

РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОЛУГОРНОЙ РЕКЕ (р. БЕЛАЯ, ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ) (СТ. 1. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РУСЛА И СТОК ВОДЫ КАК ИХ ОСНОВНОЙ ФАКТОР)

© 2022 г. И. Н. Каргаполова^{1,*}, И. В. Крыленко^{2,**}

¹ООО ЭКОНГинжиниринг, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: ikargapolova@gmail.com

**E-mail: i-krylenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.05.2021 г.

После доработки 21.06.2021 г.

Принята к публикации 11.10.2021 г.

Река Белая — полугорная река Западного Кавказа со слабоустойчивым руслом, пересекающим аккумулятивную предгорную равнину. Цель работы — количественный анализ горизонтальных и вертикальных деформаций русла р. Белой с оценкой воздействия основных факторов — стока воды и наносов. Исследование основано на сопоставлении данных дистанционного зондирования Земли, наземных наблюдений и съемок с беспилотного летательного аппарата за период 2001–2020 гг. Определены зависимости интенсивности размыва берегов от колебаний стока воды. Установлено, что скорость размыва берегов имеет наиболее тесную связь с количеством высоких паводков и их продолжительностью. Скорость размыва берегов на меандрирующем участке р. Белая высока, ее средние значения превышают 20 м/год, а максимальные достигают 70–80 м/год. Максимальные темпы размыва берегов наблюдаются в высокие паводки после затопления гребней крупных гряд. При экстремальных паводках редкой обеспеченности после выхода воды на пойму происходят радикальные изменения русла: “уход” основного стока в пойменные протоки и спрямление излучин.

Ключевые слова: полугорные реки, эрозия берегов, сток воды, меандрирование

DOI: 10.31857/S0435428122010072

ВВЕДЕНИЕ

Русла полугорных рек — динамичные слабоустойчивые системы, которые быстро реагируют на воздействие природных и антропогенных факторов [1–8]. Мониторинг за изменением русел рек в предгорьях позволяет наблюдать их реакцию на основные факторы — сток воды и сток наносов — в масштабе нескольких лет. Для подобных исследований на равнинных реках, где интенсивность русловых деформаций значительно ниже, требуется анализ данных за несколько десятилетий или даже столетий [9–11].

По данным ряда работ [12–19], на полугорных реках с гравелистым руслом средние темпы размыва берегов составляют несколько метров в год. По неопубликованным материалам ООО “ЭКОНГинжиниринг”, проводившего мониторинг русловых процессов на отдельных участках западно-кавказских рек Белая, Лаба и Уруп, размывы берегов достигали десятков метров в год, что значительно больше приведенных выше значений. С высокими темпами размыва берегов на реках региона связано большое количество ава-

рийных ситуаций в пределах населенных пунктов и на линейных сооружениях, пересекающих реки. Некоторые из них зафиксированы в опубликованных источниках [20–22]. На р. Белой ООО “ЭКОНГинжиниринг” фиксировал практически ежегодные размывы газопроводов, связанных с горизонтальными деформациями русла. Это говорит о недоучете русловых процессов на реках данного типа из-за слабой изученности русел полугорных рек как для данного региона, так и на территории Российской Федерации в целом.

Цель работы: количественный анализ деформаций русла крупной реки Западного Кавказа — р. Белой — после ее выхода на аккумулятивную предгорную равнину с оценкой воздействия основных факторов, а именно стока воды и наносов. Помимо выявления фоновых закономерностей была оценена роль экстремальных природных событий: в 2002 г. на реке отмечался паводок с обеспеченностью максимального расхода воды около 1%, а в 2011–2012 гг. за счет оползневых и селевых процессов в верховьях, в реку поступило максимальное количество наносов.

В серии из двух статей рассмотрены особенности русловых процессов р. Белой. В первой статье рассмотрены горизонтальные деформации русла, влияние стока воды на интенсивность размыва берегов, во второй — вертикальные деформации русла, оценка влияния стока наносов и вклада карьерных разработок в русловые деформации. Подобное исследование в рамках последних 20 лет стало возможным благодаря наличию большого количества информации, полученной при проведении дистанционного зондирования, съемок с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), гидрологических наблюдений и мониторинга русловых процессов, проводимых на местности в последние годы.

В задачи данной статьи входило: 1) определить интенсивность горизонтальных деформаций под воздействием колебаний стока воды; 2) выяснить, какие именно параметры стока воды определяют интенсивность размыва берегов; 3) оценить реакцию русла реки на экстремальные паводки редкой обеспеченности.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РУСЛА БЕЛОЙ

Для оценки интенсивности горизонтальных деформаций русла воды был выбран 15-километровый участок реки, расположенный в 30 км ниже плотины Белореченского гидроузла, в 30–45 км от устья. Участок находится у населенных пунктов Садовое и Белое, координаты начальных и конечных точек 44.98° с.ш., 39.68° в.д. и 45.03° с.ш., 39.65° в.д. соответственно. Площадь водосбора 5500 км². На всем протяжении участка русло свободно меандрирует и представляет собой серию из 11 излучин. Выбор меандрирующего участка в пределах аккумулятивной равнины обусловлен тем, что связь размыва берегов и колебаний стока проще улавливается на излучинах (чем, например, на разветвленных участках русла), где размыв вогнутых берегов является однонаправленным последовательным процессом.

Краткая геоморфологическая характеристика. На р. Белой современный пояс руслоформирования, включающий пойму и русло, имеет ширину 1.5–2.0 км. Пойма преимущественно высокая, высотой 2.5–3.5 м, двусторонняя, сегментно-островная, с выровненной поверхностью и старичными понижениями шириной до 20 м, глубиной до 1.5–1.8 м, в паводки заполненными водой. По отдельным понижениям в высокие паводки возникают сильные течения, заметные на местности по навалам карчей, наброскам русловых отложений, песка и гальки. Сложение поймы хорошо видно в размываемых откосах в виде чередования слоев руслового аллювия (гальки, песка), сверху перекрытых пойменными опесчаненными суглинками.

Русло Белой представляет собой комбинацию меженного русла и крупных прирусловых отмелей, которые отчетливо дешифрируются по космическим снимкам по отсутствию растительности (рис. 1). Общая ширина русла от 150 до 450 м. Водный поток в межень занимает узкую, наиболее глубокую часть русла. Меженное русло (русловая ложбина) имеет ширину от 40–60 м на плесах до 90–120 м на расширениях у перекатов. Обсохшая в межень часть русла занята прирусловыми отмелями, образующими протяженные (до 500 м) и широкие (120–300 м) побочни. Превышение крупных гряд над меженным урезом значительное и составляет до 2.0–2.5 м, что сопоставимо с высотой поймы. Местами на перекатных участках отмечено образование осередков между рукавами меженного потока (рис. 1).

Русло сложено разнородным аллювием с преобладанием гальки разного размера и песка. Преобладающий размер фракций имеет диаметр 25–50 мм. Средняя галька занимает более 30% от общей площади русла. Несколько меньше (около 30% от общей площади) занимают песчаные отложения, которые также присутствуют в виде заполнителя в пробах крупнообломочного материала. На прирусловых склонах отмелей встречается отмостка из крупной гальки с включениями мелкого валунника.

Вдоль реки закономерно чередуются плесовые ложины с характерными меженными глубинами 2.5–3.5 м в вершинах излучин и перекаты на вставках между излучинами с глубинами на гребне перекатов менее 0.5–1.0 м. Наибольшие глубины отмечаются у заломов, где в результате локальных размывов возникают ямы глубиной до 5–6 м.

Уклон реки составляет в среднем 0.8–0.9‰, на перекатах в межень до 3.0–4.6‰. Скорость течения в межень на перекатных участках достигает 1.5–2.0 м/с, в половодье — до 3.5–4.0 м/с на стрежне.

Краткая характеристика водного режима. Для р. Белой характерны растянутые половодья в весенне-летний период и дождевые паводки в любое время года. Начало половодья, как правило, приходится на вторую декаду марта, окончание — на середину июня. Часто на волну половодья накладываются дождевые паводки. В отдельные годы половодье не выражено или выражено слабо. Максимальные годовые значения расходов и уровней воды, как правило, вызваны интенсивными осадками и могут наблюдаться в течение всего года. Чаше максимумы приходятся на май–июнь и сентябрь–октябрь. Среднее количество паводков различной высоты и продолжительности составляет 15–20 за год; количество высоких паводков, при которых полностью затопляются прирусловые отмели — 6–7 за год.

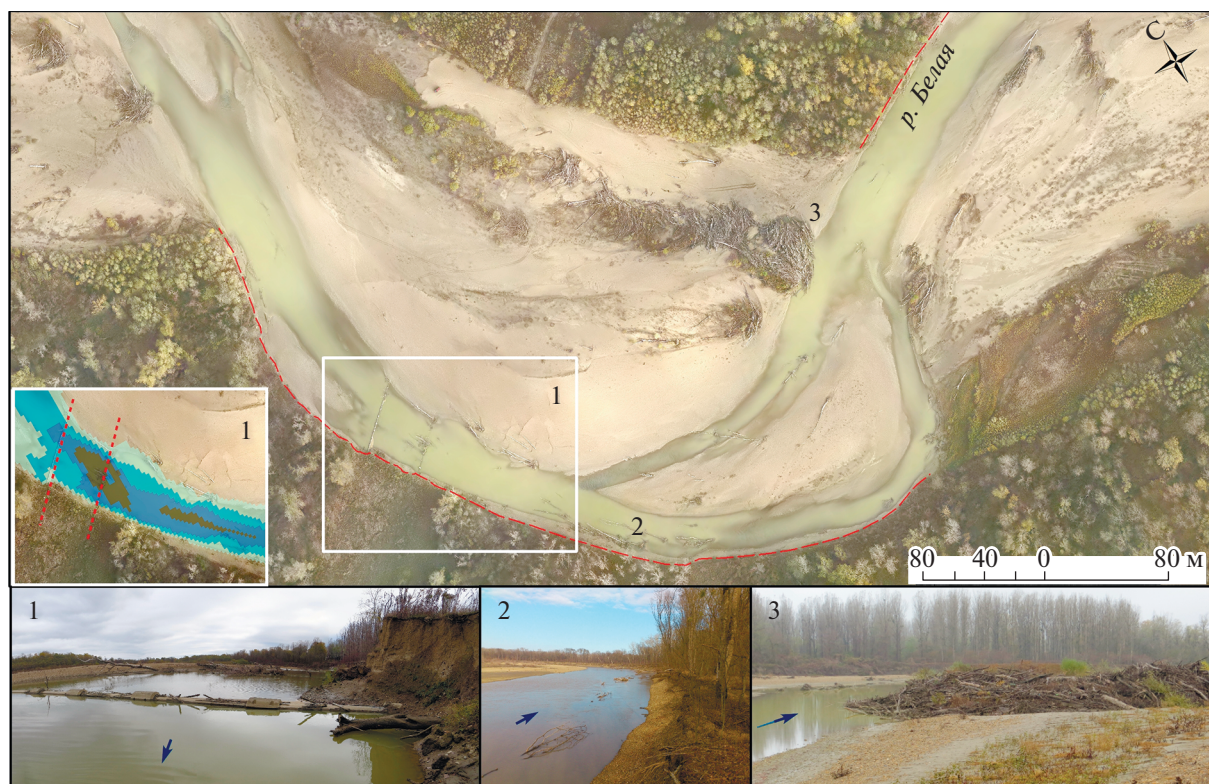


Рис. 1. Русло р. Белой, излучины по состоянию на 23.11.2020 г. (съемка БПЛА), красным пунктиром выделены размываемые берега. На вставках: 1 — нижнее крыло излучины с размываемым левый вогнутым берегом, где отмечаются размыв трубопроводов и переуглубление русла; 2 — стволы деревьев вдоль динамической оси потока у вогнутого берега излучины; 3 — крупный залом на выпуклом берегу излучины.

Ближайшим стационарным постом на р. Белой, где ведутся наблюдения за стоком воды, является пост р. Белая—Белореченский гидроузел. Сток воды, поступающий к Белореченской ГЭС, разделяется на две части: первая сбрасывается ниже по течению (на участок изысканий), вторая отводится по деривационному каналу в Ганжинское водохранилище. Среднегодовые расходы притока р. Белой к гидроузлу $110 \text{ м}^3/\text{с}$; среднегодовые расходы, сбрасываемые в реку ниже по течению, — порядка $62 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальный сток практически полностью пропускается транзитом, в период половодья и паводков канал забирает около $100 \text{ м}^3/\text{с}$, в соответствии с правилами эксплуатации — до $158 \text{ м}^3/\text{с}$. Расход 1%-ной обеспеченности согласно правилам составляет $1970 \text{ м}^3/\text{с}$ [23].

На рис. 2 представлены несколько гидрографов за характерные по водности годы: 2002 г. с экстремальным паводком, 2010 г. с высокими паводками и низким средним стоком, 2013 и 2014 г. с низкими паводками и относительно высоким средним стоком. Из рисунка хорошо видно, что паводки могут наблюдаться в течение всего года, в том числе в зимние месяцы.

Продолжительность паводков на р. Белой от 2—3 дней до 4—5 нед, при этом максимальные расходы наблюдаются, как правило, несколько часов.

В таблице 1 приведены максимальные среднесуточные и срочные (в скобках) значения расходов воды в нижнем бьефе Белореченского гидроузла, которые соответствуют расходам воды на рассматриваемом участке.

Среднее значение максимальных среднесуточных расходов $780 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальный среднесуточный расход воды за весь период наблюдений отмечался в июне 2002 г., превысив расход 1%-ной обеспеченности, и на рассматриваемом участке р. Белой достиг среднесуточного значения $1560 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом отмечались мгновенные значения до $1920 \text{ м}^3/\text{с}$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Временной интервал исследований горизонтальных русловых деформаций составил 20 лет — период с 2001 по 2020 г. Весь период был разбит на 8 интервалов, границы которых были обусловлены наличием, прежде всего, данных дистанционного зондирования Земли и съемкой с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Выбранные

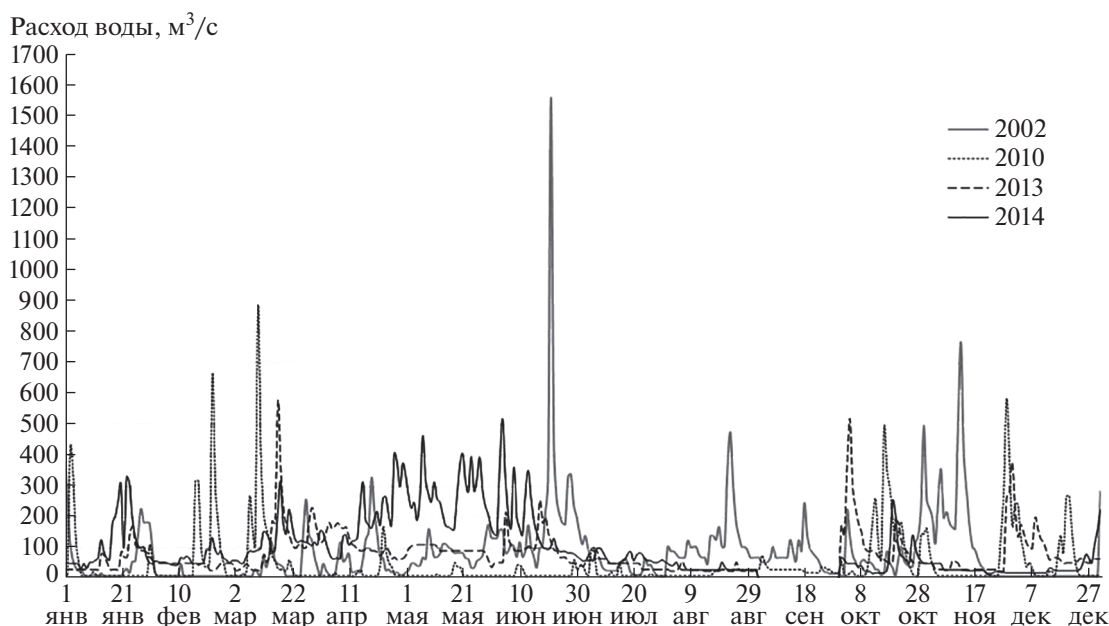


Рис. 2. Гидрографы р. Белая в нижнем бьефе Белореченского гидроузла, среднесуточные расходы воды.

временные интервалы включали 2–4 года, в пределах которых наблюдалось от нескольких до нескольких десятков высоких паводков. Обозначенные интервалы приведены ниже в табл. 2 и 3.

Использовались данные спутников Aster 14.05.2001 (15 м/пикс), Landsat7 30.07.2002 (15 м/пикс), QuickBird 12.07.2003 и 03.10.2007 (0.6 м/пикс), WorldView 09.08.2010 (0.4 м/пикс), Spot5 10.12.2012 и 30.05.2012 (3 м/пикс), Spot7 14.11.2014 (2 м/пикс), Pleiades 31.07.2016 и 14.04.2018 (0.5 м/пикс) и другие. Кроме того, на отдельных участках использовались данные наземной топографической съемки и съемки БПЛА за 09.04.2016 и 20.11.2020 (0.05 м/пикс). Все материалы были сопоставлены в единой системе координат СК42, по всем снимкам проводилось визуальное дешифрирование русла р. Белой. Для каждой даты было оцифровано меженное положение русла для дальнейшего сопоставления и измерения величин размыва берегов.

Для определения скорости размыва вогнутых берегов излучин учитывалось расстояние между

бровкой размываемого берега предшествующего и последующего временного среза. Среднее смещение фронта размыва берега определялось как частное от площади размывтой поймы и ширины фронта размыва. Погрешность измерений максимальна для ранних снимков с невысоким разрешением и составляет 15 м (для периода 2001–2003 гг., включающего снимок Aster), для остальных периодов: 2–4 м (2010–2012, 2012–2014, 2014–2016) и 0.5–0.8 м (2003–2007, 2007–2010, 2016–2018, 2018–2020) при сопоставлении снимков высокого разрешения и БПЛА.

Для оценки показателей стока в рамках настоящей работы были использованы данные гидрологического поста р. Белая–Белореченский гидроузел, а именно среднесуточные расходы воды, поступающие в нижний бьеф. Наличие данных о ежедневных расходах воды за рассматриваемый 20-летний период позволило рассчитать необходимые показатели водного стока, использованные далее для расчетов: средние и максимальные расходы воды, количество паводков и дней с рас-

Таблица 1. Характерные расходы воды р. Белой в нижнем бьефе Белореченского гидроузла, в скобках указаны максимальные срочные расходы

Период наблюдений	Максимальный измеренный расход воды 21.06.2002, м³/с	Максимальный расчетный расход 1%-ной обеспеченности, м³/с	Среднее из максимальных, м³/с	Средний годовой, м³/с	Расход воды при затоплении всего русла выше верхушек побочной, м³/с
1970–2020	1560 (1920)	1518 (1970)	780 (880)	62	280

Таблица 2. Параметры стока воды за рассматриваемые периоды, выбранные для установления связи со скоростью размыва берегов

Интервал	Расход воды за интервал, м ³ /с		Количество паводков с расходом воды выше 280 м ³ /с	Продолжительность расходов воды более 280 м ³ /с, дни
	средний	максимальный		
14.05.2001–12.07.2003	77	1560	23	47
12.07.2003–03.10.2007	79	1050	46	89
03.10.2007–09.08.2010	51	885	15	30
09.08.2010–30.09.2012	57	1218	13	26
30.09.2012–14.11.2014	45	841	10	12
14.11.2014–31.07.2016	49	677	7	14
31.07.2016–14.04.2018	63	718	11	16
14.04.2018–23.11.2020	40	951	9	15
Среднее значение за год	59	755	6.7	12.7

ходами выше затопления макрогряд за назначенные временные интервалы. Эти характеристики были определены для каждого из 8 временных интервалов (табл. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор параметров стока воды, при которых наблюдаются максимальные деформации русла. Известно, что для русел большинства рек водность связана с интенсивностью деформаций русла, в частности, с размывом берегов [24–31]. Сток воды, как правило, пропорционален скорости русловых деформаций, однако, зачастую не ясно, какие именно параметры стока в большей степени коррелируют с береговой эрозией. Ранее на примерах различных равнинных рек установлены связи скоростей размыва берегов с продолжительностью осадков [24], величиной и частотой пиковых расходов воды [25], максимальных расходов, их продолжительностью [26, 28, 30], среднегодовых расходов [27, 29]. Также широко используются понятия руслонаполняющий (в бровках поймы) и руслоформирующий расходов воды [32–34].

В нашей стране чаще используется понятие руслоформирующего расхода, расчет которого с выделением интервалов (верхнего, среднего и нижнего) позволяет теоретически оценить, при каких расходах воды в многолетнем рассмотрении осуществляется наибольший массовый транспорт наносов, и, как следствие, происходят максимальные русловые деформации. Для большинства равнинных рек с весенним и весенне-летним половодьем, действительно, рассчитанные по методике Н.И. Маккавеева руслоформирующие расходы примерно соответствуют максимумам деформаций [1].

Если использовать стандартную методику для нашего участка полугорной реки, то получим, что руслоформирующие воды соответствуют расходам в диапазоне 280–350 м³/с (рис. 3). На местности при достижении этих расходов происходит заполнение русла реки, при котором уровни воды поднимаются выше самых крупных гряд – прирусловых отмелей и побочней. На рис. 3 приведена схема рассчитанного для р. Белой руслоформирующего расхода. На верхней вставке (рис. 3, справа сверху) приведено изображение русла в паводок при расходе воды, соответствующем максимуму на графике; при этом все крупные гряды/прирусловые отмели уже затоплены. На нижней вставке (рис. 3, справа снизу) приведено изображение русла в низкую межень, при обсохших крупных грядах.

В действительности для рассматриваемого участка р. Белой при расходах воды около 280–350 м³/с только начинается массовое перемещение влекомых наносов, когда отложения, слагающие гряды, приходят в движение. Размывы пойменных берегов, наблюдаемые на местности, при этом еще незначительные. Когда глубины воды над гребнями затопленных отмелей достигают 1–1.5 м и становятся сопоставимы с высотой гряд, над ними возникает сплошной поток со скоростью течения до 2.0–3.0 м/с и более, что позволяет перемещать галечные отложения крупностью 1–5 см. С этого момента скорость русловых деформаций и размыв берегов резко увеличиваются. В дальнейшем интенсивность размыва берегов продолжает нарастать по мере подъема воды до пойменных бровок. Интенсивность размыва берега возрастает по мере подъема воды до пойменных бровок, когда расход воды достигает 1000–1100 м³/с.

Таким образом, расходами, определяющими деформации р. Белой на рассматриваемом участ-

Таблица 3. Размыв вогнутых берегов излучин, средние по фронту размыва и максимальные (указаны в скобках)

Интервал	Порешность оценок, м	Размыв вогнутых берегов, м											для всей серии излучин	
		для каждой из излучин серии с номерами												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	среднее значение за указанный интервал, м	среднее значение
14.05.2001—12.07.2003	±15	108 (140)	80 (90)	56 (90)	—	77 (120)	—	—	54 (75)	89 (120)	—	71 (95)	74 (104)	34
12.07.2003—03.10.2007	±0.8	101 (120)	114 (150)	126 (210)	75 (120)	140 (220)	91 (130)	98 (150)	110 (145)	64 (120)	69 (92)	95 (140)	100 (145)	24
03.10.2007—09.08.2010	±0.8	43 (65)	64 (90)	40 (65)	49 (62)	51 (90)	53 (90)	46 (97)	49 (80)	10 (18)	77 (110)	156 (205)	58 (88)	20
09.08.2010—30.09.2012	±4	48 (50)	62 (70)	43 (50)	60 (90)	44 (70)	70 (95)	57 (70)	60 (120)	37 (60)	—	—	53 (75)	24
30.09.2012—14.11.2014	±2	30 (35)	30 (50)	32 (55)	29 (60)	28 (35)	29 (45)	43 (80)	43 (55)	—	23 (30)	83 (105)	36 (55)	17
14.11.2014—31.07.2016	±2	20 (40)	45 (60)	39 (65)	14 (25)	30 (40)	59 (85)	68 (75)	56 (95)	67 (150)	10 (15)	43 (60)	43 (65)	25
31.07.2016—14.04.2018	±0.8	21 (40)	38 (52)	50 (90)	21 (30)	31 (50)	35 (42)	117 (200)	35 (50)	45 (70)	10 (15)	84 (105)	50 (68)	30
14.04.2018—23.11.2020	±0.5	29 (35)	10 (15)	37 (60)	38 (45)	22 (30)	37 (60)	67 (110)	36 (60)	14 (16)	10 (12)	25 (45)	31 (44)	12
Средняя скорость размыва излучин за весь период 2001—2020 гг., м/год		20	23	22	15	22	19	25	23	17	10	29	23	23

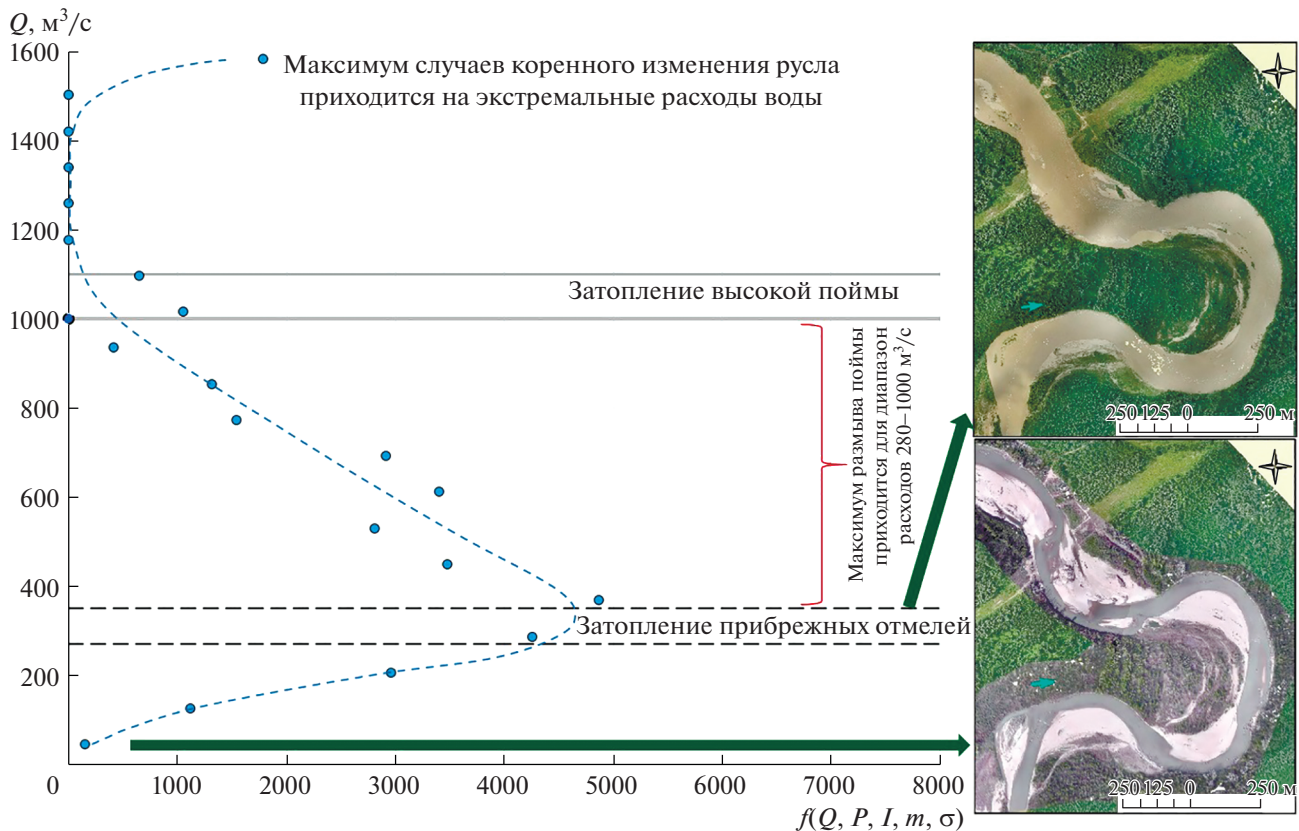


Рис. 3. Определение условий прохождения руслоформирующих расходов воды для р. Белой по максимуму кривой на графике, где Q — расход воды $\text{м}^3/\text{с}$, P — его повторяемость, %, I — уклон, m — σ — коэффициент затопления поймы. Вставки иллюстрируют характер затопления поймы в русле р. Белой при различных расходах воды: верху — полностью затопленное русло (расход воды около $300 \text{ м}^3/\text{с}$), внизу — меженное русло (расход воды $20 \text{ м}^3/\text{с}$).

ке, являются расходы воды в диапазоне $280\text{--}1100 \text{ м}^3/\text{с}$, соответствующие наполнению русла от затопления гребней крупных гряд/побочней до пойменных бровок. Стояние воды в данном интервале также способствует фильтрации со стороны реки, насыщению гравийно-песчаных береговых откосов водой, увеличению веса отложений, что ослабляет устойчивость берегов и способствует их разрушению [35, 36].

Логично предположить, что и для других полугорных рек со ступенчатым строением русла, наличием широких отмелей (побочней), руслоформирующий расход будет выглядеть в виде интервала от гребней крупных гряд до пойменных бровок. Чем выше продолжительность расходов воды в данном диапазоне, тем интенсивнее будут происходить русловые деформации, в том числе размывы берегов.

Чтобы проверить данное утверждение, была определена связь скоростей размыва берегов с параметрами водного стока. Для этого, помимо стандартных характеристик — среднего и максимального расходов воды, — были выбраны еще две: количество паводков с расходами воды, пре-

вышающими $280 \text{ м}^3/\text{с}$, и продолжительность расходов воды выше $280 \text{ м}^3/\text{с}$. Полученные характеристики для каждого временного интервала приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что за весь период с 2001 по 2020 г. в среднем за год проходит 6–7 паводков с максимальными расходами воды выше затопления побочней (выше $280 \text{ м}^3/\text{с}$), при этом продолжительность таких расходов в пределах каждого паводка около 2 дней, а за год — в среднем 12–13 дней. Далее для ответа на вопрос, какие именно расходы определяют интенсивность деформаций, все четыре параметра стока будут использованы для установления связи со скоростью размыва берегов.

Интенсивность размыва берегов излучин. На рис. 4 приведена схема участка исследований, где отражена эволюция серии из 11 излучин р. Белой за 20-летний период с 2001 по 2020 г. Рисунок иллюстрирует постепенное развитие излучин с размывом вогнутых берегов, наращиванием изгибов и изменением их форм. На некоторых отрезках отмечалось спрямление излучин.

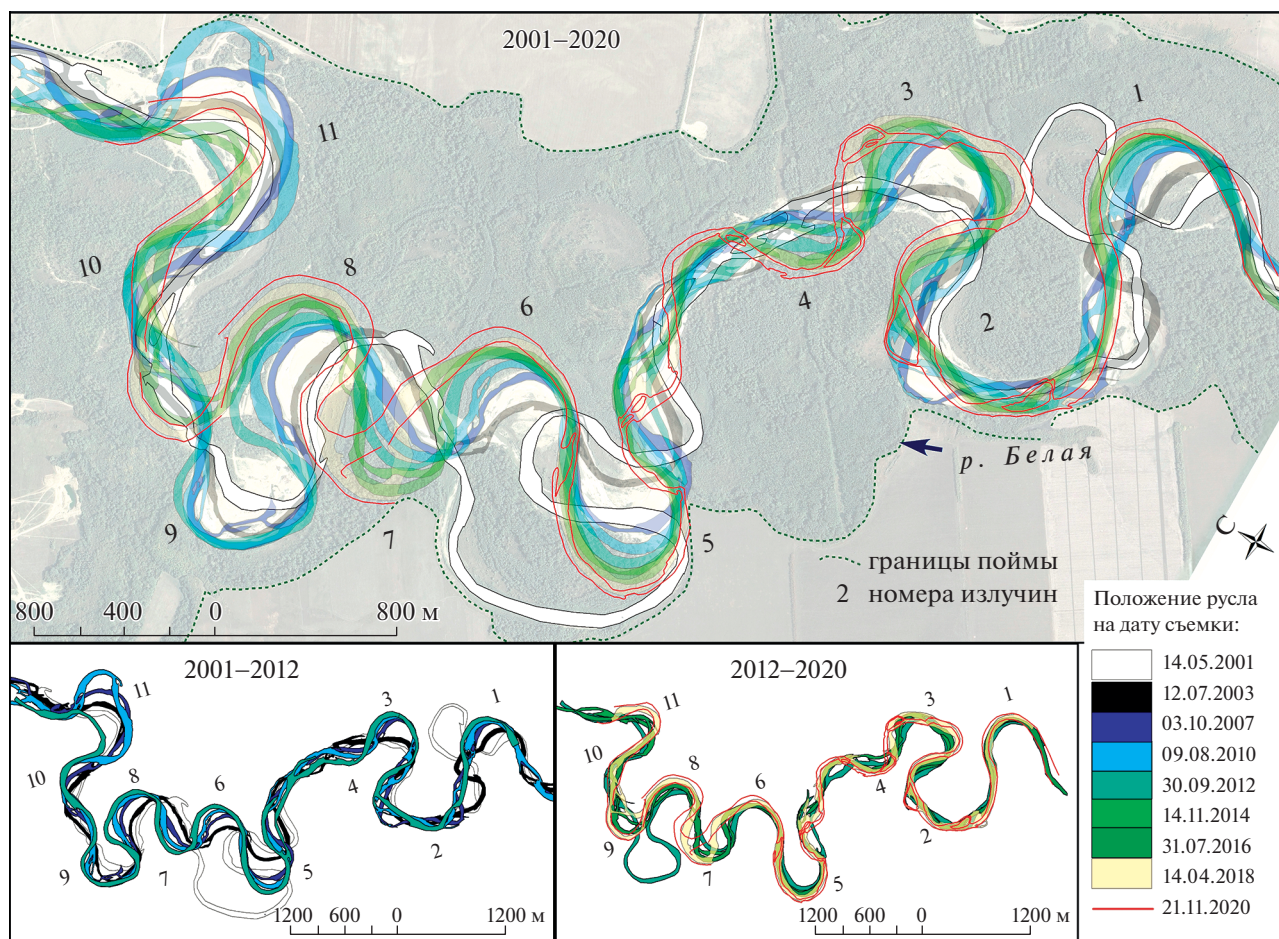


Рис. 4. Развитие излучин р. Белая за период 2001–2020 гг.; сопоставление по меженному руслу.

Для большинства излучин преобладает продольное смещение вниз по течению, за счет размыва вогнутого берега в нижних крыльях. Заметно, что движение излучин происходит неравномерно, что связано со стадией их развития, сменой формы и радиуса кривизны, а также с разнообразными локальными факторами. Исключения составляют излучины 1 и 5 с развитой синусоидальной формой и равномерным поперечным смещением изгиба.

В табл. 3 приведена величина размывов вогнутых берегов излучин — на сколько метров сместилась пойменная бровка за период времени. Показан средний и максимальный (в скобках) размыв в пределах каждой излучины. В последних столбцах показаны средние значения размыва вдоль всей серии излучин за рассматриваемый интервал времени и в пересчете на год. В нижней строке приведена рассчитанная средняя скорость размыва вогнутого берега каждой излучины за год по осреднению за 20 лет.

Установлено, что средняя скорость отступления бровки размываемых пойменных берегов за

год для всего участка составляет 23 м/год. При этом размывы значимо выше в многоводные периоды (например, за 2001–2003 гг. смыло 74 м поймы, т.е. 34 м/год) и существенно ниже в маловодные (так, за 2018–2020 гг. смыло 34 м поймы, т.е. 12 м/год).

В отдельные многоводные годы с количеством и продолжительностью паводков выше средней (например, 2002, 2003, 2011 гг.) максимальный размыв вогнутых берегов излучин достигал 70–80 м/год и более. В то же время в маловодные годы размывы фиксировались в пределах первых метров. В 2020 г. с низким половодьем и паводками размыв берегов для большинства излучин не превысил 5 м/год.

Как уже упоминалось выше, в среднем за год имело место 6–7 высоких паводков. Получено, что за каждый паводок размывается в среднем 3–5 м поймы. Максимальные отступления вогнутых берегов излучин на отдельных участках достигают 50–70 м и выше за одно половодье/паводок и отмечаются, когда высокие расходы воды держатся больше суток. Так, за одно многоводное полово-

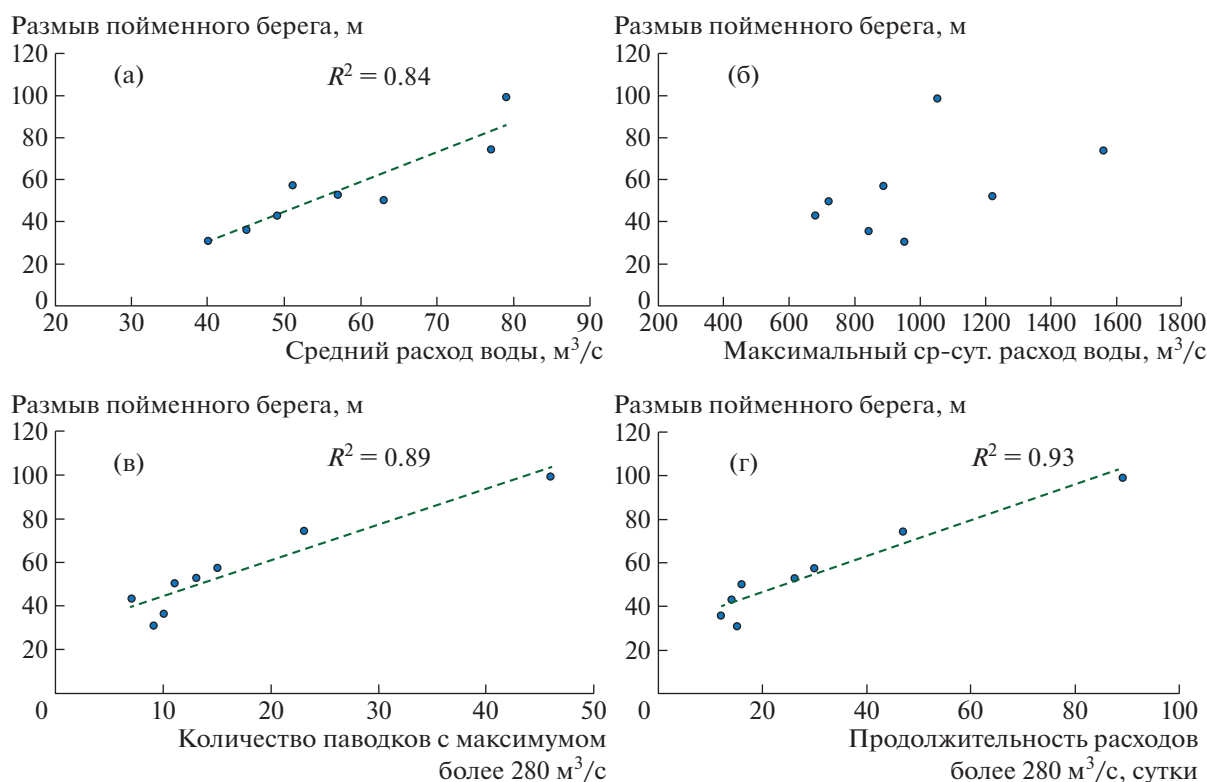


Рис. 5. Графики связи интенсивности размыва берегов и показателей стока воды: (а) — среднегодового расхода воды, $\text{м}^3/\text{с}$, (б) — максимального расхода воды, $\text{м}^3/\text{с}$, (в) — количества паводков, (г) — продолжительности расходов воды $280 \text{ м}^3/\text{с}$, сутки.

дые 2011 г. на излучине 4 (рис. 1, 4) размыв поймы левого вогнутого берега составил 70 м, как это было установлено в процессе мониторинга русловых процессов на газопроводах, пересекающих данный участок. Тогда развитие излучины 4 с интенсивным размывом поймы привело к размыву труб и их протяженным провисам (рис. 1, вставка 1).

В ряде опубликованных источников [12–19] также производилась оценка размыва берегов полугорных рек с гравелистым руслом. Размыв берегов оценивался в среднем от 2 до 8 м/год, максимальные размывы достигали 20–30 м/год. Получаем, что на рассматриваемом участке р. Белой излучины развиваются значимо интенсивнее, а скорость размыва берегов почти в 2 раза выше, чем на изученных ранее реках.

Связь параметров стока с размывами берегов. Для установления связи размывов берегов и выбранных параметров стока были построены соответствующие зависимости. Средние значения размыва берегов из табл. 3 были сопоставлены с показателями стока из табл. 2. На рис. 5 приведены графики связи, иллюстрирующие зависимости интенсивности размыва берегов от: а) среднегодового расхода воды, б) максимального расхода

воды, в) количества паводков с расходами выше $280 \text{ м}^3/\text{с}$ и г) продолжительности соответствующих расходов.

Рисунок 5, (а) иллюстрирует наличие связи между средним расходом воды за интервал времени и скоростью размыва берегов излучин. Полученную связь с $R^2 = 0.84$ можно назвать относительно устойчивой. На рис. 5, (б) показано отсутствие связи максимальных расходов воды с размывом берегов, что закономерно для рек с гребенчатым гидрографом и несколькими высокими паводками в год.

Если перейти к параметрам, учитывающим расходы воды выше затопления крупных гряд (побочней), то получим более устойчивые связи. На рис. 5, (в) приведена связь интенсивности размывов (с $R^2 = 0.89$) с количеством высоких паводков с максимальными расходами, превышающими $280 \text{ м}^3/\text{с}$. Как отмечалось выше, в среднем в год наблюдается 6–7 таких паводков.

На рис. 5, (г) показана аналогичная связь размыва берегов с продолжительностью расходов воды выше $280 \text{ м}^3/\text{с}$. В среднем за год наблюдается 12–13 дней с такими расходами, при этом за каждый день размывается до 1.5–2.0 м массива поймы. Из рассмотренных показателей водного сто-

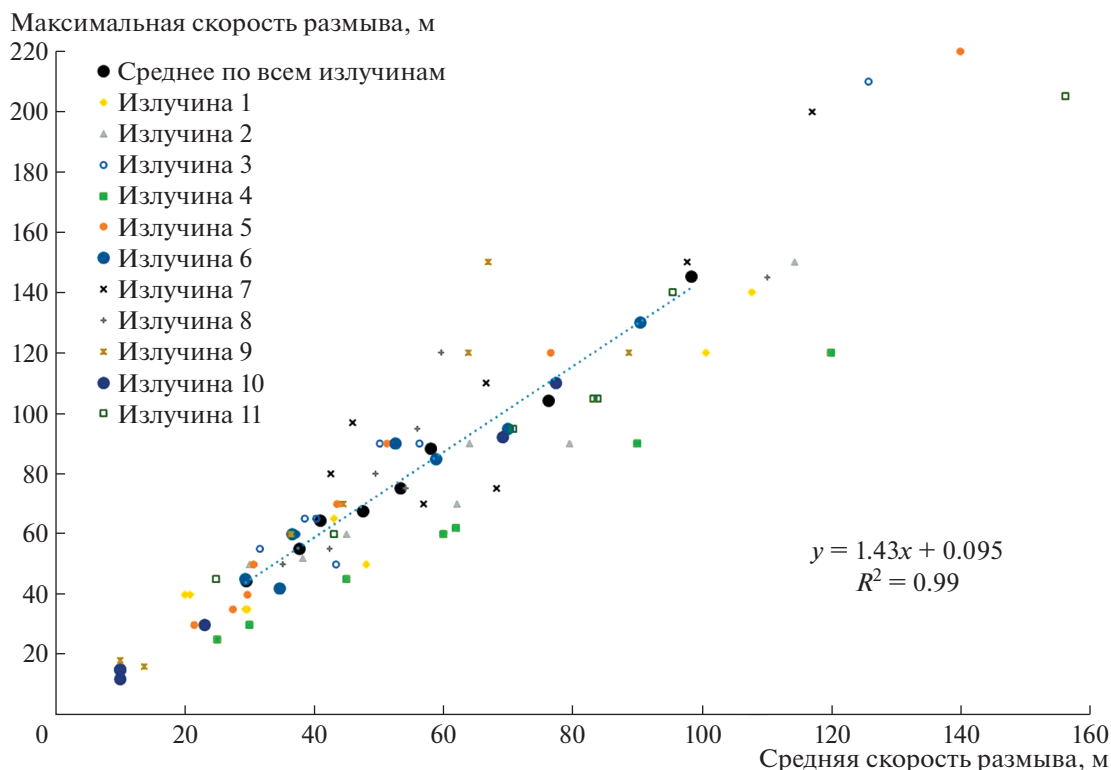


Рис. 6. Зависимость средних и максимальных скоростей размыва для каждой излучины и в среднем по всему участку.

ка связь продолжительности расходов воды выше 280 м³/с со скоростью размыва берегов оказалась наиболее тесной, с $R^2 = 0.93$.

Графики связи на рис. 5 проиллюстрированы для средних по фронту размыва значений из табл. 3. Близкие коэффициенты корреляции имеют место для связи тех же параметров стока с максимальными значениями размывов, приведенных в скобках в табл. 3. Одной из обнаруженных особенностей размыва берегов является устойчивая связь между средними и максимальными значениями размывов берегов для каждой излучины. На рис. 6 выделен тренд, полученный по связи средних и максимальных значений размывов для всей серии излучин, где коэффициент корреляции равен 0.99. Получено, что в среднем по участку максимальные значения в 1.4 раза превышают средние значения по фронту размыва. Например, если среднее отступление пойменной бровки составляет на излучине 50 м, то максимум составит 70 м, если среднее 70 м, то максимум составит 100 м. Разумеется, в пределах каждой излучины под воздействием локальных факторов, графики связи отличаются от осредненного тренда, однако тесная связь средних и максимальных показателей сохраняется.

Следует подчеркнуть, что связь размывов берегов с параметрами стока установлена для всей протяженности меандрирующего участка, состо-

ящего из 11 излучин. Если рассматривать полученные связи в рамках отдельных излучин, то устойчивой зависимости как на рис. 5 не получится (исключая разве что вышеупомянутые излучины 1 и 5). Это связано с тем, что на общий фон развития каждой излучины накладывается ее локальная специфика: стадия развития, форма излучины, динамика потока на смежных участках, антропогенные вмешательства, образование заломов и т.д. Поэтому адекватно оценить воздействие параметров стока на размывы берегов (рис. 5) возможно только на протяженном участке русла, включающем несколько форм русла.

Зависимость размыва берегов от различных показателей стока воды рассматривалась и ранее [1, 19, 24–27, 29–31]. Полученные в данной работе результаты вносят свой вклад в понимание процесса размыва берегов для полугорных рек. Показано, что для рек в схожих с Белой условиях размывы берегов определяются высокими паводками, с расходами воды, при которых полностью затопливаются крупные гряды. Наиболее тесные связи скоростей размыва берегов установлены с количеством (рис. 5, в) и продолжительностью (рис. 5, г) высоких паводков.

Влияние экстремальных паводков на русловые деформации. Роль экстремальных половодий/паводков в развитии русел велика как для равнинных, так и для полугорных рек. И если для русел

равнинных рек речь идет, как правило, об увеличении интенсивности направленных русловых деформаций, в частности размывов берегов [26, 28, 37–39], то на горных и полугорных реках экстремальные паводки часто становятся “руслоразрушающими” [2, 22, 40], коренным образом меняя русла.

На р. Белой механизм русловых деформаций существенно изменяется при прохождении выдающихся паводков с расходами воды редкой повторяемости. При затоплении поймы на сутки (и даже на несколько часов) высокие скорости течения способствуют быстрой разработке пойменных протоков, куда нередко перемещается основной сток. На меандрирующих участках р. Белой происходит спрямление излучин через прорву (по типу незавершенного меандрирования по терминологии ГГИ).

За весь период наблюдений за серией излучин р. Белой с 2001 по 2020 г. (рис. 4) наблюдалось несколько случаев спрямлений излучин. Спрямления происходили как вследствие размыва шеек петлеобразных излучин, так и при проработке спрямляющих рукавов на выпуклых берегах крутых сегментных излучин (формирование прорванных излучин).

Спрямление петлеобразных излучин путем смыкания вторичных изгибов типично для реки при условии отсутствия экстремальных паводков: в 2014 г. спрямилась излучина 7, в ближайшие годы предполагается спрямление излучины 5. По сопоставлению картографического материала с 1940-х годов, срок “жизни” излучин от появления изгиба до прорыва “петли” на р. Белой составляет 50–80 лет, незавершенного — менее.

Спрямление сегментных излучин, не достигших петлеобразной формы с образованием рукава на выпуклом берегу, в настоящее время имеет место в двух случаях — при экстремальных паводках или при искусственном спрямлении. Искусственное спрямление излучин на реке практикуется при угрозе размыва населенных пунктов, дорог, газопроводов и т.п. За рассматриваемый период были искусственно спрямлены излучина 11 (2011 г.) и излучина 4 (2014 г.). Последняя (рис. 1 и рис. 3) была спрямлена для защиты газопровода от размыва. Однако опыт спрямления на ранней стадии развития излучины оказался неудачен и излучина 4 вернулась в состояние до спрямления уже в 2015 г., разрушив ряд русловыправительных дамб. После очередного ремонта в 2020 г. те же газопроводы вновь были размывы (рис. 1, вставка 1). Подобные попытки остановить размывы берегов с применением берегоукрепительных и русловыправительных работ на Белой часто заканчиваются неудачей, защита или не работает, или имеет кратковременный эффект. Оптимальным решением является вынос инженерных сооружений за

пределы пояса руслоформирования, а в случае подводных трубопроводов — их заглубление ниже отметок предельного размыва на протяжении всего пояса руслоформирования.

Естественным путем спрямление крутых сегментных излучин (по типу незавершенного меандрирования) за последние 20 лет происходило на участке три раза и все три раза пришлось на экстремальный паводок 2002 г. 21 июня 2002 г. на рассматриваемом участке Белой среднесуточный расход достиг $1560 \text{ м}^3/\text{с}$ (мгновенный $1920 \text{ м}^3/\text{с}$). Причем высокие значения расходов фиксировались всего один день, в соседние даты среднесуточный расход составил 330 и $450 \text{ м}^3/\text{с}$. Однако этого оказалось достаточно для коренных изменений русла: три излучины из одиннадцати (т.е. почти 30%) спрямились через пойменные протоки. На рис. 4 видны изменения положения русла с 2001–2003 гг. в районе 1, 5 и 6 излучин.

Таким образом, экстремальные расходы воды, даже при кратковременном затоплении поймы, провоцируют радикальные изменения русла: спрямление излучин по схеме незавершенного меандрирования и изменение положения русла за счет перемещения потока в пойменные ложбины, староречья.

Другие факторы, определяющие горизонтальные деформации на полугорных реках. Выше показано, что горизонтальные деформации определяет преимущественно сток воды: интенсивность размывов берегов зависит от количества и продолжительности высоких паводков, а радикальные изменения русла — от наличия экстремальных паводков.

Понятно, что размыв берегов является двусторонним процессом и с одной стороны определяется гидродинамикой потока, а с другой — устойчивостью берегового откоса. Очевидно также, что на скорость размыва берегов влияет не только сток воды, но и другие факторы. Многие исследователи отмечают определяющую роль факторов морфологии русла (стадия развития изгибов, форма, радиус кривизны) и показателей устойчивости берега — свойств грунта, высоты берегов, формы откоса [15, 19, 29, 41, 42]. Для полугорного русла Белой выделить долю влияния всех этих факторов на фоне главного — стока воды — достаточно сложно, но можно отметить несколько особенностей.

В порядке убывания роли воздействия на горизонтальные деформации русла Белой можно указать следующие факторы: сток наносов, морфология русла, заломы деревьев и инженерные сооружения, сложение и высота берегов. Интересно, что на Белой пойменные и террасовые берега в диапазоне высот 2–4 м над межленным урезом размываются со схожей интенсивностью вне зависимости от состава грунтов (сочетания сугли-

нистых, галечных и песчаных слоев) и морфологии откоса. Более устойчивыми к размывам являются только высокие коренные берега (высотой 17–18 м), сложенные связными суглинистыми отложениями, где скорость размыва существенно ниже и составляет около 5–6 м/год. В целом, размыв берегов р. Белой определяется, в большей степени, гидродинамикой потока и факторами, направляющими поток, чем устойчивостью берегов.

Важный локальный фактор на горных и полугорных реках с залесенными берегами – заломы деревьев [44, 45]. Крупные заломы обычно формируются на приверхе отелей выпуклого берега при интенсивном размыве поймы выше по течению (рис. 1, вставка 3). Высота заломов достигает 4–5 м (что превышает отметки высокой поймы), протяженность – более 200 м, ширина – до 50 м. Выше заломов в результате массового осадения материала образуются поля песчано-галечного аллювия длиной около 200 м и шириной до 120 м. Кроме того, поступившие в поток стволы деревьев на спаде паводка выстилаются вдоль динамической оси потока и частично перекрываются наносами (рис. 1, вставка 2). В последующие паводки заломы участвуют в перераспределении стока между частями русла, нередко направляя поток в краевую часть русла и провоцируя усиление размыва берегов.

Изыскания на р. Белой показали, что в непосредственной близости к заламам может наблюдаться образование “ям”, дно которых находится ниже глубин плесов (до 1.5–3.0 м), или до 5–6 м ниже меженного уреза, а также усиление темпов размыва берегов до 10 м и более.

Опасные ситуации часто складываются, когда древесные остатки скапливаются у инженерных сооружений, оказавшихся на контакте с потоком (мостовых опор, размывных трубопроводов). На рис. 1 (вставка 1) приведен характерный пример в виде размывных труб газопроводов. В данном случае после оголения трубы сами стали локальным препятствием, местом скопления стволов деревьев, что вызвало переуглубление русла на 2.0 м и привело к аварийной ситуации.

Комбинация локальных факторов на фоне паводков может приводить к значимо более интенсивным размывам берегов, чем рассмотренные на данном участке (табл. 3). Так, например, на участке в районе г. Белореченска размыв вогнутого берега на излучине достиг 180 м в год, что почти в два раза больше максимальных размывов на рассмотренном участке. Это событие было связано с избытком и переложением наносов на перекате, с участием заломов деревьев. Подробнее воздействие стока наносов будет рассмотрено во второй статье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На р. Белой сток воды является определяющим фактором горизонтальных деформаций русла, в частности размывов берегов. Максимальные размывы зафиксированы во время прохождения высоких паводков при заполнении русла от гребней крупных гряд (побочней) до пойменных бровок.

На рассматриваемом участке р. Белой полное затопление крупных гряд происходит при расходах воды выше $280 \text{ м}^3/\text{с}$ во время высоких паводков. В среднем за год наблюдалось 6–7 высоких паводков; продолжительность указанных расходов составляла 12–13 сут. Средняя скорость отступления вогнутых берегов излучин р. Белой – 23 м/год. В отдельные многоводные годы с количеством и продолжительностью паводков выше средней максимальный размыв берегов достигал 70–80 м/год и более. В то же время в маловодные годы размывы фиксировались в пределах первых метров.

Установлено, что количество высоких паводков и их продолжительность имеют наиболее тесную связь со скоростью размыва берегов, по сравнению с другими параметрами стока (максимальными, средними, руслоформирующими расходами воды).

При прохождении экстремальных паводков с затоплением поймы механизм русловых процессов меняется, постепенное развитие излучин прерывается их внезапным спрямлением. В выдающийся паводок 2002 г. на участке из 11 излучин Белой три спрямились по размывной протоке через шпору излучины.

Наибольшие размывы дна и берегов на отдельных участках часто спровоцированы локальными факторами, одним из которых являются заломы деревьев.

Можно предположить, что для полугорных рек со слабоустойчивым руслом, протекающих в схожих с р. Белой условиях:

сток воды определяет горизонтальные деформации русла, а от колебаний стока зависит интенсивность деформаций, в частности размывы берегов;

размывы берегов осуществляются практически исключительно в многоводные фазы водного режима (половодье/паводки);

максимальная интенсивность размывов берегов наблюдается во время высоких паводков, при расходах воды, превышающих уровень крупных русловых гряд;

продолжительность прохождения расходов воды при уровнях в диапазоне от гребней крупных гряд до пойменных бровок определяет скорость горизонтальных деформаций;

локальные факторы, воздействующие на динамику потока, для отдельных участков русла являются определяющими, размывы берегов могут превышать фоновые в два раза и более;

экстремальные паводки, проходящие при затопленной пойме, провоцируют радикальные преобразования русел: спрямление излучин и изменение положения русла за счет перемещения потока в пойменные ложбины.

БЛАГОДАРНОСТИ

Материалы натурных исследований были получены в ходе мониторинга русловых процессов ООО “ЭКОГинжиниринг” на участках реки, которые пересекают переходы газопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
2. Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н. Гидроморфометрические характеристики горных рек. Фрунзе: Кыргызстан, 1968. 204 с.
3. Stoffel M., Wyzga B., and Marston R.A. Floods in mountain environments: A synthesis // *Geomorphology*. 2016. Vol. 272. P. 1–9.
4. Виноградова Н.Н., Виноградова О.В. Водность и процессы руслоформирования горных рек Кавказа в условиях современных изменений климата // Двадцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Пермь: ПГУ, 2013. С. 4–11.
5. Кушмен К., Назаров Н.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Русловые процессы на реках зон перехода от гор к равнинам и их регулирование // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 4. М.: МГУ, 2005. С. 116–129.
6. Wyzga B., Zawiejska J., and Hajdukiewicz H. Multi-thread rivers in the Polish. Carpathians: occurrence, decline and possibilities of restoration // *Quaternary International*. 2016. Vol. 415. P. 344–356.
7. Sear D.A. and Newson M.D. Environmental change in river channels: a neglected element. Towards geomorphological typologies, standards and monitoring // *The Science of the Total Environment*. 2003. No. 310. P. 17–23.
8. Завадский А.С., Морозова Е.А. Оценка опасных проявлений гидрологических и русловых процессов на участках горного и полугорного русла (на примере реки Катунь) // Современные проблемы эрозионных, русловых и устьевых процессов. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XXXI пленарного межвузовского координационного совещания. Архангельск: Изд. центр А3+, 2016. С. 106–107.
9. Kargapolova I.N. River channel response on runoff variability // *Advances in Geosciences*. 2008. Vol. 14. P. 309–316.
10. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Изменение речных русел за историческое время // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 1. М.: Науч. мир, 2006. С. 409–438.
11. Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., and Borisova O.K. Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European Plain) during the Late Glacial period // *Geomorphology*. 2009. No. 113. P. 137–157.
12. Larsen E.W., Fremier A.K., and Greco S.E. Cumulative effective stream power and bank erosion on the Sacramento River, California, USA // *Journal of the American Water Resources Association*. 2006. Vol. 42. No. 4. P. 1077–1097.
13. Nanson G.C. and Hickin E.J. A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada // *Geological Society of America Bulletin*. 1986. No. 97. P. 497504.
14. Brice J.C. Stream Channel Stability Assessment, January 1982, Final Report. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration Report RHW/82-021. Washington, D.C., 1982. 41 p.
15. Hickin E.J. and Nanson G.C. Lateral migration rates of river bends // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984. Vol. 110. No. 11. P. 1557–1567.
16. Bartholdy J. and Billi P. Morphodynamics of a pseudo-meandering gravel bar reach // *Geomorphology*. 2002. No. 42. P. 293–310.
17. Odgaard A.J. Streambank erosion along two rivers in Iowa // *Water Resources Research*. 1987. No. 23. P. 1225–1236.
18. Geomorphic Analysis of Sacramento River, Phase II Report: Geomorphic Analysis of Reach from Colusa to Red Bluff Diversion Dam, River Mile 143 to River Mile 243 // Water Engineering & Technology, Inc. (WET), prepared for U.S. Army Corps of Engineers, Sacramento District, Contract No. DACW05-87-C-0094, 1990.
19. Krasnoshchekov S.Yu. Determining lateral river channel activity with respect to safety of pipeline crossings. Doctoral Thesis. University of Southampton, School of Geography, 2009. 218 p.
20. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М.: ДЭКС-пресс, 2003. 352 с.
21. Хаширова Т.Ю. Защитные сооружения для предотвращения чрезвычайных ситуаций на горных реках Северного Кавказа // Экология и промышленность России. 2006. № 12. С. 16–18.
22. Горелиц О.В., Землянов И.В., Павловский А.Е., Ислаев Т.С. Русловые деформации и перераспределение стока на устьевом участке р. Терек после катастрофического паводка 2002 г. // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 677–685.
23. Правила эксплуатации Белореченского и Ганжинского водохранилищ в условиях полного заиливания. Книга I. Правила использования водных ресурсов. Краснодар: ОАО Проектно-изыскательский институт “Кубаньводпроект”, 2006 г.

24. *Wolman M.G.* Factors influencing erosion of a cohesive river bank // *Am. J. Sci.* 1959. No. 257. P. 204–216.
25. *Knighton A.D.* Riverbank erosion in relation to stream-flow conditions, River Bollin-Dean, Cheshire // *East Midland Geographer*. 1973. No. 5. P. 416–426.
26. *Hooke J.M.* An analysis of the processes of river bank erosion // *Journal of Hydrology*. 1979. No. 42. P. 39–62.
27. *Беркович К.М., Власов Б.Н.* Особенности русловых процессов на реках Нечерноземной зоны РСФСР // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 1982. № 3. С. 28–34.
28. *Завадский А.С., Чалов Р.С.* Условия формирования и морфология свободных излучин на реках Северной Евразии // *Геоморфология*. 2000. № 4. С. 88–95.
29. *Walker M. and Rutherford I.* An approach to predicting rates of bend migration in meandering alluvial streams // *Proceedings of the Second Australian Stream Management Conference: The Challenge of Rehabilitating Australia's Streams*, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Adelaide, 1999. P. 659–665.
30. *Julian J.P. and Torres R.* Hydraulic erosion of cohesive riverbanks // *Geomorphology*. 2006. No. 76 (1–2). P. 193–206.
31. *Costa J.E. and O'Connor J.E.* Geomorphologically effective floods // *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology AGU Geophysical Monograph*. Vol. 89. Washington, DC: American Geophysical Union, 1995. P. 45–56.
32. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
33. *Чалов Р.С.* Руслоформирующие расходы воды // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2006. № 1. С. 11–19.
34. *Борщенко Е.В., Чалов Р.С.* Руслоформирующие расходы воды и морфодинамика русел рек российской части бассейна Амура // *География и природные ресурсы*. 2010. № 2. С. 90–99.
35. *Aly El-Dien A., Takebayashi H., and Fujita M.* Erosion and collapse of riverbanks under different flood conditions // *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*. 2015. Vol. 59. P. 133–138.
36. *Беркович К.М., Злотина Л.В., Турыкин Л.А.* Размыв речных берегов: факторы, механизм, деятельность человека // *Геоморфология*. 2019. № 2. С. 3–17.
37. *Miller A.J.* Flood hydrology and geomorphic effectiveness in the central Appalachians // *Earth surface processes and landforms*. 1990. Vol. 15. P. 119–134.
38. *Morche D., Schmidt K.-H., Heckmann T., and Haas F.* Hydrology and geomorphic effects of a high-magnitude flood in an Alpine river // *Geografiska Annaler Series A Physical Geography*. 2007. No. 89 (1). P. 5–19.
39. *Magilligana F.J., Buraasb E.M., and Renshaw C.E.* The efficacy of stream power and flow duration on geomorphic responses to catastrophic flooding // *Geomorphology*. 2015. No. 228. P. 175–178.
40. *David J. and Schmidt J.* The geomorphic effectiveness of a large flood on the Rio Grande in the Big Bend region: Insights on geomorphic controls and post-flood geomorphic response // *Geomorphology*. 2003. No. 201. P. 183–198.
41. *Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В.* Речные излучины. М.: МГУ, 2004. 371 с.
42. *Thorne C.R.* Bank erosion and meander migration of the Red and Mississippi Rivers, USA // *Hydrology for the Water Management of Large River Basins (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991)*. IAHS Publ. No. 201. Vienna: IAHS, 1991. P. 301–313.
43. *Friedman J.M. and Lee V.J.* Extreme floods, channel change, and riparian forests along ephemeral streams // *Ecol. Monogr.* 2002. No. 72. P. 409–425.
44. *Comiti F., Lucía A., and Rickenmann D.* Large wood recruitment and transport during large floods: A review // *Geomorphology*. 2016. Vol. 269. P. 23–29.
45. *Чалов Р.С., Ермакова А.С., Есин Е.В.* Речные заломы: руслоформирующая и экологическая роль // *Вестник Моск. Ун-та. Сер. 5. География*. 2010. № 6. С. 25–31.

Channel processes at a piedmont river (case study the Belaya River, Western Caucasus) (paper 1. Lateral channel migrations and water runoff as their main factor)

I. N. Kargapolova^{a,#} and I. V. Krylenko^{b,##}

^a*ECONGengineering LLC, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: ikargapolova@gmail.com*

^{##}*E-mail: i-krylenko@yandex.ru*

The paper investigates channel deformations at the Belaya River – a piedmont river in the Western Caucasus with low-stability channel crossing accumulative piedmont plain. The goal of this paper is to assess lateral channel migrations and vertical channel deformations and their main drivers: runoff fluctuations and sediment load using a quantitative analysis. The research is based on comparison of remote sensing data, in-situ observations and drone imagery collected in 2001–2020. We determined the relations between bank erosion rate and runoff fluctuations. The rate of bank erosion is closely related to the number and duration of bankfull discharge floods. The rate of bank erosion along meandering part of the Belays River is high, mean rate is more than 20 m per year whereas maximum rate is up to 70–80 m per year. The maximum rate of bank erosion is observed during high floods, when water level is varied from the tops of large ripples to floodplain edges. During rare extreme floods, when water inundates the floodplain, the mechanism of channel defor-

mations that modifies and radically changes the channel is taking place. During such episodes the main stream moves to the floodplain channels, and bends get straightened.

Keywords: piedmont rivers, bank erosion, water runoff, meandering

ACKNOWLEDGMENTS

The field data has been collected during monitoring of the channel processes organized by ECONGengineering LLC for the river sections that cross by the gas pipelines.

REFERENCES

1. Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* (Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 1. Riverbed processes, mechanism, forms of manifestations and conditions of formations of riverbeds). Moscow: LKI (Publ.), 2008. 608 p. (in Russ.)
2. Talmaz V.F. and Kroshkin A.N. *Gidromorfometricheskie kharakteristiki gornykh rek* (Hydromorphological characteristics of mountain rivers). Frunze: Kyrgyzstan (Publ.), 1968. 204 p. (in Russ.)
3. Stoffel M., Wyżga B., and Marston R.A. Floods in mountain environments: A synthesis. *Geomorphology*. 2016. Vol. 272. P. 1–9.
4. Vinogradova N.N. and Vinogradova O.V. *Vodnost' i protsessy rusloformirovaniya gornykh rek Kavkaza v usloviyakh sovremennykh izmenenii klimata* (Water content and channel formation processes in mountain rivers of the Caucasus in the context of modern climate changes). *Dvadsat' vos'moe plenarnoe mezhdunarodnoe koordinatsionnoe soveshchanie po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov*. Perm': PGU (Publ.), 2013. P. 4–11 (in Russ.)
5. Kshemen' K., Nazarov N.N., Chalov R.S., and Chernov A.V. *Ruslovye protsessy na rekakh zon perekhoda ot gor k ravninam i ikh regulirovanie* (Channel processes on rivers in the transition zones from mountains to plains and their regulation). *Eroziionnyye i ruslovyye protsessy. Vol. 4*. Moscow: MSU (Publ.), 2005. P. 116–129. (in Russ.)
6. Wyżga B., Zawiejska J., and Hajdukiewicz H. Multi-thread rivers in the Polish. Carpathians: occurrence, decline and possibilities of restoration. *Quaternary International*. 2016. Vol. 415. P. 344–356.
7. Sear D.A. and Newson M.D. Environmental change in river channels: a neglected element. Towards geomorphological typologies, standards and monitoring. *The Science of the Total Environment*. 2003. No. 310. P. 17–23.
8. Zavadskii A.S. and Morozova E.A. *Otsenka opasnykh proyavlenii gidrologicheskikh i ruslovykh protsessov na uchastkakh gornogo i polugornogo rusla (na primere reki Katun')* (Assessment of hazardous manifestations of hydrological and channel processes in sections of the mountain and semi-mountain channel (for example, the Katun River)). *Sovremennye problemy erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem i XXXI plenarnogo mezhdunarodnogo koordinatsionnogo soveshchaniya* (Modern problems of erosion, channel and estuarine processes. Materials of the All-Russian Scientific Conference with International Participation and XXXI Plenary Interuniversity Coordination Meeting). Arkhangel'sk: Izdatel'skiy tsentr A3+ (Publ.), 2016. P. 106–107 (in Russ.)
9. Kargapolova I.N. *River channel response on runoff variability* (River channel response on runoff variability). *Advances in Geosciences*. 2008. Vol. 14. P. 309–316. (in Russ.)
10. Berkovich K.M., Chalov R.S., and Chernov A.V. *Izmenenie rechnykh rusel za istoricheskoe vremya* (Changes in river channels over historical time). *Sovremennye global'nye izmeneniya prirodnoi sredy. Vol. 1*. Moscow: Nauchnyy mir (Publ.), 2006. P. 409–438. (in Russ.)
11. Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., and Borisova O.K. Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European Plain) during the Late Glacial period. *Geomorphology*. 2009. No. 113. P. 137–157.
12. Larsen E.W., Fremier A.K., and Greco S.E. Cumulative effective stream power and bank erosion on the Sacramento River, California, USA. *Journal of the American Water Resources Association*. 2006. Vol. 42. No. 4. P. 1077–1097.
13. Nanson G.C. and Hickin E.J. A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada. *Geological Society of America Bulletin*. 1986. No. 97. P. 497–504.
14. Brice J.C. *Stream Channel Stability Assessment, January 1982, Final Report*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration Report FHWA/RD-82/021, 1982. 41 p.
15. Hickin E.J. and Nanson G.C. Lateral migration rates of river bends. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984. Vol. 110. No. 11. P. 1557–1567.
16. Bartholdy J. and Billi P. Morphodynamics of a pseudo-meandering gravel bar reach. *Geomorphology*. 2002. No. 42. P. 293–310.
17. Odgaard A.J. Streambank erosion along two rivers in Iowa. *Water Resources Research*. 1987. No. 23. P. 1225–1236.
18. Geomorphic Analysis of Sacramento River, Phase II Report: Geomorphic Analysis of Reach from Colusa to Red Bluff Diversion Dam, River Mile 143 to River Mile 243. *Water Engineering & Technology, Inc. (WET), prepared for U.S. Army Corps of Engineers, Sacramento District, Contract No. DACW05-87-C-0094*, 1990.
19. Krasnoshchekov S.Yu. *Determining lateral river channel activity with respect to safety of pipeline crossings*. Doctoral Thesis. University of Southampton, School of Geography, 2009. 218 p.
20. Vorob'ev Yu.L., Akimov V.A., and Sokolov Yu.I. *Katastroficheskie navodneniya nachala XXI veka: uroki i vyvody* (Catastrophic floods of the early 21st century:

- lessons and conclusions). Moscow: Deko-Press (Publ.), 2003. 352 p. (in Russ.)
21. Khashirova T.Yu. *Zashchitnye sooruzheniya dlya predotvrashcheniya chrezvychaynykh situatsii na gornyykh rekakh Severnogo Kavkaza* (Protective structures to prevent emergency situations on mountain rivers of the North Caucasus). *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2006. No. 12. P. 16–18. (in Russ.)
 22. Gorelits O.V., Zemlyanov I.V., Pavlovskii A.E., and Il'laev T.S. *Ruslovye deformatsii i pereraspredelenie stoka na ust'evom uchastke r. Terek posle katastroficheskogo pavodka 2002 g.* (Channel deformations and flow redistribution at the mouth of the Terek river after the catastrophic flood of 2002). *Vodnye resursy* (Water Resources). 2006. Vol. 33. No. 6. P. 677–685. (in Russ.)
 23. *Pravila ekspluatatsii Belorechenskogo i Ganzhinskogo vodokhranilishch v usloviyakh polnogo zaileniya. Kniga I. Pravila ispol'zovaniya vodnykh resursov* (Rules for the operation of the Belorechenskoye and Ganzhinskoye reservoirs in conditions of complete siltation. Book I. Rules for the use of water resources). Krasnodar: OAO Proektno-izyskatel'skii institut "Kuban'vodproekt", 2006. (in Russ.)
 24. Wolman M.G. Factors influencing erosion of a cohesive river bank. *Am. J. Sci.* 1959, Vol. 257. P. 204–216.
 25. Knighton A.D. Riverbank erosion in relation to stream-flow conditions, River Bollin-Dean, Cheshire. *East Midland Geographer*. 1973. No. 5. P. 416–426.
 26. Hooke J.M. An analysis of the processes of river bank erosion. *Journal of Hydrology*. 1979. No. 42. P. 39–62.
 27. Berkovich K.M. and Vlasov B.N. *Osobennosti ruslovykh protsessov na rekakh Nechernozemnoi zony RSFSR* (Features of channel processes on the rivers of the Nonchernozem zone of the RSFSR). *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 1982. No. 3. P. 28–34. (in Russ.)
 28. Zavatskii A.S. and Chalov R.S. *Usloviya formirovaniya i morfologiya svobodnykh izluchin na rekakh Severnoi Evrazii* (Formation conditions and morphology of free bends on the rivers of Northern Eurasia). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2000. No. 4. P. 88–95. (in Russ.)
 29. Walker M. and Rutherford I. An approach to predicting rates of bend migration in meandering alluvial streams. *Proceedings of the Second Australian Stream Management Conference: The Challenge of Rehabilitating Australia's Streams*, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Adelaide. 1999. P. 659–665.
 30. Julian J.P. and Torres R. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology*. 2006. Vol. 76 (1–2). P. 193–206.
 31. Costa J.E. and O'Connor J.E. Geomorphologically effective floods. *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology AGU Geophysical Monograph Vol. 89*. Washington, DC: American Geophysical Union. 1995. P. 45–56.
 32. Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* (River bed and erosion in its basin). Moscow: Izd-vo AN SSSR (Publ.), 1955. 347 p. (in Russ.)
 33. Chalov R.S. *Rusloformiruyushchie raskhody vody* (Channel-forming water flows). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*. 2006. No. 1. P. 11–19. (in Russ.)
 34. Borshchenko E.V. and Chalov R.S. *Rusloformiruyushchie raskhody vody i morfodinamika rusel rek rossiiskoi chasti basseina Amura* (Channel-forming water discharges and morphodynamics of river channels in the Russian part of the Amur basin). *Geografiya i prirodnye resursy* (Geography and Natural Resources). 2010. No. 2. P. 90–99. (in Russ.)
 35. Aly El-Dien A., Takebayashi H., and Fujita M. Erosion and collapse of riverbanks under different flood conditions. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*. 2015. Vol. 59. P. 133–138.
 36. Berkovich K.M., Zlotina L.V., and Turykin L.A. *Razmyv rechnykh beregov: faktory, mekhanizm, deyatel'nost' cheloveka* (Erosion of river banks: factors, mechanism, human activity). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2019. No. 2. P. 3–17. (in Russ.)
 37. Miller A.J. Flood hydrology and geomorphic effectiveness in the central Appalachians. *Earth surface processes and landforms*. 1990. Vol. 15. P. 119–134.
 38. Morche D., Schmidt K.-H., Heckmann T., and Haas F. Hydrology and geomorphic effects of a high-magnitude flood in an Alpine river. *Geografiska Annaler Series A Physical Geography*. 2007. No. 89(1). P. 5–19.
 39. Magilligan F.J., Buraas E.M., and Renshaw C.E. The efficacy of stream power and flow duration on geomorphic responses to catastrophic flooding. *Geomorphology*. 2015. No. 228. P. 175–178.
 40. David J. and Schmidt J. The geomorphic effectiveness of a large flood on the Rio Grande in the Big Bend region: Insights on geomorphic controls and post-flood geomorphic response. *Geomorphology*. 2003. No. 201. P. 183–198.
 41. Chalov R.S., Zavatskii A.S., and Panin A.V. *Rechnye izluchiny* (River meanders). Moscow: MGU (Publ.), 2004. 371 p. (in Russ.)
 42. Thorne C.R. Bank erosion and meander migration of the Red and Mississippi Rivers, USA. *Hydrology for the Water Management of Large River Basins (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991)*. IAHS Publ. no. 201. Vienna: IAHS. 1991. P. 301–313.
 43. Friedman J.M. and Lee V.J. Extreme floods, channel change, and riparian forests along ephemeral streams. *Ecol. Monogr.* 2002. No. 72. P. 409–425.
 44. Comiti F., Lucía A., and Rickenmann D. Large wood recruitment and transport during large floods: A review. *Geomorphology*. 2016. Vol. 269. P. 23–29.
 45. Chalov S.R., Ermakova A.S., and Esin E.V. *Rechnye zalomy: rusloformiruyushchaya i ekologicheskaya rol'* (River folds: channel-forming and ecological role). *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2010. No. 6. P. 25–31. (in Russ.)