

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.537

ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ РУСЕЛ РЕК И ДЕФОРМАЦИЙ ФОРМ РУСЛОВОГО РЕЛЬЕФА

© 2025 г. Н. М. Михайлова*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**e-mail: nmmikhailova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 09.04.2024 г.

После доработки 11.03.2025 г.

Принята к публикации 31.03.2025 г.

Статья посвящена выявлению взаимосвязей плановых (горизонтальных) деформаций русел рек (слабоустойчивых и неустойчивых, равнинных и полугорных) и форм руслового рельефа, их морфологии и динамики. Горизонтальные деформации рассматриваемых участков рек определены по спутниковым снимкам за разные периоды времени — самые ранние — с 1968 г. Оценка динамики и деформаций форм руслового рельефа выполнены по сопоставленным разновременным лоцманским картам начиная с 1940–1960-х годов по настоящее время и планам русел рек в изобатах. Рассмотрены факторы, влияющие на горизонтальные деформации и поступление наносов в русло, дана количественная оценка объема наносов различной крупности, попадающих в русло в результате размыва берегов на равнинных (на примере средней Оби) и полугорных (на примере Кубани) реках. Например, для полугорных рек руслообразующими наносами становятся 40–60% объема материала размываемых берегов. Выявлена связь скоростей размыва оголовков островов (преимущественно одиночных разветвлений) и берега этих островов со стороны рукавов. Получены прямые зависимости угла подхода потока к берегу и темпов размыва последнего при направляющем воздействии перекатов в неустойчивом русле (р. Ганг). Эти зависимости имеют единую направленность, однако различаются в разные годы. Приведены примеры как влияния форм руслового рельефа на размывы берегов, так и влияния размывов на морфологию и динамику форм руслового рельефа. Показано, что при однозначной взаимосвязи преобладающим является какой-то один фактор или их чередование во времени — либо размыв берега, либо динамика форм руслового. Редко такое взаимодействие проявляется в равной степени, например, на участке р. Оби выше впадения р. Томи. Приведен пример прогнозных оценок деформаций русел на основе подробного анализа взаимосвязанных процессов размыва берегов, изменения морфологии и динамики макроформ руслового рельефа (перекатов).

Ключевые слова: русловые процессы, размывы берегов, деформации русел рек, русловой рельеф, деформации перекатов

DOI: 10.7868/S2658697525030058

ВВЕДЕНИЕ

Горизонтальные деформации русла являются комплексом взаимосвязанных процессов, включающим в себя как размыв берегов, так и аккумуляцию наносов. В отечественной и зарубежной литературе на протяжении многих лет горизонтальным деформациям уделяется большое внимание (Беркович, 2019; Беркович, Власов, 1982; Беркович и др., 2000; Попов, 1974; Чалов и др., 2022; и др.). В последние годы, когда для анализа деформаций русел стали доступны космические снимки и съемка БПЛА, возросло внимание к количественной оценке отступления берегов (Воробьев и др., 2023; Чалов и др., 2022;

Duró et al., 2018). Формированию и режиму форм руслового рельефа (в большей степени перекатам) также уделяется большое внимание, особенно в контексте влияния на условия судоходства и поиска оптимальных решений для их улучшения на судоходных реках со слабоустойчивым руслом (Беркович и др., 2000; Маккавеев, 1949, 1955; Проектирование ..., 1964; Чалов, 2011). Значительно реже рассматривается взаимосвязь движения, деформаций грядовых макроформ (перекатов) и горизонтальных деформаций — размыва берегов (Маккавеев, 1955; Попов, 1977; Чалов и др., 2021; Klösch et al., 2015; и др.).

Размывы берегов (боковая эрозия) возникают при воздействии потока на берега, приводя к их отступанию (Чалов, 2022). Размытый материал, поступая в русло, частично переносится потоком во взвешенном или влекомом состоянии, а частично откладывается (аккумулируется) в русле и вдоль берегов, способствуя обмелению перекатов, формированию осередков, росту кос, островов, побочней, пойменных массивов. Одновременная с размывом аккумуляция наносов у противоположного берега приводит к формированию прирусловой отмели, вызывая стеснение потока и искривление его стрежня; происходит схождение струй потока возле подмываемого берега, что увеличивает темпы его размыва (Чалов, 2011). Формирование зон размывов берегов зависит от того, какими отложениями сложены их уступы, и устойчивости последних к размыву. К гидрологическим и гидравлическим факторам относятся неравномерность внутригодового распределения стока, его перераспределение в разные фазы водного режима (если русло разветвленное), распределение и трансформация скоростного поля потока, угол подхода потока к берегу, а также смещение макроформ руслового рельефа, оказывающих направляющее воздействие на поток.

Сам размыв берега представляет собой сложный процесс, состоящий как из прямого воздействия потока, вызывающего отрыв частиц береговых отложений, так и гравитационных процессов: обрушение, осыпание и оползание верхней части берегового уступа в результате подмыва его нижней части (в тех случаях, когда воздействие потока не охватывает всю высоту уступа). Неравномерность разрушения берега по длине фронта размыва связана с неоднородным по высоте строением берегового уступа, различными уровнями воды в реке, наличием выхода грунтовых вод, присутствием и характером растительности, которая защищает берег от размыва и т.п. (Чалов, 2011).

На равнинных реках размывы берегов или горизонтальные деформации происходят при постоянном (неизменном год от года) воздействии потока на одни и те же участки берега, в то время как на полугорных реках деформации берегов могут быть периодическими (с перерывами в несколько лет, что зависит от ряда факторов, в том числе водности) при воздействии потока на определенные участки берега (Михайлова и др., 2023). Периодичность горизонтальных деформаций особенно характерна для участков русла с аллювиальными полями.

В результате размыва берегов в русло поступает большое количество наносов, которые влияют на деформации перекатов. Изменение геометрии

берега вызывает изменение положения переката в русле, и, как следствие, — изменение его морфологии. В свою очередь перекаты оказывают направляющее воздействие на поток, что в большей или меньшей степени влияет на размывы берегов.

Цель работы — показать различную степень выраженности данной взаимосвязи на разных реках (равнинных и полугорных, со слабоустойчивым и неустойчивым руслом).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка взаимного влияния горизонтальных деформаций, и изменений форм руслового рельефа выполнены для участков равнинных рек — Северной Двины, Оби, Пура, Надыма, Волги, Ганга и др., а также для полугорных и равнинных участков наиболее крупных рек бассейна р. Кубани, подверженных интенсивным деформациям.

Анализ горизонтальных деформаций проведен по сопоставленным спутниковым снимкам за разные периоды. В качестве самых ранних использованы монохромные снимки KEYHOLE начиная с 1968 г., сделанные в рамках американской программы “Согон” с пространственным разрешением 0.6, 1.8, 2.7 м. За более поздние годы использованы снимки Landsat разных серий, охватывающие период с 1972 г. по настоящее время, имеющие разрешение 15–30 м (выявление участков деформаций крупнейших рек), и Sentinel-2 (проект Европейского космического агентства (ESA)) с разрешением 10 м, запущенные в 2015 и 2017 гг. Также в качестве современных использованы снимки высокого разрешения Airbus с разрешением 0.3–1.5 м и MAXAR с разрешением 0.15–0.3 м, в том числе предоставленные “Геопорталом МГУ”. Использовались спутниковые снимки, сделанные в меженьный период, которые, по возможности, подбирались таким образом, чтобы отражать состояние реки при одинаковой водности (Михайлова, 2019). Дополнительные данные о горизонтальных деформациях получены при проведении полевых изысканий, а также в процессе ежегодных стационарных наблюдений с использованием геодезической съемки или ортофотопланов.

При количественной оценке горизонтальных деформаций определялись скорости размыва берега: средняя (за весь рассматриваемый период), средняя максимальная (осредненные наибольшие ежегодные значения за весь рассматриваемый период) и максимальная (наибольшая наблюдавшаяся); также оценивались протяженность фронта размыва и его смещение, изменение протяженности, смещение участка с максимальным размывом, площадь размыва

участка берега. При наличии информации о высоте берега и составе отложений береговых уступов определялся общий объем смытой в русло части берега и объем каждого типа отложений, попадающих в русло.

Определение средних и среднемаксимальных многолетних скоростей отступления берега при постоянном (однаправленном) размыве берегов производилось сопоставлением снимков с большим временным интервалом между съемками, который мог составлять более 10 лет (вплоть до 50–60 лет). В данной работе под постоянным размывом берега понимается ежегодный размыв одного и того же участка берега в течение длительного (десяtkи лет и более) периода времени на равнинных реках со слабоустойчивым руслом [степень устойчивости приведена согласно классификации (Чалов, 1997)]. Соответственно под периодическими размывами берегов понимается не ежегодный размыв участка берега в связи с миграцией потока и его отходом к противоположному берегу. Для участков с периодическими (нерегулярными и разнонаправленными) размывами берегов на неустойчивых участках русел, например, на полугорных реках, где положение одного и того же участка берега может в разной степени меняться после каждого паводка или оставаться стабильным при блуждании потока, сопоставлялись спутниковые снимки за короткие промежутки времени, начиная от одного года. Определение темпов максимальных горизонтальных деформаций произведено по максимально близким по времени снимкам, сделанным до и после периода максимальной водности (половодья или паводка). На равнинных реках со слабоустойчивым руслом минимальный временной интервал как правило составляет один год, на реках с неустойчивым и абсолютно неустойчивым руслом за минимальный принимался интервал до и после каждого паводка.

Предельное минимальное разрешение спутниковых снимков определялось размером реки, выбранным временным интервалом между съемками, скоростью отступления берега, нали-

чием или отсутствием направленных русловых деформаций (Михайлова, 2023).

Оценка динамики и деформаций форм руслового рельефа разных рек выполнены с использованием разновременных лоцманских карт (начиная с 1940–1960-х годов по настоящее время) и планов русел рек в изобатах в масштабе 1 : 5000 или 1 : 10000 (начиная с 2000-х годов).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наносы, поступающие в русло в результате размыва берегов, в зависимости от крупности и транспортирующей способности потока переносятся либо во взвешенном состоянии (и тогда по мере спада уровня и/или уменьшения уклонов оседают), либо из-за большой крупности сразу переходят в состав влекомых. Так, например, на одном из стационаров полугорного участка р. Кубани (у хутора Маковского), где несколько раз в год проводятся мониторинговые наблюдения за деформациями русла, береговой уступ состоит из слоев пойменных отложений различной крупности. Попадая в воду в результате размыва берега, часть этих отложений (в среднем около 40–50% наименее крупных и легких – лёссовидные суглинки, почвы и пески) в период паводков сразу уносятся со стационарного участка вниз по течению в виде взвеси, тогда как крупные (галька и валуны) становятся русловым аллювием, оставшимся на участке, и транспортируются потоком во влекомом состоянии (табл. 1). В разные годы объем поступающего в русло от размыва берегов материала изменяется в зависимости от водности паводков, их количества и продолжительности.

На средней Оби (наиболее подробно рассматривался участок выше впадения р. Томи) большая часть пойменных размываемых берегов и островов сложены преимущественно песками (от пылеватого до среднего – в среднем 50–80%), которые, попадая в русло, (в зависимости от фазы водного режима), при сравнительно небольших уклонах в основном становятся руслообразующими и являются материалом для

Таблица 1. Объем поступающего в русло материала размыва верхних слоев берегов на стационаре р. Кубани

Период	Максимальное отступление берега, м	Объем размытого материала, м ³	Объем почв и лёссов, м ³	Объем песка, м ³
2021–2022	10	3450	1650	375
2019–2020	7.7	2381	1139	259
2018–2019	4.7	2302	1101	250
2017–2018	2.7	1587	759	173
2016–2017	11	1817	869	198
2015–2016	18	5426	2595	590

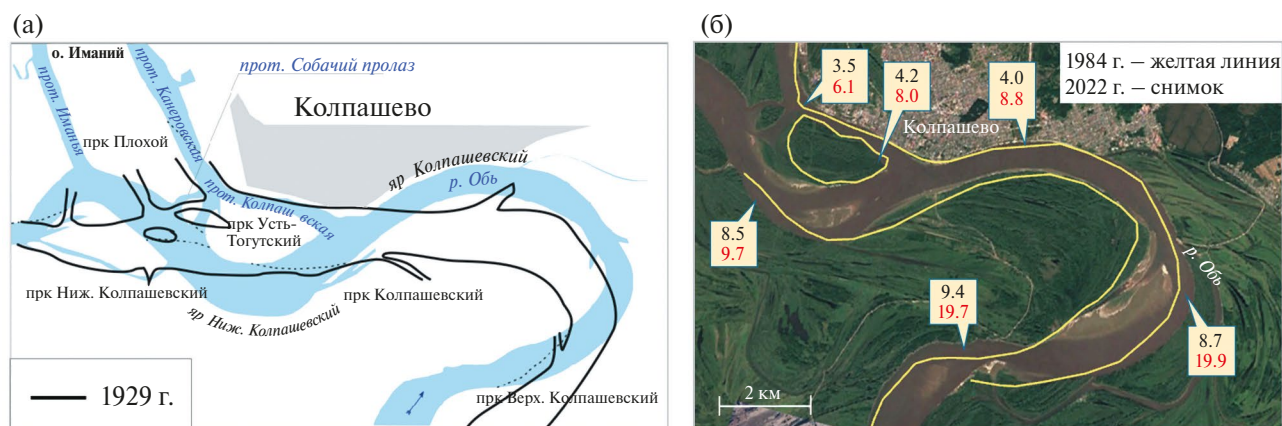


Рис. 1. Плановые русловые деформации Оби в районе г. Колпашево: (а) сопоставленные планы русла Оби по лоцманским картам за 1929 и 2022 гг.; (б) положение русла в 1984 г. на спутниковом снимке 2022 г.

Примечание: прк — перекат; средние — черные цифры, средние максимальные — красные цифры (темпы размыва берега в указанном месте).

формирования грядовых форм руслового рельефа, транспортируемых во влекомом состоянии или в форме гряд. При интенсивном размыве таких берегов в русло поступает большое количество наносов, в результате чего увеличивается объем форм руслового рельефа и изменяется их морфология. Так на Оби у г. Колпашево (Томская область) горизонтальные деформации, связанные с размывом правого вогнутого берега Колпашевской излучины (Колпашевского яра), привели к поступлению в русло большого количества песчаного материала. Изменение морфометрии русла в результате формирования и развития острова верхнего звена Канеровского разветвления и дальнейшие горизонтальные деформации в левом рукаве этого разветвления вызвали сначала формирование здесь Колпашевских перекатов, а затем их сильное обмеление, сопровождавшееся изменением морфологии — формированием осередка (рис. 1). В результате объем направленной аккумуляции наносов на перекатах (8.5 млн м³ за период 2009–2020 гг.) стал соизмерим с объемом наносов, поступающих от размыва берегов выше по течению. Похожая ситуация до 2012 г. развивалась в Черевковском разветвлении на Северной Двине, где в результате горизонтальных деформаций русла и поступления большого объема наносов на этот участок, происходила направленная аккумуляция в левом рукаве разветвления, что запустило цепочку событий: изменение морфологии перекатов в этом рукаве, их дальнейшее обмеление, смена водности рукавов и формирование перекатов в развивающихся рукавах.

Увеличение ширины русла или рукава разветвления в результате размыва берегов приводит к отвлечению части стока в этот рукав. После расширения рукава сначала происходит его

углубление, затем формирование и увеличение грядовых форм руслового рельефа, за счет чего снова уменьшаются глубины. В качестве одного из многочисленных примеров можно привести участок на нижней Волге в верхнем звене Саралевского разветвления, где размыв оголовка острова привел к развитию рукава (рис. 2). С 2016 г. скорость размыва острова (более 20 м ежегодно) стала превышать скорость роста косы у противоположного берега, что привело к увеличению ширины меженного русла в протоке сначала с 115 м до 150, затем (к 2021 г.) до 200 м. Из-за увеличившегося стока воды, в протоке увеличилась глубина. В течение последующего года (2021–2022 гг.) берег отступил еще на 50–70 м по всему фронту размыва, что поспособствовало увеличению ширины до 230 м и увеличению грядовых форм руслового рельефа.

Основные факторы, влияющие на темпы горизонтальных деформаций — условия формирования русел рек и их водный режим. Однако не менее важную роль играют и другие факторы, например, макроформы руслового рельефа — перекаты, расположение и многолетняя динамика которых непосредственно определяют участки размыва береговой линии и места снижения транспортирующей способности водного потока, где осаждаются вымытые и переносимые им наносы. В зависимости от размера гряд фронты размыва берегов могут иметь длину от нескольких метров до нескольких километров (Чалов, 2011). Со смещением перекатов, а также положения динамической оси потока на перекате, смещается зона воздействия потока на береговой уступ, и, следовательно, изменяется положение места максимального размыва или фронта размыва в целом. Замедление перемещения русловых форм при непрочных берегах приводит к усилению горизонтальных деформаций (Беркович, 1992).

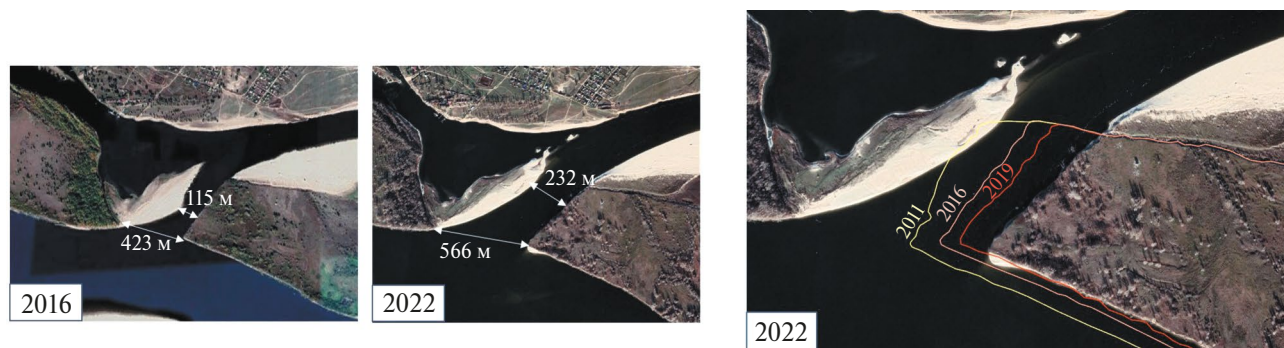


Рис. 2. Развитие рукава в верхнем звене Саралевского разветвления, р. Волга.

Таким образом, формируется или увеличивается вогнутость берегов и извилистость рукавов. Положение участка усиления размыва берега в результате направляющего воздействия переката на поток зависит от положения переката в русле (рис. 3). Наибольшее количество перекатов как правило приурочено к разветвленному руслу. При положении переката перед разветвлением (разделением потока на рукава), усиливается размыв оголовка острова и берега в основном рукаве разветвления. При расположении переката в самом рукаве разветвления, может формироваться или усиливаться размыв как пойменного берега, так и острова, в зависимости от того, в какую сторону перекат направляет поток. В большинстве случаев, побочни таких перекатов расположены в шахматном порядке (у противоположных берегов и смещены друг относительно друга), в результате, соединяющие их гребни располагаются под углом к геометрической оси русла, оказывая направляющее воздействие на поток, что вызывает (или усиливает) размывы берегов при направлении динамической оси потока в сторону берега. В этом случае формируются размывы как берега, так и острова. Перекат, образованный при слиянии рукавов, отклоняет поток к противоположному берегу, что способствует увеличению размыва последнего.

За счет направляющего воздействия перекатов в скоростной тени формируются зоны замедления течения и снижения транспортирующей способности потока, где аккумулируются как часть транспортируемых потоком транзитных наносов, так и продукты размыва берега, расположенного выше по течению. В свою очередь рост зоны аккумуляции, к которым в большинстве случаев относятся побочни перекатов и косы в ухвостьях островов, способствует смещению потока к противоположному берегу, вызывая его размыв. Все это накладывается на направляющее воздействие мысов, коренных или укрепленных берегов.

В коротких временных интервалах описанные процессы хорошо проявляются на разветвленных участках неустойчивых русел равнинных рек, где берега сложены рыхлыми осадочными породами — лёссами. Так, на р. Ганге как в паводочный, так и в меженный периоды некоторые перекаты усиливают направляющее воздействие берегов, что приводит к увеличению темпов размыва островов, смещению и изменению протяженности фронтов размыва. Например, у населенного пункта Бахадерпер, перекат, расположенный при заходе в правый рукав разветвления (левый рукав — бывшая излучина, правый рукав — спрямляющая протока) оказывает направляющее воздействие на поток и вызывает образование

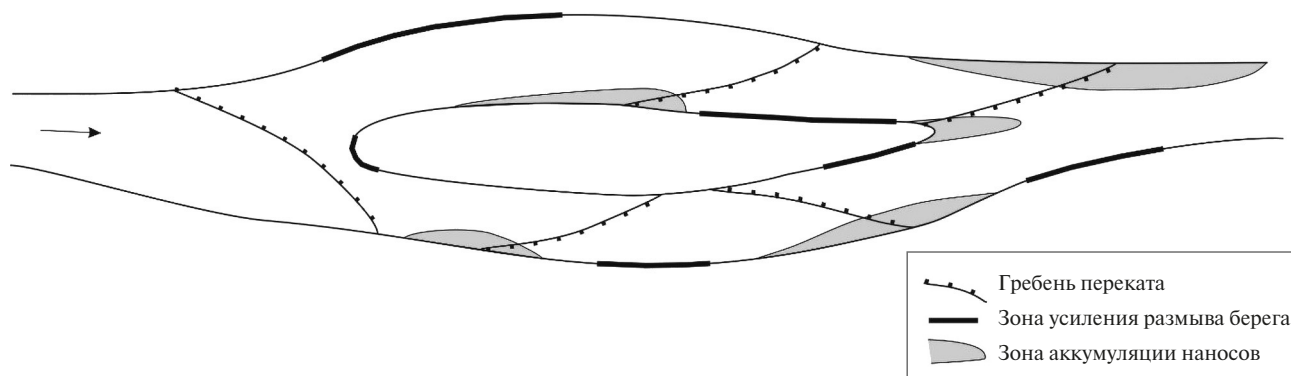


Рис. 3. Схема возможного положения участков усиления размыва берегов в результате направляющего воздействия макроформ руслового рельефа (перекатов).

“сбойного” течения у острова, а активно увеличивающийся в размерах нижний побочень этого переката также способствует отклонению потока влево (к острову). В совокупности это приводит к общему левостороннему смещению динамической оси потока, активизируя процессы интенсивного размыва острова. В годы, когда направляющее воздействие переката усиливается, наибольшие скорости размыва возрастают до 350–950 м/год, когда ослабевает — уменьшаются до 100–50 м/год и менее.

Другим важным фактором, влияющим на темпы размыва, является угол подхода потока к берегу в период повышенной водности. При увеличении угла подхода потока к берегу скорость его размыва увеличивается (рис. 4). Такие зависимости для одного и того же участка отличаются в разные годы, что возможно связано с различием в максимальной водности, однако общая тенденция сохраняется.

Направляющее воздействие перекатов оказывает сильное влияние на темпы размыва берегов неустойчивых и абсолютно неустойчивых русел, в то время как в слабоустойчивых руслах это влияние слабее. В большей степени на таких реках играет роль направление потока половодья и направляющее воздействие берегов.

На участках рек при относительном совпадении направления потока половодья и вытянутости островных массивов, наибольшие скорости размыва берегов на разветвленных участках русла, как правило характерны для оголовков островов и изгибов рукавов (вогнутых берегов). При этом соотношение темпов размыва оголовков островов преимущественно одиночных разветвлений и участков островов со стороны рукавов

взаимосвязаны (рис. 5). Однако на реках с неустойчивым руслом такие связи не прослеживаются и намечается тенденция к обратным трендам. Это может быть связано с большим вкладом направляющего воздействия берегов и грядового рельефа, а также с активными деформациями последнего в периоды средней и пониженной водности — в отличие от рек с более устойчивым руслом. При несовпадении направления течения половодья и межени наибольший размыв острова как на неустойчивых, так и на слабоустойчивых участках русел рек может оказаться не со стороны оголовка, а внутри рукава.

Темпы размыва островов, составляющих много рукавные разветвления, не одинаковы. Мелкие острова, образующие вторичные разветвления в основных рукавах, размываются быстрее, что приводит к большей динамике вторичных рукавов разветвлений, по сравнению с основными рукавами.

При прочих равных условиях размывам наиболее подвержены оголовки островов одиночных разветвлений при разделении островом потока на относительно равные части. В разветвлениях, где смещенный к берегу остров формирует основной и второстепенный рукава (одностороннее разветвление), фронт размыва острова вытягивается от оголовка вдоль основного рукава. Также наибольшие скорости размыва оголовков отмечаются у верхних островов нижнего звена сопряженных или односторонних чередующихся разветвлений, где темпы размыва возрастают в несколько раз по сравнению с фоновыми скоростями размыва оголовков соседних островов. Например, на участке р. Пур вблизи г. Коротчаево (ЯНАО, в составе г. Новый Уренгой) скорости размыва оголовков

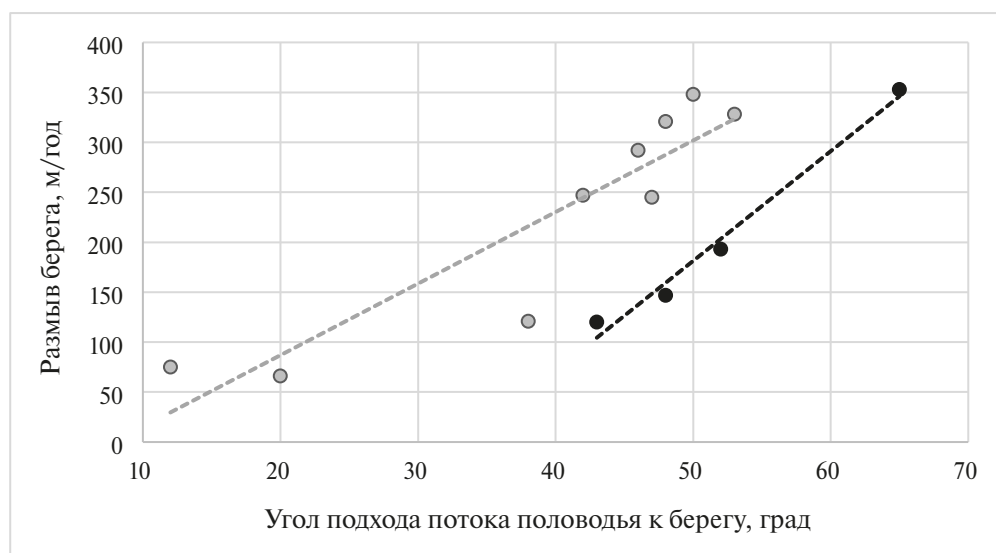


Рис. 4. Зависимости темпов размыва берега острова на Ганге от угла подхода потока к берегу в период повышенной водности (за разные годы).

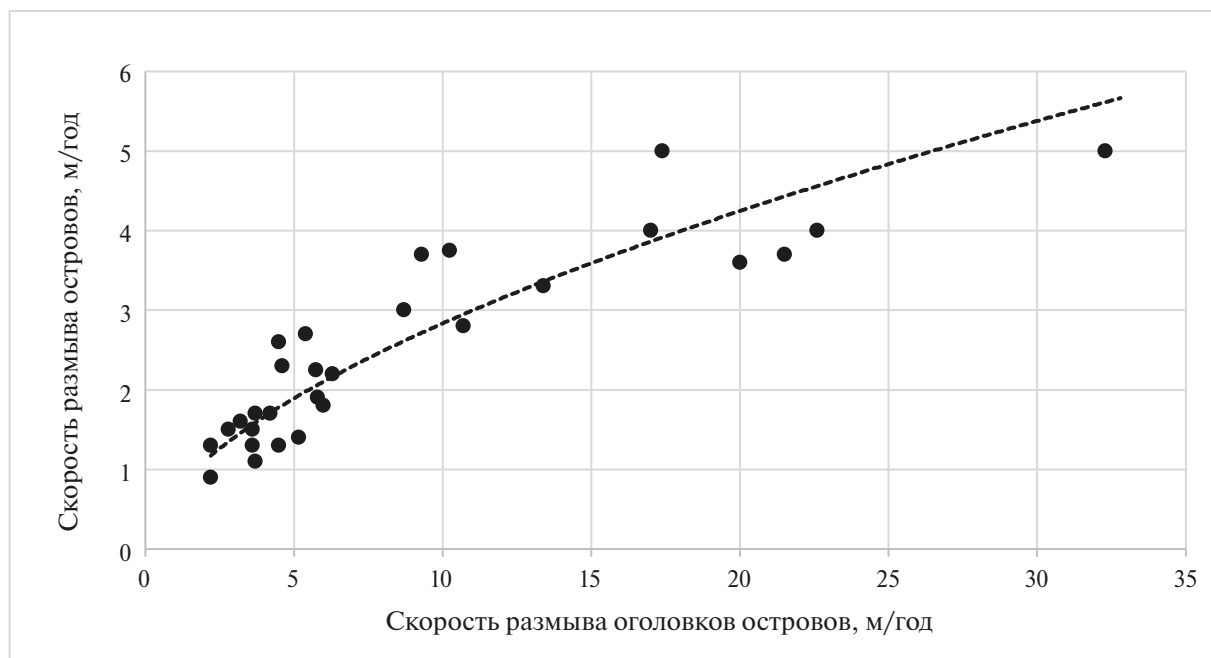


Рис. 5. Соотношение скоростей размыва оголовков островов и скоростей размыва островов в рукавах разветвлений для слабоустойчивых русел (на примере рр. Пур и Надым).

островов на перевале потока от одного берега к другому достигают 17 м/год, в то время как средние скорости размыва оголовков других островов на этом участке составляют 4.5–4.7 м/год.

На реках и участках рек с песчаным составом руслообразующих наносов слабоустойчивым или относительно устойчивым руслом, где горизонтальные деформации не интенсивны и составляют от первых метров до 5–10 м в год, макро- и мезоформы руслового рельефа (перекаты, побочни, осередки) чаще характеризуются периодичностью деформаций, связанных с грядовым движением наносов, что характерно, например, для большинства перекатов Северной Двины и Оби (Михайлова, 2015, 2019). На реках с меньшей устойчивостью русел (при возрастании темпов отступления берега на больших реках до 60–100 м/год и более), например, в нижнем течении Волги, периодичность в деформациях руслового рельефа часто отсутствует из-за быстрых изменений формы русла или рукавов разветвлений; в подобных ситуациях постоянно происходит адаптация форм руслового рельефа к новым условиям — меняется их положение в русле и морфология. Периодичность в динамике руслового рельефа на таких участках появляется при стабилизации русла в плане.

Периодичность деформаций форм грядового рельефа также может нарушаться на отдельных участках относительно устойчивых русел по мере развития направленных горизонтальных деформаций (размыва берегов или увеличения пойменных массивов и формирования остро-

вов), что также приводит к изменению количества макроформ (перекатов), их морфологии и положения в русле (рис. 6). Такие изменения наиболее выражены в разветвлениях. В зависимости от темпов горизонтальных деформаций могут произойти экстремально быстро — в течение нескольких лет — в результате внезапного изменения одного из факторов (см. рис. 6а), или постепенно — на протяжении длительного периода времени — десятков лет (см. рис. 6б). Так, на участке русла Северной Двины — Черевковском разветвлении — на фоне низкого темпа размыва берегов, постепенного увеличения аккумуляции наносов в основном рукаве и направленного перераспределения стока по рукавам произошла резкая активизация этих изменений, вызванная высоким половодьем 2012 г. Это привело к кардинальной перестройке русла в кратчайшие (1–2 года) сроки — как в самом узле разветвления, так и ниже по течению; причем максимальные темпы размыва берегов выросли до 50–100 м/год, при средних фоновых значениях около 5–9 м/год. В результате из-за резкого уменьшения стока основной рукав практически полностью обмелел, одновременно заметно активизировались второстепенные рукава, в которых сформировались перекаты (см. рис. 6а). После перестройки русла на этом участке темпы горизонтальных деформаций вернулись к прежним значениям и снова появилась периодичность в деформации форм руслового рельефа.

Наиболее редко на реках со слабоустойчивым руслом встречаются участки, где размывы бе-

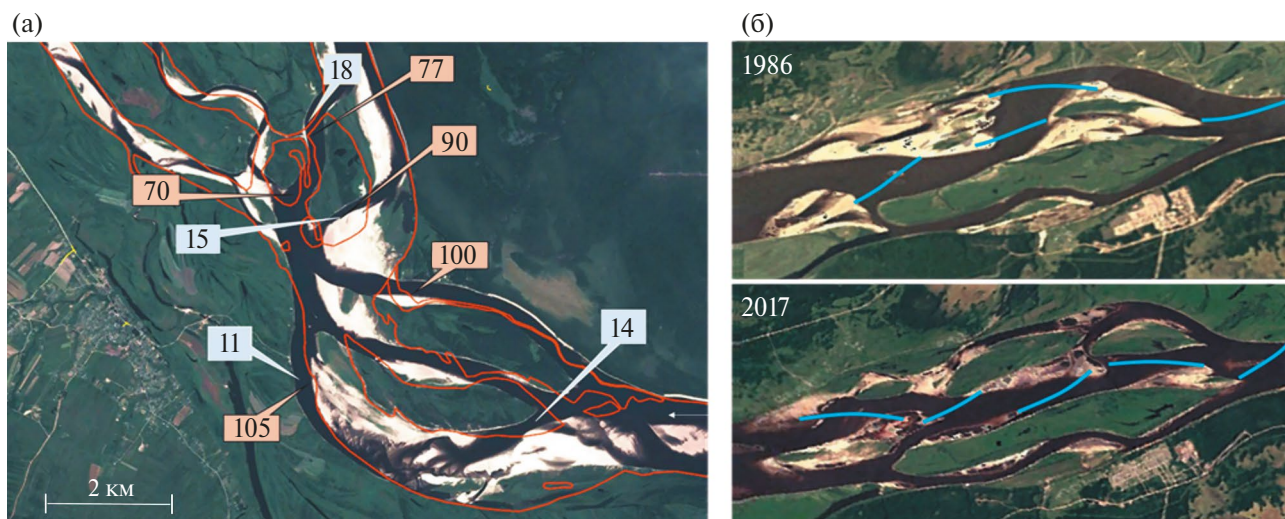


Рис. 6. Северная Двина: (а) деформации русла в районе Черевковского разветвления (цифрами обозначены темпы размыва; красная линия — положение линии берега 2010 г. на снимке 2013 г.); (б) изменение положения и количества перекатов по мере трансформации разветвления у поселка Сельменга в Архангельской области (синими линиями показаны гребни перекатов).

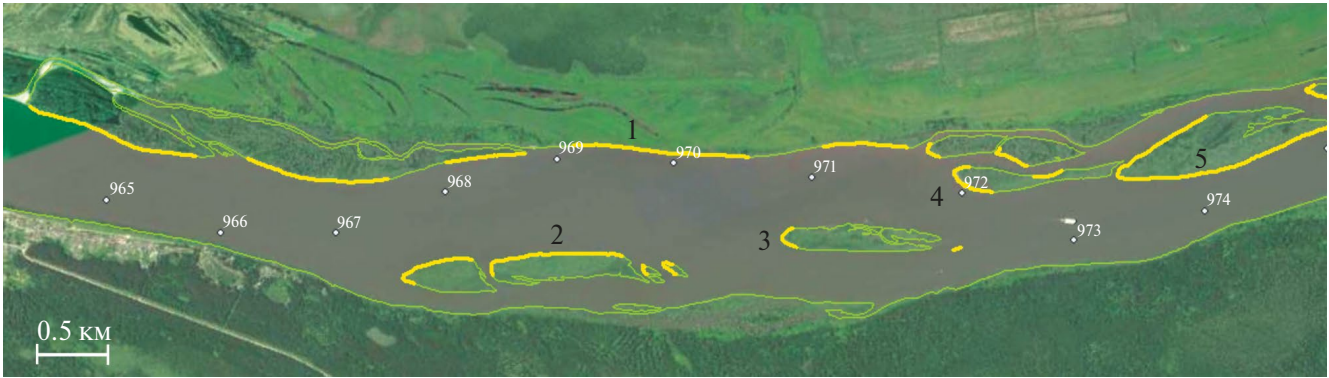
регов и деформации грядовых форм руслового рельефа в равной степени непрерывно оказывают друг на друга влияние. В этом случае практически отсутствует периодичность деформаций перекатов, они крайне динамичны, часто состоят из нескольких гряд. Деформации берегов, темпы которых в свою очередь зависят от направляющего воздействия гряд на поток, определяют положение перекатов в русле. Это приводит к постоянному изменению положения перекатов, их направляющего воздействия на поток и темпов размыва одних и тех же участков берегов вне зависимости от водности года. Один из таких участков расположен на Оби выше слияния с Томью (участок Базанаковских-Монастырских перекатов). На динамику перекатов этого участка оказывают влияние сразу несколько факторов: активные горизонтальные деформации, которые в свою очередь зависят от деформаций перекатов, и распространение периодического подпора, вызывающего аккумуляцию наносов вплоть до узла слияния рек. За весь период с 1973 по 2022 г. на участке происходил постепенный рост островов с различной интенсивностью и последующий их размыв. Размыву подвержены как острова, так и левый берег. Выделялись периоды с увеличением и уменьшением скоростей размыва, причем на соседних участках, подверженных размыву, скорости деформаций находились в противофазе (т.е. на одном участке скорость размыва увеличивалась, в то время как на другом уменьшалась). Сами значения темпов деформаций на одних и тех же участках отличались в 2–5 раз, по сравнению с предыдущим периодом (табл. 2). Темпы размыва оголовков некоторых островов в отдельные годы доходили

почти до 50 м/год. Такое чередование периодов увеличения и уменьшения темпов деформаций во многом были связаны с движением грядовых форм руслового рельефа, оказывающих на поток направляющее воздействие. Периодические скорости смещения крупных форм руслового рельефа составляли от 200–300 до 700 м/год, в периоды подпора от р. Томь снижались до минимальных значений. Грядовое движение наносов и миграция динамической оси потока, вызванная в том числе деформациями берегов, на всем участке привела к изменению глубин с амплитудой в плесовых ложинах до 8–9 м.

На полугорных реках, где значения уклонов выше, чем на равнинных реках, относительно равное взаимное влияние форм руслового рельефа и деформаций берегов проявляется в постепенном одновременном смещении фронтов размыва и перекатов.

Подробный анализ приведенных выше горизонтальных деформаций и деформаций форм руслового рельефа в совокупности с анализом изменения сезонной и многолетней водности рек позволяет прогнозировать возможные деформации русла на кратко- и среднесрочную перспективу. Так, анализ русловых переформирований на Ганге с конца 40-х годов XX в. в сочетании с деформациями форм руслового рельефа помог выделить несколько “вложенных” друг в друга временных циклов, что, в свою очередь, позволило в 2014 г. определить шесть сценариев дальнейшего развития русла Ганга на участке дельтовой области на ближайшие 5, 10 и 25 лет. Первые три сценария строились на предположении о продолжающихся естественных

Таблица 2. Темпы размыва берегов на участке Базанаковских-Монастырских перекатов на Оби



№ участка	С _{ср.наиб.} на участке, м/год	Наибольшая скорость размыва за период, м/год			
		2013–2016	2016–2017	2017–2019	2019–2021
1	3.4	2.3	1.0	3.1	4.8
2	4.2	4.1	9.9	0.8	3.8
3	3.7	2.3	0.3	3.0	6.3
4	34.4	43.6	16.6	49.0	15.5
5	2.7	1.5	0.3	2.7	5.9

Примечание: С_{ср.наиб.} — среднее значение наибольшей скорости размыва участка берега за весь период наблюдений.

деформациях русла (Михайлова, 2017). Вторые три сценария разрабатывались с учетом условия укрепления левого размываемого берега ниже мостов через реку. Сценарии были основаны на том, что изменения русла в ближайшие 1–2 года будут определять его дальнейшие деформации. Также развитие каждого из сценариев определялось многолетними деформациями разветвления выше прогнозируемого участка. Развитие русла пошло по первому сценарию, при условии укрепления левого берега реки ниже мостовых переходов (рис. 7).

ВЫВОДЫ

Для качественной и количественной оценки горизонтальных деформаций используются спутниковые снимки разного разрешения. Предельное минимальное разрешение определяется размером реки, выбранным временным интервалом между съемками, скоростью отступления берега, наличием или отсутствием направленных русловых деформаций.

В зависимости от транспортирующей способности потока и уклона реки, поступающие в русло от размыва берегов наносы частично переходят во

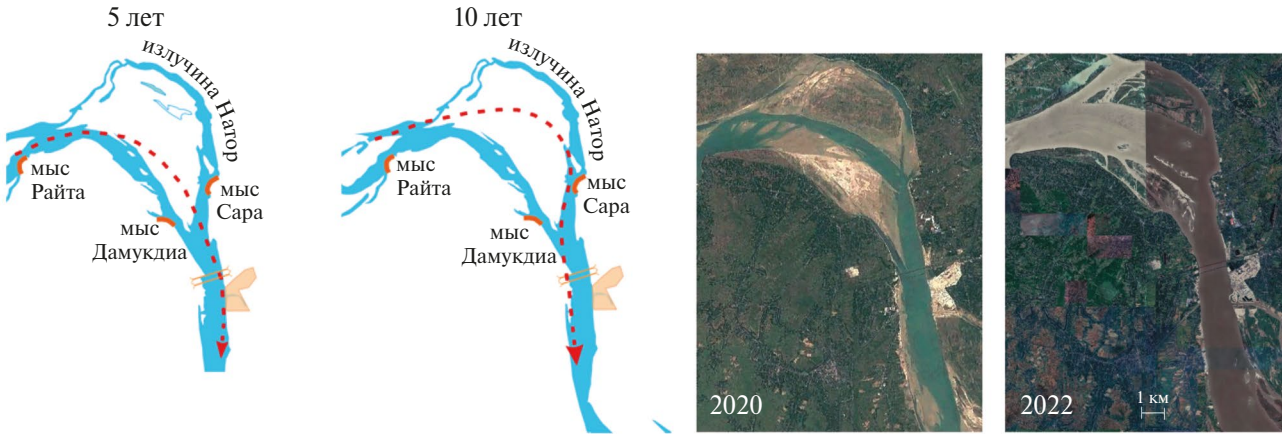


Рис. 7. Один из предложенных в 2014 г. сценариев развития русла Ганга ориентировочно через 5 и 10 лет (красная пунктирная линия — прогнозируемое положение динамической оси потока) (слева); спутниковые снимки 2020 и 2022 гг. (через 6 и 8 лет после прогноза) (справа).

взвешенное, частично — во влекомое состояние. Доля наносов, которые становятся руслообразующими, зависит от гранулометрического состава отложений, слагающих берега. Для полугорных рек руслообразующими наносами становятся 40–60% объема размытого материала, на равнинных реках со слабоустойчивым руслом — 50–80%.

Процессы размыва берегов, положение и деформации грядовых форм руслового рельефа взаимосвязаны. В неустойчивых руслах большое влияние на размывы берегов оказывают грядовые формы руслового рельефа, тогда как самим перекатам не присуща периодичность деформаций. В более устойчивом русле, наоборот, конфигурация берегов и их размыв определяют положение грядовых форм рельефа в русле, их морфологию и динамику, появляется периодичность в деформациях перекатов. Изменение морфологии русла или рукава разветвления влечет за собой изменение руслового рельефа. Это может произойти быстро в течение 1–2 лет или изменяться постепенно на протяжении нескольких десятков лет. Редко встречаются участки рек, в пределах которых размывы берегов и деформации грядовых форм руслового рельефа непрерывно и в равной степени оказывают друг на друга влияние.

Комплексный подход к анализу деформаций русел, связанный с размывом берегов и изменением форм руслового рельефа позволяет прогнозировать динамику русла. При высокой интенсивности деформаций возможен сценарный подход. Несмотря на относительную простоту метод тенденций (при условии детального изучения закономерностей и динамики русла) с довольно большой точностью позволяет прогнозировать деформации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено по планам НИР (ГЗ) Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051100166-4) (использованы фондовые материалы многолетних исследований русловых процессов, сравнение прогнозных оценок с современными деформациями русла Ганга), при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17-00065) (выполнен анализ динамики и деформаций грядовых форм руслового рельефа и горизонтальных деформаций русел рек) и при поддержке ЦКП Геопортал, МГУ имени М.В. Ломоносова (предоставлены космические снимки).

FUNDING

The work was carried out according to the research plans of the Research Laboratory of Soil Erosion and

Channel Processes named after Nikolai I. Makkaveev of Lomonosov Moscow State University (state order 121051100166-4) (deposited materials of long-term studies of channel processes used, comparative study of estimation forecasts with the contemporary channel deformations at the Ganges River), provided with the financial support of the Russian Science Foundation (project no. 23-17-00065) (analysis of the dynamics and deformations of the ridge forms of the channel relief) and with the support of the Central Committee of Geoportal, Lomonosov Moscow State University (satellite images were provided).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беркович К.М., Власов Б.Н.* Особенности русловых процессов на реках Нечерноземной зоны РФ // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. 1982. № 3. С. 28–34.
- Беркович К.М.* Регулирование речных русел. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 102 с.
- Беркович К.М., Злотина Л.В., Турыкин Л.А.* Размыв речных берегов: факторы, механизм, деятельность человека // Геоморфология. 2019. № 2. С. 3–17. <https://doi.org/10.31857/S0435-4281201923-17>
- Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Экологическое русловедение. М.: Изд-во ГЕОС, 2000. 332 с.
- Воробьев А.Ю., Кадыров А.С., Локтеев Д.С., Бургов Е.В., Балобина А.А.* Расчет сезонной эрозии на береговых откосах реки Оки с помощью геодезических методов // Изв. РГО. 2023. Т. 155. № 2. С. 25–43. <https://doi.org/10.31857/S0869607123020088>
- Маккавеев Н.И.* Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат, 1949. 202 с.
- Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Михайлова Н.М.* Многолетний режим деформаций перекатов Северной Двины при современном состоянии русла / Водные пути и русловые процессы: сб. науч. тр. СПб.: Изд-во ГУМРФ имени Адмирала С.О. Макарова, 2015. Вып. 2. 188 с.
- Михайлова Н.М., Турыкин Л.А., Ботавин Д.В.* Особенности деформаций русел полугорных участков рек бассейна р. Кубани / Тридцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (Пермь, 3–5 октября 2023 г.). Пермь, 2023. С. 161–164.
- Михайлова Н.М., Турыкин Л.А., Ботавин Д.В.* Подход к изучению деформаций русел полугорных рек (на примере рек бассейнов Кубани и Черного моря) / Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен. СПб.: Изд-во ООО “Изд-во ВВМ” (Санкт-Петербург), 2023. С. 322–327.
- Михайлова Н.М., Турыкин Л.А.* Оценка многолетнего режима перекатов при деформациях русла и антропогенном воздействии (в нижнем течении р. Белой) / Четвертые Виноградовские чтения.

- Гидрология от познания к мировоззрению. СПб.: Изд-во ООО "Изд-во ВВМ" (Санкт-Петербург), 2019. С. 722–727.
- Михайлова Н.М., Ботавин Д.В., Головлев П.П., Завадский А.С., Промахова Е.В., Рулева С.Н., Турыкин Л.А. Русловые процессы в нижнем течении р. Ганга в районе проектируемой АЭС / Маккавеевские чтения. 2016: сб. матер. Географический ф-тет МГУ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2017. С. 74–85.
- Попов И.В., Кондитерева Э.А. Прогноз русловых деформаций Волги на участке Саралевского водного узла в связи с проектированием улучшения его судоходных условий // Тр. ГГИ. 1974. № 216. С. 65–93.
- Попов И.В. Загадки речного русла. Ленинград: Гидрометиздат, 1977. 168 с.
- Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. М.: Изд-во Транспорт, 1964. Вып. 36. 262 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: Изд-во КРАСАНД, 2011. 960 с.
- Чалов Р.С. Общее и географическое русловедение. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 112 с.
- Чалов Р.С. Толковый терминологический и понятийный словарь-справочник по русловедению. М.: Изд-во Типография "Ваш формат", 2022. 141 с.
- Чалов Р.С., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Размывы пойменных берегов и эволюция форм русел рек как факторы перестройки русловой сети // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. 2022. № 5. С. 29–40.
- Чалов Р.С., Чернов А.В., Михайлова Н.М. Опасность русловых процессов на реках России: критерии оценки, картографирование, региональный анализ // Географический Вестн. 2021. № 1 (56). С. 53–67.
- Чалов С.Р., Чалова А.С., Школьный Д.И. Количественная оценка плановых переформирований реки Камчатки // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85. № 2. С. 218–230.
- Duró G., Crosato A., Kleinhans M.G., Uijttewaal W.S.J. Bank erosion processes measured with UAV-SfM along complex banklines of a straight mid-sized river reach // Earth Surf. Dynam. 2018. № 6. P. 933–953. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-933-2018>
- Klösch M., Balmier B., Habersack H. Intra-event scale bar-bank interactions and their role in channel widening // Earth Surface Processes and Landforms. 2015. № 40 (11). P. 1506–1523. <https://doi.org/10.1002/esp.3732>

Interrelation Between Lateral Deformations of River Channel and Changes in Channel Relief

N. M. Mikhailova*

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: nmmikhailova@yandex.ru

The article focuses on examples of the revealed interrelations between lateral (planar) deformations of weakly stable or unstable channels of plain or semi-mountain rivers and forms in the river relief, their morphology and dynamics. Lateral deformations at the river sites under study are estimated from the satellite images taken at different times since 1968. Deformation dynamics of the relief forms within the river channel is estimated using the pilot maps from 1940–1960 to the present and the channel plans in isobates. The factors controlling lateral deformations and sediment input to a channel are considered. The quantitative estimation is presented for the load of sediments of different sizes entering a channel as a result of bank erosion at both plain (the case of the middle Ob River) and semi-mountain (the case of the Kuban River) rivers. At semi-mountain rivers, channel forming sediments account for 40–60% of the total volume of bank erosion. The correlation is established between the erosion rates at the head edges of islands (mostly within the solitary branchings) and the erosion rates on the banks of island from the branch sides. The access angle of the flow to a bank is in direct correlation with the rate of bank erosion within the weakly stable channel under the control influence of riffles (the case of the Ganges). The correlations have the same trend but vary with the years. Examples are demonstrated for the influence of channel forms on bank erosion, as well as for the influence of bank erosion on morphology and dynamics of channel forms. It is concluded that under conditions of the unambiguous relationship either one process dominates or the alternation of bank erosion and dynamics of channel forms with time. The equilibrium of influence is very rare (the site of the Ob River upstream the confluence with the Tom River). The example shows for the predictable estimations of channel deformations based on the detailed analysis of the interrelated processes of bank erosion, changes in morphology, and dynamics of riffles as the forms of channel relief.

Keywords: channel processes, bank erosion, river channel deformation, channel relief, deformation of riffles

REFERENCES

- Berkovich K.M. *Regulirovanie rechnykh rusel* [Regulation of River Channels]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1992. 102 p.
- Berkovich K.M., Chalov R.S., Chernov A.V. *Erologicheskoe ruslovedenie* [Environmental Riverbed Knowledge]. Moscow: GEOS Publ., 2000. 332 p.
- Berkovich K.M., Vlasov B.N. Features of channel processes on the rivers at the Non-Chernozem zone of the Russian Federation. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 1982, no. 3, pp. 28–34.
- Berkovich K.M., Zlotina L.V., Turykin L.A. Riverbank Erosion: factors, mechanism, human activity. *Geomorf.*, 2019, no. 2, pp. 3–17.
<https://doi.org/10.31857/S0435-4281201923-17>
- Chalov R.S. *Obshchee i geograficheskoe ruslovedenie* [General and Geographical River Channel Science]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1997. 112 p.
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: Teoriya, Geografiya, Praktika. Tom 2. Morfodinamika rechnykh rusel* [River Channel Science: Theory, Geography, Practice. Vol. 2: Morphodynamics of River Channels]. Moscow: KRASAND Publ., 2011. 960 p.
- Chalov R.S. *Tolkovyi terminologicheskii i ponyatiinyi slovar'-spravochnik po ruslovedeniyu* [Explanatory Terminological and Conceptual Dictionary—Reference Book on River Channel Science]. Moscow: Izd-vo Tipografiya "Vash format", 2022. 141 p.
- Chalov S.R., Chalova A.S., Shkolny D.I. Quantitative assessment of planned reformation of the Kamchatka River. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2021, vol. 85, no. 2, pp. 218–230.
- Chalov R.S., Chernov A.V., Mikhailova N.M. The danger of channel processes on the rivers of Russia: assessment criteria, mapping, regional analysis. *Bull. Geogr.*, 2021, no. 1(56), pp. 53–67.
- Chalov R.S., Kurakova A.A., Mikhailova N.M., Ruleva S.N. Erosion of floodplain banks and the evolution of river channel forms as factors in the restructuring of the channel network. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2022, no. 5, pp. 29–40.
- Duró G., Crosato A., Kleinhans M.G., Uijttewaal W.S.J. Bank erosion processes measured with UAV-SfM along complex banklines of a straight mid-sized river reach. *Earth Surf. Dynam.*, 2018, no. 6, pp. 933–953.
<https://doi.org/10.5194/esurf-6-933-2018>
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [Riverbed and Erosion in Its Basin]. Moscow: Izd-vo Akademii Nauk SSSR, 1955. 347 p.
- Makkaveev N.I. *Ruslovoi rezhim rek i trassirovanie prorozei* [River Channel Regimes and Cuts Tracing]. Moscow: Rechizdat Publ., 1949. 202 p.
- Mikhailova N.M. Long-term mode of deformation of rifts of the Northern Dvina in the current state of the channel. In *Vodnye Puti i usloviya protsessy: Sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 2* [Waterways and Channel Processes: Collection of Scientific Papers. Issue 2]. St. Petersburg: Izd-vo GUMRF imeni Admirala S.O. Makarova, 2015. 188 p. (In Russ.).
- Mikhailova N.M., Botavin D.V., Golovlev P.P., Zavadsky A.S., Promakhova E.V., Ruleva S.N., Turykin L.A. Channel processes in the lower reaches of the Ganges River in the area of the designed NPP. In *Makkaveevskie Chteniya — 2016. Sbornik materialov. Geograficheskii fakultet MGU* [Makkaveev Readings—2016: Collection of Reports. Faculty of Geography, Moscow State University]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 2017, pp. 74–85. (In Russ.).
- Mikhailova N.M., Turykin L.A. Assessment of the long-term regime of rifts during channel deformations and anthropogenic impact (in the lower reaches of the Belaya River). *Chetvertye Vinogradovskie Chteniya. Gidrologiya ot poznaniya k mirovozzreniyu* [Fourth Vinogradov Readings. Hydrology from Cognition to Worldview]. St. Petersburg: Izdatel'stvo VVM, 2019, pp. 722–727. (In Russ.).
- Mikhailova N.M., Turykin L.A., Botavin D.V. Features of channel deformations at semi-mountainous sections of the rivers of the Kuban River basin. In *Tridtsat' vos'moe plenarnoe mezhvuzovskoe koordinatsionnoe soveshchanie po probleme erozionnykh, usloviykh i ust'evykh protsessov (g. Perm, 3–5 oktyabrya 2023 g.)* [Thirty-Eighth Plenary Intercollegiate Coordination Meeting on the Problem of Erosion, Channel and Estuarine Processes (Perm, October 3–5, 2023)]. Perm, 2023, pp. 161–164. (In Russ.).
- Mikhailova N.M., Turykin L.A., Botavin D.V. Approach to the study of channel deformations at semi-mountain rivers (on the example of the rivers of the Kuban and Black Sea basins). In *Pyatye Vinogradovskie Chteniya. Gidrologiya v epokhu peremen* [Fifth Vinogradov Readings. Hydrology in an Era of Change]. St. Petersburg: Izdatel'stvo VVM, 2023, pp. 322–327. (In Russ.).
- Popov I.V. *Zagadki rechnogo rusla* [Riddles of the River Bed]. Leningrad: Gidrometizdat Publ., 1977. 168 p.
- Popov I.V., Konditerova E.A. Forecast of channel deformations of the Volga in the section of the Saralevsky water junction in connection with the design of improving its navigable conditions. *Tr. GGI*, 1974, no. 216, pp. 65–93.
- Proektirovanie sudovykh khodov na svobodnykh rekakh. Trudy TsNIIVT. Vyp. 36* [Designing of Navigable Passes on Free Rivers. Proceedings of the Central Scientific-Research Institute of Water Transport. Vol. 36]. Moscow: Transport Publ., 1964. 262 p.
- Vorobyov A.Yu., Kadyrov A.S., Lokteev D.S., Burgov E.V., Balobina A.A. Calculation of seasonal erosion on the coastal slopes of the Oka River using geodetic methods. *Izv. RGO*, 2023, vol. 155, no. 2, pp. 25–43.
<https://doi.org/10.31857/S0869607123020088>