были опубликованы ранее (Рысин, Петухова, 2006).

По соотношению основных параметров излучин и прежде всего по степени развитости излучины l/L были выделены, в соответствии с морфодинамической классификацией МГУ (Чалов Р.С. и др., 2004; Чалов Р.С., 2011), основные морфодинамические типы русел. На территории УР выделено 6 типов русел: прямолинейные ($l/L < 1.15$), сегментные пологие излучины ($1.15 < l/L < 1.40$), сегментные развитые ($1.40 < l/L < 1.70$), сегментные крутые ($1.70 < l/L < 2.00$), петлеобразные ($l/L > 2.00$) и прорванные ($l/L = 1.50–2.00$). Полученные таким образом данные послужили основой для заложения реперных объектов и мест тахеометрической съемки (Рысин, Петухова, 2006). Мониторинг русловых размывов осуществлялся преимущественно на излучинах разной степени развитости, исключением являлись прямолинейные участки с отсутствием размывов.

Геодезическая съемка, как правило, проводилась на активно размываемых участках рек вначале с помощью отечественных оптических теодолитов Т30 и 2Т30, а с 2001 г. начали применяться лазерные тахеометры «Trimble 3305», затем «Nicon NPR-332». Тахеометрическая съемка позволяет рассчитать не только линейные параметры размыва, но также площадные и объемные показатели (Григорьев, Рысин, 2008; Гафуров и др., 2018).

С 2019 г. для изучения эрозионных процессов на большинстве ключевых участков нами применяется спутниковый приемник «EFT» вместе с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) «DJI

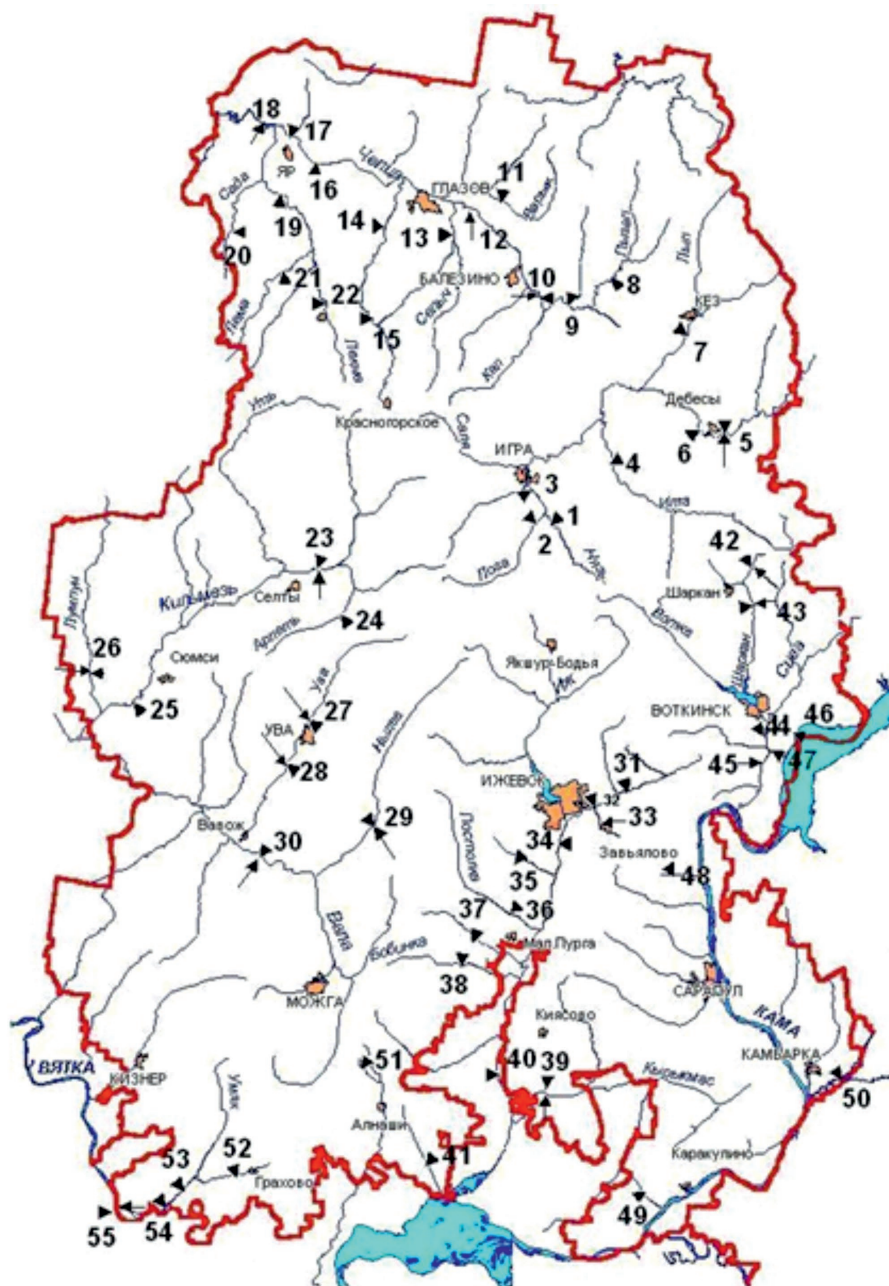


Рис. 1. Карта-схема расположения ключевых участков по изучению морфодинамики русел рек Удмуртской Республики. Условные обозначения: цифрами показаны номера участков; ▼ — участки с реперными наблюдениями; ↑ — участки с тахеометрической съемкой

Fig. 1. Map-diagram of the location of key sites for the study of morphodynamics of riverbeds of the Udmurt Republic. Symbols: digits show key sites numbers; ▼ — the key sites with reapers observations; ↑ — tachymetric survey sites

Phantom 4» и «Autel Evo II PRO». Снимки с БПЛА отличаются сверхвысоким пространственным разрешением и имеют высокую скорость получения. Общая методика использования БПЛА для географических исследований обычно включает 6 этапов, в завершение которых создаются цифровая модель местности (ЦММ) и ортофотоплан (Григорьев, Рысин, 2020).

Для повышения точности ортофотопланов обычно используется привязка к наземным маркерным пунктам, координаты которых определяются с помощью спутниковых приемников. В итоге точность ортофотопланов достигает 5–10 см. Обработка аэрофотоснимков проводится нами в программе «Agisoft Metashape Professional» (РФ). В исследовании выполнялось построение 3d-моделей, ортофотопланов и

ЦММ. Подготовка топографических планов, расчет площадей и объемов размывов осуществляются с использованием программного комплекса «Кредо».

Для вычисления объемов обычно используются 2 метода: геодезический и фотограмметрический. Геодезический (классический) метод основывается на построении поперечных профилей через равные расстояния (от 2–4 до 5–10 м) электронным тахеометром. С помощью программного комплекса «Кредо» создается цифровая модель рельефа (методом триангуляции), и таким образом получается объем разницей двух поверхностей — по бровке и по дну. В итоге имеется картограмма вычисления объема или по сетке квадратов, или по контуру. Рассчитанный объем сравнивается с объемом за предыдущий год. Полученная разница и будет объемом вынесенного материала за текущий календарный год (Григорьев, Рысин, 2009).

Фотограмметрический метод предусматривает использование БПЛА. В результате обработки снимков БПЛА в программе Agisoft Metashape Professional получаем ортофотоплан и цифровую модель рельефа, жестко привязанные к требуемой системе координат (условная система координат при использовании своих реперов или МСК-18 при использовании ГНСС-приемников EFT M1) (РФ). В дальнейшем ортофотоплан можно использовать в качестве подложки для проведения линейных измерений в различных ГИСах (MapInfo, ArcGis и т. п.) и САПР (Автокад, Кредо). Фотограмметрический метод используется в наших исследованиях с 2019 г.

Анализ полученных за двадцать с лишним лет полевых данных свидетельствует о большом диапазоне скоростей бокового размыва. При этом имеются существенные различия по рекам, отличающимся размерами (порядком, водоносностью и т. д.). Одной из характеристик водотока, дающей осредненное представление о размере реки, условным индексом речного потока является порядок реки. Для рек территории УР расчет их порядков выполнялся по схеме А.Е. Шайдеггера (1964):

$$N = \log_2(P) + 1,$$

где P — число притоков 1-го порядка (притоком 1-го порядка считается река длиной менее 10 км). Порядок рек можно также использовать как критерий перехода от малых рек к средним и большим (крупным). Для территории УР предлагается относить реки 1–6-го порядков к очень малым, 6.1–9-го порядков к малым, реки 9.1–14-го порядков — к средним и свыше 14.1 порядка — к большим (крупным).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных за двадцать четыре года (2000–2023 гг.) полевых реперных наблюдений свидетельствует, что наибольшие скорости размыва характерны для рек с порядком выше 9-го (по А. Шайдеггеру). Максимальные значения размыва, наблюдаемые на таких реках, достигают 6–8 м и более, среднегодовые скорости размыва колеблются в интервале 0.8–3.1 м/год. На р. Вятке, имеющей 15-й порядок, среднегодовые скорости размыва превышают 3–5 м/год, а максимальные из зафиксированных значений составляют 12–15 м/год. Достаточно активно проявляются горизонтальные русловые деформации на р. Чепце у д. Яр (порядок 12.3): среднегодовые скорости размыва здесь составляют обычно 1–3 м/год, а максимальные — 7.1 м были отмечены в 2005 г.

С порядком реки тесно связаны и некоторые морфодинамические характеристики русла, такие как ширина и глубина русла, их отношение, а также среднемаксимальные расходы рек, что было подтверждено на различных реках Европейской России, Сибири и Дальнего Востока (Чернов, 2009; Джуха, Чалов Р.С., 1989; Завадский, Чалов Р.С., 1997; Павлов, 1994; Назаров, Егоркина, 2004).

Для малых рек (6.1–9 порядок) средние скорости отступления берега составляют 0.4–0.6 м/год. Но на отдельных участках размывы намного выше: на р. Кырыкмас (лев. пр. р. Иж) у д. Тавзямал в 2012 г. максимальный размыв составил 5.05 м, в 2017 г. — 5.35 м. На р. Пызеп (прав. пр. р. Чепцы) у д. Бани в 2012 г. максимальный размыв на одном из участков составил 4.8 м, а в 2019 г. данный показатель достиг рекордных для данной группы 5.5 м.

Для очень малых рек (порядок 6.0 и ниже) значения средних скоростей размыва составляют 0.1–0.3 м/год, хотя в отдельных точках зарегистрировано смещение берега на 1 м и более. Так, на участке р. Шаркан (лев. пр. р. Вотки) у д. Титово (порядок 5.6) средний максимальный размыв в 2000 и в 2003 гг. превысил 2 м. На р. Адамке (лев. пр. р. Умяк) у с. Грахово (порядок 3.8) средний максимальный размыв в 2011 г. составил 4.2 м, а на р. Агрызке (прав. пр. р. Иж) у д. Баграш-Бигра (порядок 4.5) максимальный размыв в 2003 г. составил 8.1 м, что было вызвано прорывом земляной дамбы вышерасположенного пруда. Относительно низкие скорости горизонтальных русловых деформаций характерны и для малых рек соседнего Пермского края и Республики Татарстан (Назаров, Егоркина, 2004; Мозжерин, Курбанова, 2004). По данным стационарных наблюдений, на малых и средних реках Европейской части России

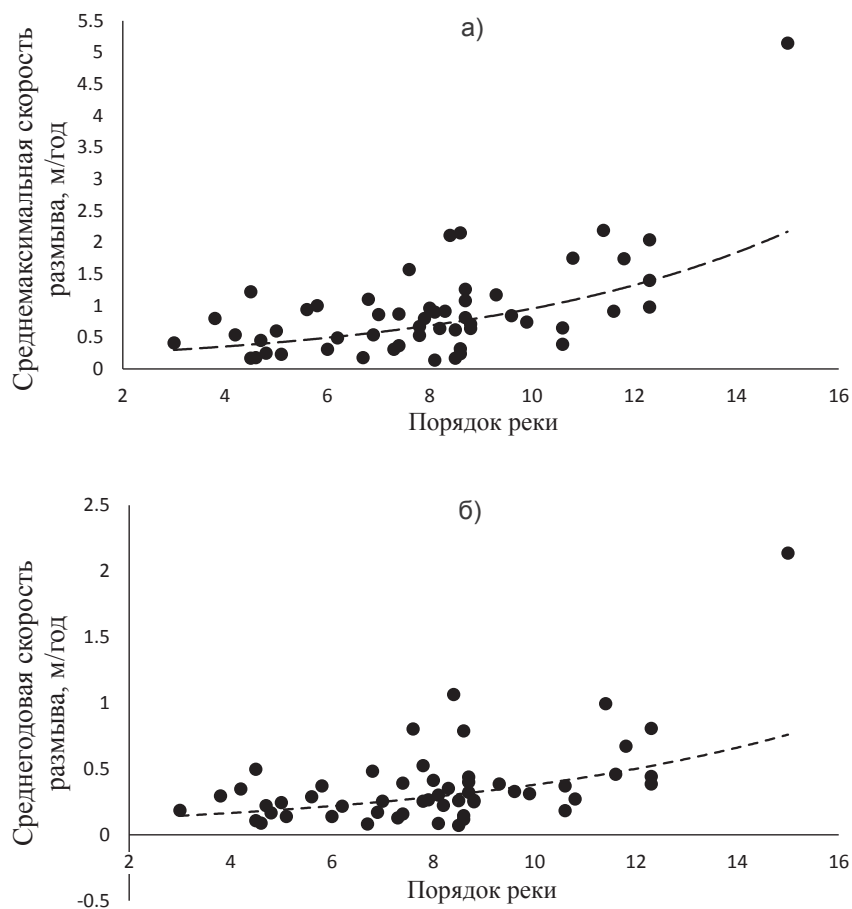


Рис. 2. Зависимость среднемаксимальных (а) и среднегодовых (б) скоростей размыва от порядка реки на территории Удмуртии за период 2000–2023 гг.

Fig. 2. The dependence of the average maximum (a) and average annual (б) erosion rates on the order of the river in the territory of Udmurtia for the period 2000–2023

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).

Все вышесказанное подтверждается и рассчитанными статистическими зависимостями между среднегодовыми и среднемаксимальными размывами, с одной стороны, и величиной порядка реки, с другой. Установлена криволинейная зависимость экспоненциального вида, поэтому наряду с обычным коэффициентом корреляции (r) были рассчитаны корреляционное отношение (η) и квадрат корреляционного отношения (η^2) по методике Г.Ф. Лакина (Лакин, 1990). На графике видно, что значения среднегодовых (V_{sr}) и среднемаксимальных (V_{max}) скоростей размыва берегов возрастают с увеличением порядка реки (рис. 2).

Коэффициенты корреляции между среднегодовыми размывами и порядком реки ($r = 0.54$; $\eta = 0.51$; $\eta^2 = 0.26$) указывают на достаточно тесную связь, что наглядно показывает и график (рис. 2а).

Показатели связи между среднемаксимальными размывами и порядком реки ($r = 0.59$; $\eta = 0.68$; $\eta^2 = 0.46$) также свидетельствуют о еще более существенной взаимосвязи (рис. 2б). Полученные зависимости описываются экспоненциальными уравнениями и близки к ранее полученным зависимостям (Petukhova, Rysin; 2006, Петухова, Рысин, 2006):

$$V_{sr} = 0.0951e^{0.139x} \text{ (рис. 2а),}$$

$$V_{max} = 0.1843e^{0.164x} \text{ (рис. 2б).}$$

Статистические показатели средних годовых и максимальных размывов на реперных участках за рассматриваемый период представлены в нижеследующих таблицах (табл. 1 и 2).

Анализ статистических данных показывает, что изменчивость величин размыва берегов рек относительно средней величины варьируется в значительных пределах. Коэффициенты вариации самые низкие у средних и больших рек, что, вероятно,

Таблица 1. Статистические показатели по среднегодовым размывам русел рек Удмуртии по реперным данным за период 2000–2023 гг.**Table 1.** Statistical indicators of average annual erosion of riverbeds in Udmurtia based on benchmark data for the period 2000–2023

Порядок реки	N^*	M	Max	Me	σ	E	A	Cv
6.0 и менее	264	0.24	3.15	0.15	0.001	41.3	5.07	1.21
6.1–9.0	591	0.31	3.05	0.20	0.001	13.9	3.18	1.22
9.1–14.0	210	0.44	3.1	0.30	0.002	7.97	2.34	1.02
14.1 и более	24	2.08	5.9	1.40	0.063	0.21	1.02	0.73
Все реки	1089	0.36	5.9	0.20	0.001	29.3	4.45	1.42

*Условные обозначения: N – количество показателей, M – среднее арифметическое, Max – максимальное значение, Me – медиана, σ – стандартная ошибка, E – эксцесс, A – асимметричность, Cv – коэффициент вариации.

Таблица 2. Статистические показатели по максимальным размывам русел рек Удмуртии по реперным данным за период 2000–2023 гг.**Table 2.** Statistical indicators of maximum erosion of riverbeds in Udmurtia based on benchmark data for the period 2000–2023

Порядок реки	N^*	M	Max	Me	σ	E	A	Cv
6.0 и менее	264	0.55	8.1	0.34	0.003	37.9	4.94	1.38
6.1–9.0	591	0.74	6.7	0.40	0.002	9.63	2.70	1.22
9.1–14.0	210	1.09	7.2	0.70	0.006	5.44	2.07	1.12
14.1 и более	24	4.93	15.0	3.03	0.191	–0.06	1.09	0.93
Все реки	1089	0.87	15.0	0.50	0.001	37.25	4.96	1.51

*Условные обозначения см. в табл. 1.

косвенно может указывать на их более высокую размывающую способность по сравнению с малыми водотоками. Значения медианы и среднего арифметического несильно отличаются друг от друга, при этом медиана во всех случаях меньше среднего, то есть совокупность крайне неоднородна и содержит экстремальные значения. Асимметрия во всех случаях положительна, для большинства рек преобладают высокие значения, что говорит о преобладании значений ниже среднего. Значения асимметрии, близкие к единице, отмечены только для рек с порядком более 14.1, следовательно, распределение значений размывов здесь мало отличается от нормального. По высоким положительным значениям эксцесса можно узнать, что графики распределения величин размывов по всем группам рек являются островершинными, за исключением максимальных размывов на реке с порядком более 14.1 (р. Вятка), здесь этот график – плосковершинный.

Анализ результатов реперных замеров за 24 года показал, что в настоящее время отмечается тенденция уменьшения скоростей береговых размывов

как для среднегодовых, так и для максимальных значений (рис. 3). Возможно, это связано с тем, что в последние годы снижается интенсивность половодного и паводочного стока на исследуемых реках, что не всегда подтверждается результатами тахеометрических съемок на отдельных реках и максимальными половодными расходами и уровнями, зарегистрированными на гидропостах. По другой версии, участки активного размыва, возможно, сместились за прошедшее время от мест с реперными наблюдениями на ниже расположенные излучины. О смещении максимальных участков размыва в сторону нижнего крыла излучины указывается, например, в наблюдениях на р. Керженец в Нижегородском Заволжье (Кораблева, Чернов, 2012, 2019).

По графикам видно, что они в общем виде имеют сходство, особенно в начале и в конце наблюдений. Если для среднегодовых значений размыва максимальные значения тяготеют к первой половине наблюдений (рис. 3А) и относятся к 2001 (0.53 м), 2006 (0.52 м), 2000 и 2010 гг. (0.49 м), то для

среднемаксимальных значений к перечисленным годам добавляется еще 2005 г. (1.31 м) (рис. 3б). В эти годы на большинстве рек, где ведутся гидрологические наблюдения, максимальные расходы половодья превышали многолетние среднегодовые от 6–13 раз (р. Чепца, Сива, Вала, Позимь и др.) до 32 (2000 г.) – 90 раз (2001 г.) на малой реке Адамке (левобережье нижней Вятки).

С другой стороны, и абсолютные минимумы расположены в левой части графика и относятся к 2004 г. В этот год на большинстве исследуемых рек наблюдались очень низкие расходы половодья, превышающие многолетние среднегодовые от 3.5 (р. Сива) до 5.7 раза (р. Позимь), а на р. Адамке в 15.4 раза, что является самым низким показателем по данной реке за имеющийся ряд наблюдений (1998–2018 гг.). На других реках анализируемый показатель варьировал в пределах 6–9 раз.

Совершенно иная картина наблюдается на самых малых реках с порядком водотоков от 6 и менее. На обоих графиках отчетливо выделяется хорошо выраженный отрицательный тренд. Если для среднегодовых значений максимумы характерны для 2011 (0.51 м) и 2003 (0.43 м) гг., то для среднемаксимальных значений максимум смещен на правую сторону графика и отмечен в 2018 г.

(1.67 м), при этом второй максимум совпадает с первым для средних значений и зарегистрирован в 2011 г. (1.34 м) (Рысин и др., 2024).

Для 28 малых рек (порядок 6.1–9.0) на графике среднегодовых размывов отрицательный тренд практически не заметен, показатели средних размывов варьируют близко к средним значениям. Минимальные значения характерны для левой части графика и зарегистрированы в 2004 (0.14 м) и 2009 гг. (0.17 м). Два одинаковых максимума наблюдались в 2006 и 2016 гг. (0.47 м), третий максимум отмечался в 2022 г. (0.44 м). Для среднемаксимальных размывов график существенно отличается, здесь отчетливо выражен отрицательный тренд. Максимальные значения отмечались в начале наблюдений – в 2001 (1.15 м) и 2006 гг. (1.17 м), а минимумы смещены в правую часть графика и отмечались в последние годы – в 2020 (0.41 м) и 2021 гг. (0.40 м).

Наблюдения на средних водотоках (порядок 9.1–14) осуществляются на 5 реках в пределах 12 участков. Оба графика имеют хорошо выраженный отрицательный тренд с соответствующими уравнениями. Максимальные значения среднегодовых размывов были отмечены в 2001 (0.75 м) и 2005 гг. (0.72 м), минимальные, соответственно, – в 2004,

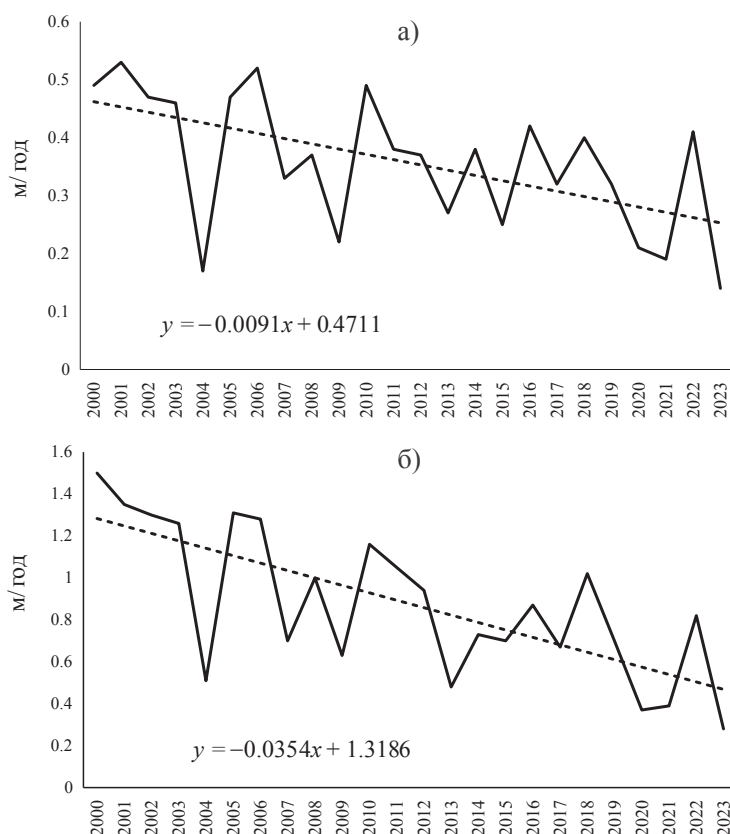


Рис. 3. Динамика среднегодовых (а) и среднемаксимальных (б) скоростей размыва (м/год) на реках Удмуртии за 2000–2023 гг. по данным реперных наблюдений

Fig. 3. Dynamics of average annual (a) and average maximum (б) erosion rates (m/year) on the rivers of Udmurtia for 2000–2023

2009 (0.18 м) и 2021 гг. (0.16 м). Для среднемаксимальных размывов минимальные значения наблюдались, как и для предыдущей группы рек, в последние годы — в 2020 (0.38 м) и 2021 гг. (0.42 м), максимумы были отмечены в 2005 (2.29 м) и 2010 гг. (1.64 м) (Рысин и др., 2024).

Графики среднегодовых и максимальных значений размыва за анализируемый период для р. Вятки на участке «Крымская Слудка» очень близки по характеру рисунка и имеют отчетливо выраженный отрицательный тренд. Наибольшие значения среднегодовых (5.9 м) и максимальных размывов (15 м) были зарегистрированы в 2005 г., как и для группы средних рек. Второй максимум значений для среднегодовых размывов был отмечен в 2010 г. (4.5 м), а для максимальных размывов, соответственно, в 2002 г. (14.2 м). Минимальные значения размывов были зафиксированы в 2015 г.: для среднегодовых значений — 0.35 м, а для максимальных — 0.6 м. Второй по величине минимум для среднегодовых размывов относится к 2013 г. (0.6 м), а для максимальных — к 2014 г. (1.0 м). В литературе описываются в основном средние многолетние размывы для крупных и крупнейших рек в пределах 10–15 м/год, но также есть сведения о боковых размывах до 200 м в год, а скорость смещения форм руслового рельефа может превышать 300 м (Попов, Кондитерева, 1974; Чалов Р.С. и др., 2016, 2017; Махинов и др., 2018).

Поскольку наблюдения за боковым размывом на самых малых водотоках ведутся на 14 реках, а гидрологический пост, где регулярно измеряются расходы и уровни, имеется лишь на одной р. Адамке (с. Грахово), то говорить о роли этих факторов, влияющих на величину размыва самых малых рек, будет необъективно. Так, например, для реки Адамки степень влияния максимальных расходов половодья на среднегодовые и среднемаксимальные размывы достоверно не установлена (рис. 4а).

Для малых рек статистически достоверная связь между максимальными скоростями размыва и максимальными расходами установлена для р. Лозы (лев. пр. р. Чепцы) на ключевом участке у пос. Игра (порядок реки 8.8), где имеется гидрологический пост с рядами наблюдений за 2002–2018 гг. Линейное уравнение и коэффициенты связи представлены на рис. 4б. Для данной реки выявлена также высокая положительная связь между среднегодовыми размывами и среднегодовыми расходами ($r = 0.59$; $R^2 = 0.348$). Статистически достоверная связь также установлена между среднегодовыми скоростями размыва и среднегодовыми расходами на р. Нылге (прав. пр. р. Валы) на участке близ с. Нылга, где также находится гидрологический

пост и имеется аналогичный ряд наблюдений. Связь в данном случае криволинейная и описывается экспоненциальным уравнением с существенными показателями связи ($r = 0.49$; $R^2 = 0.276$) (рис. 4в). Заметно ниже по значимости связь обнаружена между максимальными скоростями размыва и максимальными расходами на р. Сиве (прав. пр. р. Камы) на участке у с. Гавриловка (порядок 10.6), где находится гидропост с рядами наблюдений за 2000–2018 гг. Для данного участка также получено уравнение линейной связи и рассчитаны коэффициенты зависимости ($r = 0.36$; $R^2 = 0.129$) (рис. 4г). Выявлена невысокая, но достоверная положительная связь между максимальными скоростями размыва и максимальными расходами на р. Чепце (порядок 11.4) на участке у д. Каменное Заделье (рис. 4д). Расходы определялись по гидропосту в с. Полом за 2002–2018 гг. Достаточно надежная и существенная криволинейная связь установлена между среднегодовыми скоростями размыва и максимальными расходами на р. Чепце (порядок 12.3) на участке у д. Дизьмино по данным гидропоста в г. Глазове (2000–2018 гг.) (рис. 4е). Аналогичная зависимость была получена для данной реки между максимальными размывами и максимальными расходами ($r = 0.53$; $R^2 = 0.175$) (Рысин и др., 2024).

Для других участков рек, где ведутся регулярные гидрологические наблюдения (р. Вала, Лумпун, Позимь, Адамка), зависимость между вышеприведенными показателями достоверно не установлена. Обращает на себя внимание наличие для некоторых рек отрицательных связей между скоростями размыва и расходами, что можно объяснить действием более влиятельных факторов, таких как слабая размываемость отложений, интенсивное зарастание ранее размываемых участков, влияние хозяйственной деятельности (спуск или создание прудов, берегозащитные мероприятия и т. п.).

На большинстве исследуемых рек ежегодные инструментальные наблюдения продолжались до 2014 г., в последующие годы съемки проводились эпизодически, через 2–6 лет вследствие как организационных, так и финансовых возможностей (Рысин и др., 2020). Наиболее длительный ряд инструментальных наблюдений в настоящее время имеется лишь для рек Сивы (д. Метляки-1 и Метляки-2), Кыркмас (д. Тавзямал) и Вятки (с. Крымская Слудка).

Анализ многолетних (2003–2023 гг.) полевых инструментальных исследований размывов береговых уступов на реках Удмуртии показал, что скорости бокового смещения русел рек варьируют в большом диапазоне: от десятых долей до нескольких метров (8–17 м/год). Интенсивность

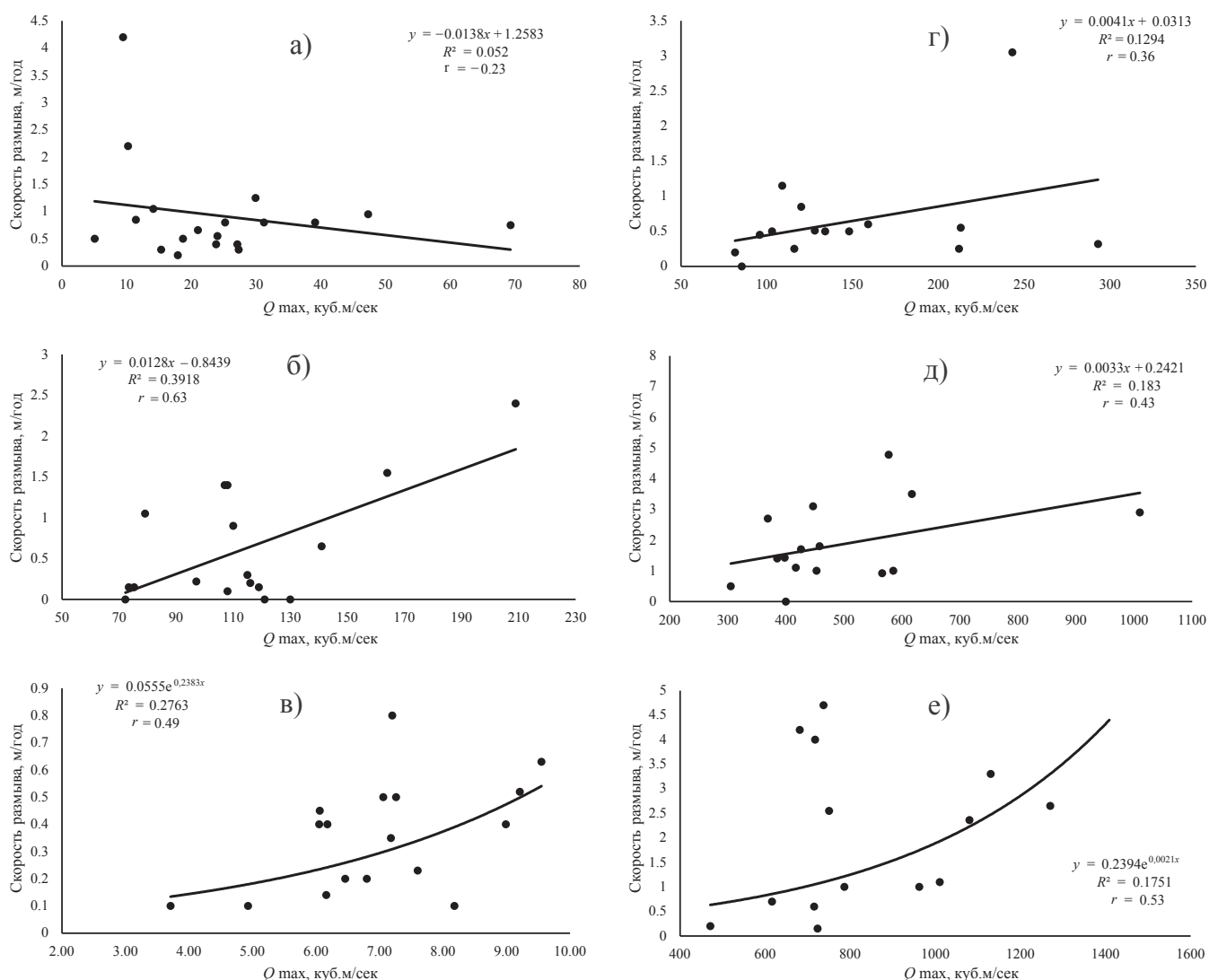


Рис. 4. Графики зависимости максимальных скоростей размыва от максимальных расходов на р. Адамке (с. Грахово) (а), максимальных скоростей размыва от максимальных расходов на р. Лозе (п. Игра) (б), среднегодовых скоростей размыва от среднегодовых расходов на р. Нылге (с. Нылга) (в), максимальных скоростей размыва от максимальных расходов на р. Сиве (с. Гавриловка) (г), максимальных скоростей размыва от максимальных расходов на р. Чепце (д. Каменное Заделье) (д) и среднегодовых скоростей размыва от максимальных расходов на р. Чепце (д. Дизмино) (е)

Fig. 4. Graphs of the dependence of the maximum erosion rates on the maximum costs of the Adamka river (Grakhovo village) (a), the maximum erosion rates on the maximum costs of the Loza river (Igra village) (б), the average annual erosion rates on the average annual costs of the Nylga river (Nylga village) (в), the maximum erosion rates on the maximum costs of Siva River (Gavrilovka village) (г), the maximum erosion rates from the maximum expenditures on the Cheptsra river (Kamennoye Zadelye village) (д) and the average annual erosion rates from the maximum expenditures on the Cheptsra river (Dizmino village) (е)

размыва в первую очередь зависит от водности реки, которая для удобства анализа определяется порядком водотока. Максимальные размывы характерны для реки с порядком 15 (р. Вятка на участке у с. Крымская Слудка), они достигают 16.9 (2005 г.) и 17.1 (2012 г.) м/год. Здесь суммарная средняя величина отступления стенки срыва

оползня за прошедший 21 год составила 42.2 м, а ее протяженность достигла 290 м.

Для средних рек (р. Вала, Чепца у с. Адам и Сива) максимальные значения ширины размыва достигают 5.96–6.15 м/год, а протяженность размываемых участков варьирует в пределах 115–533 м. Высота размываемого берегового

уступа изменяется от 3.5 м на р. Сиве до 5.6 м на р. Чепце. В пространственном отношении размываемые участки приурочены к участкам излучин с наибольшей крутизной или к мысовидным выступам. В многолетней динамике размывов на р. Чепце отчетливо прослеживается положительный тренд. Для р. Валы из-за больших перерывов в съемках после 2015 г. о каких-либо тенденциях в динамике судить невозможно. Участки на р. Сиве в отношении многолетней динамики размывов находятся в состоянии варьирования относительно средних значений.

Для малых рек (р. Кильмезь, Лумпун, Нылга, Кырыкмас и верхняя Чепца) наибольшие величины размыва изменяются в значительных пределах: от 2.26 м (р. Лумпун) до 8.14 м (р. Кырыкмас), следовательно, по максимальным значениям они даже превышают некоторые средние реки. Протяженность размываемых участков варьирует от 48–110 м на р. Лумпун и до 55–330 м на р. Нылга. Средняя высота размываемого уступа на указанных реках изменяется от 2.5 м (р. Нылга) до 6.8 м (р. Кырыкмас) и даже 8.8 м на р. Лумпун. Расположение размываемых участков в пределах различных типов излучин характеризуется локальными особенностями, но чаще они приурочены к участкам

с наибольшей крутизной. В каждом конкретном случае можно выделить несколько зон с различной интенсивностью размыва. В данной группе только для р. Кырыкмас, для которой отмечается лишь 2-летний перерыв в съемках, отчетливо выражен положительный (восходящий) тренд в динамике русловых размывов.

Установлена очень тесная связь между максимальной шириной размыва на р. Чепце (с. Адам) и максимальными годовыми расходами реки за период с 2004 по 2015 г., о чем свидетельствуют значимые коэффициенты корреляции ($r = 0.899$) (рис. 5а). Достаточно высокая связь получилась с площадью и объемом размыва за указанные годы ($r = 0.787$). На р. Сиве корреляционная связь между максимальной шириной размыва и максимальными годовыми расходами за указанный период оказалась чуть ниже ($r = 0.600$), но тоже существенная (рис. 5б). Показатель же связи с площадным и объемным размывами получился более значимым ($r = 0.794$). Корреляционная связь между названными показателями размыва и среднегодовыми расходами за указанный период на данных реках не установлена. Выявлению роли других важных факторов, определяющих интенсивность размыва берегов рек, будет посвящена отдельная статья.

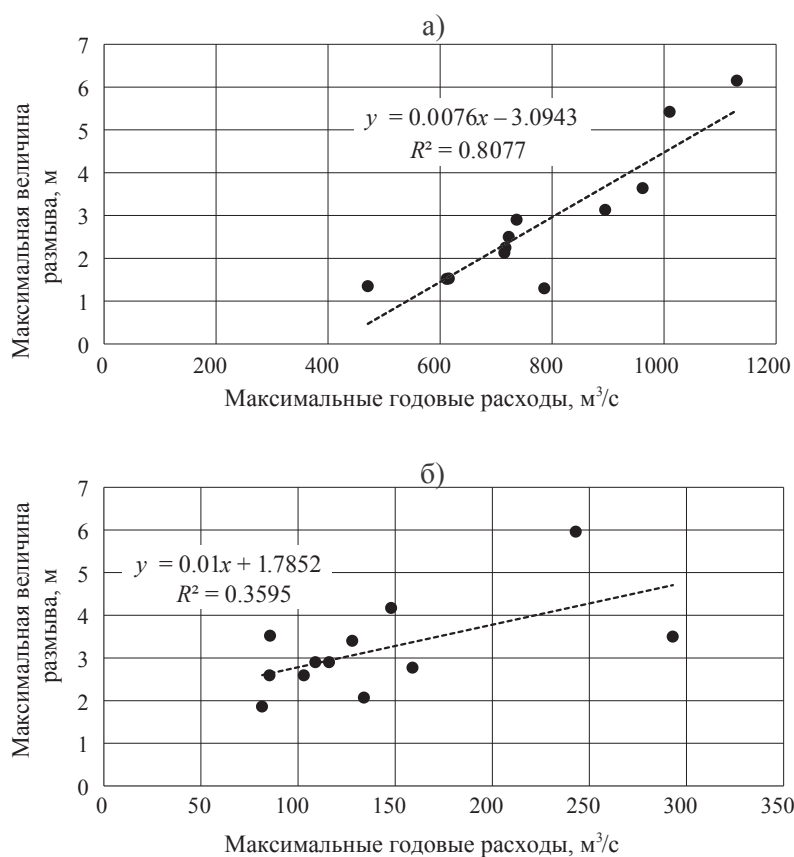


Рис. 5. Зависимость между максимальной шириной размыва на р. Чепце у с. Адам (а) и р. Сиве у д. Метляки (б) и их максимальными годовыми расходами за 2004–2015 гг.

Fig. 5. Dependence between the maximum scour width on the Cheptsya River near Adam village (а) and the Siva River near Metlyaki village (б) and their maximum annual discharges for 2004–2015

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ многолетних (2000–2023 гг.) полевых исследований горизонтальных русловых деформаций на реках Удмуртии показал, что скорости бокового смещения берегов варьируют в большом диапазоне: от нескольких сантиметров до многих метров. Интенсивность размыва в первую очередь зависит от водности реки, которая часто определяется порядком водотока. Максимальные размывы характерны для рек с порядком выше 14 (по схеме А. Шайдеггера), они достигают 12–17 м/год, а среднегодовые значения составляют 3–5 м/год. Для средних рек (с порядком 9.1–14) максимальные величины размыва составляют 6–8 м/год, а среднегодовые – 1–3 м/год. Для малых рек с порядком 6.1–9 максимальные размывы достигали 5.5 м/год, среднегодовые варьировали в пределах 0.4–0.6 м/год. На очень малых реках (порядок 6 и менее) максимальные скорости размыва берегов достигали 4.2 м/год в естественных условиях и 8.1 м/год при техногенном вмешательстве, среднегодовые величины размыва составляли обычно 0.1–0.3 м/год.

Установлена достаточно тесная связь между среднегодовыми размывами и порядком реки, о чем свидетельствуют значимые коэффициенты корреляции ($r = 0.54$; $\eta = 0.510$; $\eta^2 = 0.260$). Еще более высокой оказалась зависимость между среднемаксимальными размывами и порядком реки ($r = 0.59$; $\eta = 0.682$; $\eta^2 = 0.464$). Полученные значения зависимости описываются экспоненциальными уравнениями.

Временной анализ результатов реперных замеров за исследуемый период показал, что в настоящее время отмечается общая тенденция уменьшения скоростей берегового размыва как для среднегодовых, так и для максимальных значений. Наклоны линий тренда для разных групп рек различаются, но незначительно. Возможно, что это связано со снижением интенсивности половодного и паводочного стока на исследуемых реках. По другой версии, участки активного размыва, возможно, сместились за прошедшее время от мест с реперными наблюдениями, или же сказывается влияние других, не учтенных здесь факторов.

Несколько иная картина отмечается на отдельных участках с инструментальной съемкой. Так, например, в многолетней динамике размыва на р. Чепце (2 участка) и р. Кырыкмас отчетливо прослеживается положительный (восходящий) тренд с максимумами размыва в 2012–2014, 2019 и 2021 гг. Установлена очень тесная корреляционная

связь между максимальной шириной, площадью, объемом размыва на р. Чепце (с. Адам) и р. Сиве (д. Метляки) и максимальными годовыми расходами рек за период с 2004 по 2015 г. Расположение размываемых участков в пределах различных типов излучин характеризуется локальными особенностями, но чаще приурочено к участкам с наибольшей крутизной.

Для многих рек, где имеются гидрологические посты с регулярными наблюдениями за уровнями и расходами воды, получены достоверные значимые связи между скоростями размыва, с одной стороны, максимальными и среднегодовыми расходами, с другой. Коэффициенты корреляции изменяются от 0.36 (р. Сива) до 0.63 (р. Лоза). Для некоторых рек достоверные связи между анализируемыми показателями не выявлены.

Необходимость многолетних полевых исследований размыва береговых уступов рек с применением современных инструментальных методов определяется важностью выявления закономерностей русловых процессов для составления надежных прогнозов развития русловых деформаций в конкретных ландшафтно-геоморфологических условиях с целью предотвращения опасных геоэкологических ситуаций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20003, <https://rscf.ru/project/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.М. 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. С. 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. Вып. 1. С. 49–58.

Григорьев И.И., Рысин И.И. Применение геоинформационных систем при исследованиях техногенных и сельскохозяйственных оврагов в Удмуртии // Геоморфология. 2009. № 1. С. 69–75.

Григорьев И.И., Рысин И.И. Использование беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера) с применением цифровых технологий в географических исследованиях // Цифровая география — материалы Всерос. науч.-практ. конференции с междунар. участием (г. Пермь, 16–18 сентября 2020 г.): в 2 т. 2020. Т. 1: Цифровые и геоинформационные технологии в изучении природных процессов в экологии, природопользовании и гидрометеорологии. С. 54–57.

Джуха И.Г., Чалов Р.С. Морфология и динамика русла р. Юг как пример руслоформирующей деятельности малой реки. Геоморфология. 1989. № 1. С. 83–91.

Завадский А.С., Чалов Р.С. Региональный анализ свободного меандрирования. Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1997. № 3. С. 32–36.

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 // Эрозионные и русловые процессы: Сборник трудов / Под ред. Чалова Р.С. М.: МАКС Пресс. 2010. Вып. 5. С. 220–251.

Кораблева О.В., Чернов А.В. Динамика пойменно-русловых комплексов рек Нижегородского Заволжья (на примере реки Керженец). Труды Государственного природного биосферного заповедника «Керженский». Нижний Новгород: Изд-во «Государственный природный биосферный заповедник «Керженский». 2012. Т. 5. 196 с.

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.

Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа. 1990. 352 с.

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 347 с.

Махинов А.Н., Ким В.И., Аношкин А.В. и др. Преобразование локальных пойменно-русловых систем рек Амур и Уссури как фактор возникновения трансграничных проблем. Региональные проблемы. 2018. Т. 21. № 2. С. 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.

Павлов И.Н. Морфология русел рек равнинной части Алтайского края. Геоморфология. 1994. № 3. С. 78–85.

Петухова Л.Н., Рысин И.И. Факторы русловых процессов и их влияние на морфодинамику русел рек Удмуртии. Геоморфология. 2006. № 4. С. 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. Тр. ГГИ. 1974. № 216. С. 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., Андреев О.Н. Результаты многолетних исследований русловых размывов на реках Удмуртии // Эрозионные и русловые процессы. 2020. Вып. 7. Сборник трудов / Под ред. Р.С. Чалова. М.: Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. С. 269–280.

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. № 1. С. 24–37.

Спиридонов А.И. Основы общей методики полевых геоморфологических исследований и геоморфологического картографирования. М.: Высшая школа. 1970. 456 с.

Чалов Р.С. Морфодинамика русел равнинных рек / Р.С. Чалов, А.М. Алабян, В.В. Иванов, Р.В. Лодина, А.В. Панин. 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. С. 22–35.

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

Чалов Р.С., Чернов А.В., Беркович К.М. и др. География проявления русловых процессов на реках России // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149. Вып. 4. С. 13–33.

Чалов С.Р. Речные наносы в эрозионно-русловых системах. Автореф. дисс. ... докт. геогр. наук. М.: МГУ. 2021. 50 с.

Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. М.: ООО «Крона». 2009. 614 с.

Шайдеггер А.Е. Теоретическая геоморфология. М.: Прогресс, 1964. 450 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. (1998) Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. London: Arnold. 383 p. <http://dx.doi.org/10.4324/9780203784662>

Petukhova L.N., Rysin I.I. (2006) 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. P. 119–131.

Robert A. (2003) River processes: an introduction to fluvial dynamics. London: Arnold. 214 p.

ОБ АВТОРАХ

Рысин Иван Иванович, докт. геогр. наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет» (ФГБОУ ВО «УдГУ»), E-mail: rysin.iwan@yandex.ru. Тел.: 8 (3412) 916-433

Григорьев Иван Иванович, канд. геогр. наук, доцент. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет» (ФГБОУ ВО «УдГУ»). E-mail: ivangrig@yandex.ru, Тел. моб.: 8 (905) 877-33-32

Петухова Лариса Николаевна, канд. геогр. наук, доцент. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет» (ФГБОУ ВО «УдГУ»). E-mail: petlar75@mail.ru. Тел. моб.: 8 (905) 876-15-48

HORIZONTAL CHANNEL EROSION ON THE RIVERS OF UDMURTIA

I.I. Rysin*, I.I. Grigorev**, L.N. Petukhova***

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

* *rysin.iwan@yandex.ru*, ** *ivangrig@yandex.ru*, *** *petlar75@mail.ru*

Abstract. The results of a study of channel displacement for 2000–2022 in 55 key areas located on rivers of different orders, flowing in different landscapes of Udmurtia, are presented. The erosion rates were determined using benchmarks and tacheometric survey. To analyze the obtained results, the rivers were divided into 4 groups according to the magnitude of their orders (according to the method of A. Scheidegger). Maximum erosion is typical for rivers with an order higher than 14 (up to 15 m/year), for medium rivers with an order of 9–14 these values are 6–8 m/year. For small rivers with an order of 6–9, the maximum erosion reached 5.5 m/year, and for very small rivers (of order 6 or less), respectively, up to 4.2 m/year under natural conditions and up to 8.1 m/year at man-made intervention. Statistical indicators of the average annual and maximum erosion in the reference areas for the period under consideration were obtained. Correlation analysis showed a high significant relationship between the erosion rate and the order of the river and, accordingly, the average annual and maximum discharges. An analysis of erosion over a 23-year time interval is given with the definition of the trend equation for the selected groups of rivers.

Key words: river erosion rate, benchmarks, monitoring, correlation analysis, Udmurt Republic

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 25-27-20003, <https://rscf.ru/project/25-27-20003>

REFERENCES

Antropovskij V.I. (2006) Hidrologo-morfologicheskie zakonomernosti i fonovy'e prognozy' pereformirovaniya rusel rek. SPb. 216 s. (in Russ.)

- Atlas Udmurtskoj Respubliki (2020) / pod obshhej red. I.I. Rysina. Izd. 2-e, dop. i pererab. M.: Feorija; Izhevsk: Udmurtija. 288 s. (in Russ.)
- Berkovich K.M. (2001) Geograficheskij analiz antropogennyh izmenenij ruslovyh processov. M.: GEOS. 164 s. (in Russ.)
- Gafurov A.M., Rysin I.I., Golosov V.N., Grigoriev I.I., Sharifullin A.G. (2018) Ocenka sovremennogo rosta vershin ovragov yuzhnogo megasklona Vostochno-Evropejskoj ravniny s primeneniem nabora instrumental'nyh metodov // Vestnik Mosk. un-ta, Ser. 5. Geografiya. № 5. S 61 - 71. (in Russ.)
- Grigoriev I.I., Rysin I.I. (2008) Issledovaniya tekhnogennyh i sel'skoxozyajstvennyh ovragov v Udmurtii s primeneniem GIS-tekhnologij // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle. Vyp. 1. S. 49–58. (in Russ.)
- Grigoriev I. I., Rysin I. I. (2009) Primenenie geoinformacionnyh sistem pri issledovaniyakh tekhnogennyh i sel'skoxozyajstvennyh ovragov v Udmurtii // Geomorfologiya. № 1. S. 69–75. (in Russ.)
- Grigoriev I.I., Rysin I.I. (2020) Ispol'zovanie bespilotnogo letatel'nogo apparata (kvadrokoptera) s primeneniem cifrovyyh tekhnologij v geograficheskix issledovaniyakh // Cifrovaya geografiya — materialy Vseros. nauch.-prakt. konferencii s mezhdunar. uchastiem (g. Perm, 16–18 sentyabrya 2020 g.): v 2 t. T. 1: Cifrovye i geoinformacionnye tekhnologii v izuchenii prirodnyh processov v ekologii, prirodoopol'zovanii i gidrometeorologii. S. 54 – 57. (in Russ.)
- Dzhuha I.G., Chalov R.S. (1989) Morfologiya i dinamika rusla r. Jug kak primer rus-loformirujushhej dejatel'nosti maloj reki. Geomorfologiya. № 1. S. 83– 91. (in Russ.)
- Zavadskij A.S., Chalov R.S. (1997) Regional'nyj analiz svobodnogo meandrirovaniya. Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya. № 3. S. 32 – 36. (in Russ.)
- Korableva O.V., Chernov A.V. (2012) Dinamika pojmenno-ruslovyh kompleksov rek Ni-zhegorodskogo Zavolzh'ja (na primere reki Kerzhenev). Trudy Gosudarstvennogo prirodno-go biosfernogo zapovednika «Kerzhenskij». Nizhnij Novgorod: Izd-vo: «Gosudarstvennyj prirodnyj biosfernyj zapovednik «Kerzhenskij». T.5. 196 s. (in Russ.)
- Korableva O.V., Chernov A.V. (2019) Sovremennaja dinamika pojmenno-ruslovyh kompleksov srednej reki Kerzhenev (po monitoringovym nabljudenijam 2001–2018 gg.) V sb.: Nauchnye problemy ozdorovleniya Rossijskix rek i puti ih reshenija. M.: IVP RAN. S. 172-176. (in Russ.)
- Lakin G.F. (1990) Biometrija. M.: Vysshaja shkola. 352 s. (in Russ.)
- Makkaveev N.I. (1955) Ruslo reki i jerozija v ee bassejne. M.: Izd-vo AN SSSR. 347 s. (in Russ.)
- Makhinov A.N., Kim V.I., Anoshkin A.V. et al. (2018) Preobrazovanie lokal'nyh pojmenno-ruslovyh sistem rek Amur i Ussuri kak faktor vzniknovenija transgranichnyh problem. Regional'nye problemy. T. 21. № 2. S. 61–68. (in Russ.)
- Mozzherin V.I., Kurbanova S.G. (2004) Dejatel'nost' cheloveka i jerozionno-ruslovye sistemy Srednego Povolzh'ja. Kazan': Art. Dizajn. 128 s. (in Russ.)
- Nazarov N.N., Egorkina S.S. (2004) Reki Permskogo Prikam'ja: Gorizonta'nye ruslovye deformacii. Perm': IPK «Zvezda». 155 s. (in Russ.)
- Pavlov I.N. (1994) Morfologija rusel rek ravninnoj chasti Altajskogo kraja. Geomorfologija. № 3. S. 78–85. (in Russ.)
- Petukhova L.N., Rysin I.I. (2006) Faktory ruslovyh processov i ih vlijanie na morfodinamiku rusel rek Udmurtii. Geomorfologija. № 4. S. 70–78. (in Russ.)
- Popov I.V., Konditerova Je.A. (1974) Prognoz ruslovyh deformacij Volgi na uchastke Saral'jovskogo vodnogo uzla v svjazi s proektirovaniem uluchsheniya ego sudohodnyh uslovij. Tr. GGI. № 216. S. 65–93. (in Russ.)
- Rysin I.I., Petukhova L.N. (2006) Ruslovye processy na rekah Udmurtii. Izhevsk: Associacija «Nauchnaja kniga». 176 s. (in Russ.)
- Rysin I.I., Grigoriev I.I., Petukhova L.N., Andreev O.N. (2020) Rezul'taty mnogoletnix issledovanij ruslovyh razmyvov na rekah Udmurtii // Erozionnye i ruslovye processy. Vyp. 7. Sbornik trudov / pod red. R.S. Chalova. M.: Geograficheskij fakul'tet MGU imeni M.V. Lomonosova. S. 269 – 280. (in Russ.)
- Rysin I.I., Grigoriev I.I., Petukhova L.N., Perevoshikov A.A. (2024) Mnogoletnyaya dinamika skorostej gorizonta'lnyx ruslovyh razmyvov na rekah Udmurtii // Geomorfologiya i paleogeografiya. № 1. S. 24 – 37.
- Spiridonov A.I. (1970) Osnovy obshej metodiki polevyh geomorfologicheskix issledovanij i geomorfologicheskogo kartografirovaniya. M.: Vysshaja shkola. 456 s. (in Russ.)
- Chalov R.S. (1998) Morfodinamika rusel ravninnyh rek. / R.S. Chalov, A.M. Alabjan, V.V. Ivanov, R.V. Lodina, A.V. Panin. M.: GEOS. 288 s. (in Russ.)
- Chalov R.S. (2008) Ruslovedenie: teorija, geografiya, praktika. Tom 1. Ruslovye processy: faktory, mehanizmy, formy projavlenija i uslovija formirovaniya rechnyx rusel. M.: Izd-vo LKI. 608 s. (in Russ.)
- Chalov R.S. (2011) Ruslovedenie: teorija, geografiya, praktika. Tom 2. Morfodinamika rechnyx rusel. M.: KRASAND. 960 s. (in Russ.)
- Chalov R.S., Zavadskij A.S., Ruleva S.N. et al. (2016) Morfologija, deformacii, sovremennye izmeneniya rusla r. Leny i ih vlijanie na hozjajstvennuju infrastrukturu v rajone g. Jakutska. Geomorfologija. № 3. S. 22 – 35. (in Russ.)

Chalov R.S., Zavadskij A.S., Panin A.V. (2004) *Rechnye izluchiny*. M.: Iz-vo MGU, 2004. 371 s.

Chalov R.S., Chernov A.V., Berkovich K.M. et al. (2017) Geografija projavlenija ruslovyh processov na rekah Rossii. *Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva*. T. 149. Vyp. 4. S. 13–33. (in Russ.)

Chalov S.R. (2021) *Rechnye nanosy v jerozionno-ruslovyh sistemah*. Avtoref. diss. ... dokt. geogr. nauk. M.: MGU. 50 s. (in Russ.)

Chernov A.V. (2009) *Geografija i geojekologicheskoe sostojanie rusel i pojm rek Severnoj Evrazii*. M.: ООО «Krona». 614 s. (in Russ.)

Shajdegger A.E. (1964) *Teoreticheskaja geomorfologija*. M.: Progress, 1964. 450 s. (in Russ.)

Jerozionno-ruslovyje sistemy: monografija (2017) / Pod red. R.S. Chalova, V.N. Golosova, A.Ju. Sidorchuka. M.: INFRA-M. 702 s. (in Russ.)

Knighton A.D. (1998) *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. London: Arnold. 383 p. <http://dx.doi.org/10.4324/9780203784662>

Petukhova, L.N., Rysin I.I. (2006) 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. P. 119–131.

Robert A. (2003) *River processes: an introduction to fluvial dynamics*. London: Arnold. 214 p.

ABOUT THE AUTHORS

Rysin Ivan Ivanovich, professor. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Udmurt State University” (FSBEI of Higher Education “UdGU”). E-mail: rysin.iwan@yandex.ru. Тел. моб: 8 (919) 917-90-63

Grigorev Ivan Ivanovich, P.h.D. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Udmurt State University” (FSBEI of Higher Education “UdGU”). E-mail: ivangrig@yandex.ru. Tel.: 8 (905) 877-33-32

Petukhova Larisa Nikolaevna, P.h.D. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Udmurt State University” (FSBEI of Higher Education “UdGU”). E-mail: petlar75@mail.ru. Tel.: 8 (905) 876-15-48