

УДК 627.152.122

РАЙОНИРОВАНИЕ ОБЬ-ИРТЫШСКОГО БАССЕЙНА ПО УСЛОВИЯМ РАЗМЫВА БЕРЕГОВ РЕК

© 2023 г. А. А. Куракова*

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

**e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

Поступила в редакцию 17.03.2022 г.

После доработки 17.05.2022 г.

Принята к публикации 28.12.2022 г.

Размывы берегов средних и больших рек Обь-Иртышского бассейна представляют реальную и потенциальную угрозу для их освоения. Средние скорости размыва берегов на реках бассейна изменяются от 1.2 до 2.4 м/год, максимальные — 2.1–12.7 м/год. При свободных и относительно однородных условиях формирования русел (широкие поймы, сложенные песчаными отложениями) рассматриваемая территория в разных ее частях имеет отличия по режиму стока воды и наносов. С увеличением водоносности, косвенным показателем которой является возрастание порядка рек, повышается интенсивность горизонтальных русловых деформаций. Геолого-геоморфологические условия формирования русла (ширина днища долины и влияние коренных берегов) наравне с гидроклиматическими факторами оказывают влияние на темпы смещения русел. По условиям размыва берегов в Обь-Иртышском бассейне выделяется семь районов, каждый из которых характеризуется различными интенсивностью русловых деформаций и гидролого-морфологическими зависимостями, связывающими показатели скорости и протяженности фронтов размыва берегов с параметрами форм русел и водности потока. Протяженность размываемых берегов и скорости их отступления зависят от формы русла, определяющей гидравлические характеристики потока. Скорости размыва берегов растут с увеличением степени развитости излучин, снижаясь при $l/L > 1.5–1.6$ (l — длина, L — шаг излучин русла и русел рукавов), водности реки и снижаются в ее рукавах из-за рассредоточения стока. Фронт размыва, при прочих равных условиях, длиннее у более пологих излучин. Коренные берега отступают в основном из-за развития оползней и осыпей, провоцируемых воздействием на них потока.

Ключевые слова: русловые процессы, размывы берегов, излучины, разветвления, скорость размыва, фронт размыва

DOI: 10.31857/S2587556623020061, EDN: KFRWCP

ВВЕДЕНИЕ

Изучение размывов берегов, широко распространенных на реках Обь-Иртышского бассейна и создающих реальную угрозу для населенных пунктов и инженерных сооружений, имеет важное научное и прикладное значение (Knighton, 1998; Schumm, 1977). Свободные условия развития русловых деформаций, наличие однородных легкоразмываемых, преимущественно песчано-легкосуглинистых отложений в пределах лесной зоны Западно-Сибирской равнины обуславливают активное отступление берегов вследствие их размыва. Несмотря на это, внимание к этим опасным проявлениям русловых процессов на Оби, Иртыше, в особенности на их притоках, недостаточно. Реки Среднего Приобья были частью Великого водного пути, который вел из г. Тобольска в Китай через Восточную Сибирь (Крутовский, Лыготин, 2001). Поэтому, начиная с XVII в. пери-

одически появлялись описания, съемки и карты русел, в которых, в том числе, отмечались размываемые берега на Кети, Чулыме и Томи (Лыготин, 1989). В XIX в. при строительстве Обь-Енисейского канала проводились дополнительные изыскания правых притоков средней Оби (Кети, Тыма и Ваха) (Крутовский, Лыготин, 2001). В конце XIX — начале XX в. подробные описания и карты рек составлялись для Тобола и Туры (Янышев, 1885). Исследования на реках Томской области, полученные на основе данных стационарных наблюдений в середине XX в., а позднее — анализа аэро- и космических снимков с применением современных ГИС-технологий в настоящее время, посвящены в основном темпам и протяженности размываемых берегов, но без связи их с морфологией русла, его параметрами, характеристиками структуры потока и водного режима (Земцов, Бураков, 1966; Сурков и др., 2018). Ис-

ключение составили отдельные работы по Чулыму, Кети (Вершинин и др., 2018) и Ваху (Коркин, Исыпов, 2018), в которых на отдельных участках этих рек оценивались размывы берегов на излучинах с разными параметрами (длиной, шагом, степенью развитости) и с учетом водоносности рек. Аналогичные исследования выполнялись для рек центра ЕТР со среднегодовыми расходами воды от <50 до >1000 м³/с (Камалова, 1988), малых рек Прибалтики, для которых фиксировались отличия в переформированиях берегов в зависимости от их геологического строения и особенностей водного режима (Эберхардс, 1986). Размывы берегов на двух крупнейших реках бассейна — Оби и Иртыше — рассмотрены в отдельных публикациях (Куракова, Чалов, 2020, 2019). Они посвящены новому подходу изучения закономерностей размыва берегов, основанному на гидролого-морфологическом анализе, позволяющем выявить их зависимости от параметров излучин русла, излучин рукавов раздвоенного русла и русловых разветвлений (эти исследования выполнялись в среднем и нижнем течении Оби) как отражение гидравлической структуры потока при различной водности рек и их рукавов.

Задача данной статьи — дать анализ распространения размывов берегов на крупных притоках Оби и Иртыша, выявить связи между их количественными характеристиками и параметрами излучин, влияние на них гидрологических факторов и других природных условий развития русловых деформаций.

ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования размывов берегов в Обь-Иртышском бассейне были выбраны средние и большие реки, среднегодовые расходы воды которых превышают 100 м³/с, что обуславливает достаточную ширину рек для их дешифрирования, оцифровки и вычисления характеристик размыва берегов при имеющемся разрешении доступных космических снимков (от 10 до 30 м) и временном отрезке от 13–18 до 30–46 лет. Размывы берегов были получены на основе сопоставления разновременных космических снимков серий “Sentinel-2”, “Landsat 4, 5 TM”, “Landsat 7”, “Landsat 1, 2 MSS” за два временных интервала: 1973–1989 и 2001–2006 гг. — 2016–2021 гг. Для них применялся новый подход, позволяющий в ускоренном автоматическом режиме в программе ГИС ArcGIS Desktop получить данные о средних ($C_{\text{ср}}$, м/год) и среднемаксимальных ($C_{\text{срmax}}$, м/год) скоростях отступления и протяженности размываемых берегов ($L_{\text{фр}}$, км) (Завадский и др., 2019). Космические снимки также были использованы для получения морфологических параметров излучин — степени

развитости (l/L), радиусов кривизны (r , км) и шагов ($L_{\text{изл}}$, км), используемых при гидролого-морфологическом анализе (Чалов и др., 2004). Разрешение космических снимков, временные интервалы и точность методики определяют пороговое значение определяемых скоростей размыва берегов — от 1 м/год для большинства рек за исключением рр. Тыма и Васюгана, для которых ввиду сравнения небольшого временного интервала (13 и 18 лет) оно составляет 1.5 м/год.

Среди притоков Оби были выбраны следующие реки: Томь (от с. Яр до устья, 120–0 км), Чулым (от с. Зырянское до устья, 400–0 км), Кеть (от устья р. Орловки до устья, 556–0 км), Тым (от устья р. Косец до устья, 311–0 км), Вах (от устья р. Асесьеган до устья, 771–0 км), Тромъеган (от устья р. Нятлонгаян до устья, 389–0 км), Аган (от устья р. Лагрньеган до устья, 373–0 км), Лямин (от устья р. Лямин 3-й до устья, 277–0 км), Казым (от устья р. Куръех до устья, 444–0 км), Полуй (от истока до устья, 397–0 км), Парабель (от д. Чановка до устья, 246–0 км), Васюган (от с. Катильга до устья, 470–0 км), Большой Юган (от устья р. Липикьяха до устья, 294–0 км) и Северная Сосьва (от пгт Игрим до устья, 153–0 км). Среди рек Иртышского бассейна рассматривались Демьянка (от устья р. Большой Куньяк до устья, 311–0 км), Тобол (от устья р. Исеть до устья, 434–0 км), Тура (от устья р. Тагил до устья, 659–0 км), Тавда (от истока до устья, 730–0 км), Конда (от устья р. Вор-Я до устья, 735–0 км). Все они на рассматриваемых участках протекают в пределах лесной зоны в сходных геолого-геоморфологических условиях. Это — равнинные реки с небольшими уклонами, относительно однородным литологическим составом аллювиальных отложений (пески, супеси и легкие суглинки), слагающих пойму и надпойменные террасы (Западная ..., 1963). Все реки в основном свободно меандрируют, часто встречаются спрямленные излучины, образовавшиеся при встречном размыве берегов на их крыльях, реже — прорванные. На многих реках (Томь, Чулым, Кеть, Тым, Вах, Тромъеган, Казым, Полуй, Васюган, Большой Юган, Северная Сосьва, Тура и Конда) встречаются одиночные и пойменно-русловые разветвления, а на Кети, Вахе, Казыме и Конде — раздвоенные русла. Все рассматриваемые реки находятся в зоне избыточного увлажнения: количество среднегодовых осадков варьируется от 400 до 600 мм, снижаясь к северу и к югу (Западная ..., 1963). По водному режиму они относятся к западносибирскому типу [по Б.Д. Зайкову (1946)] — растянутое весеннее половодье, повышенный летне-осенний сток и глубокая зимняя межень (табл. 1).

Во время весеннего половодья, когда проходят руслоформирующие расходы воды $Q_{\text{ф}}$, наиболее интенсивны изменения береговой линии благо-

даря размыву берегов. Для всей рассматриваемой территории они проходят в основном при затопленной пойме, за исключением Томи и Чулыма, на которых Q_{ϕ} проходит в границах пойменных бровок (Чалов, 1979). Отличительной особенностью исследуемой территории является ее заболоченность. Она оказывает влияние на водный режим рек, уменьшает объем поступающих в реки наносов, и, как следствие, — снижение темпов размыва берегов (Евсеев, Земцов, 1990). Важную роль в русловых переформированиях и размывах берегов играют ледовые явления. Так, на р. Томи во время ледохода могут значительно увеличиваться скорости отступления берегов из-за разрушения их льдинами (Беркович и др., 2015). Специфический фактор разрушения берегов — лесные заломы на таежных реках, например, в бассейне р. Кети (Евсеев, Земцов, 1990). Существуют разные взгляды на влияние многолетнемерзлых грунтов на интенсивность переформирования берегов: ограничивающая роль мерзлоты из-за блокирования их обрушения при воздействии потока (Чалов, 2008), преобладание глубинной над боковой эрозией (Горбачский, 1935) и наоборот — исключительность боковой эрозии и значительное ускорение процесса при сезонном оттаивании вечной мерзлоты (Земцов, 1976). Однако в Обь-Иртышском бассейне этот фактор проявляется только на самых северных реках (Полуй, Собь и др.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важнейшим фактором, оказывающим влияние на размывы берегов, является сток воды (Hemmelder et al., 2018). Небольшое количество гидрологических постов на изучаемых реках не позволяет провести полноценный анализ связи между характеристиками стока и размывами берегов. В связи с этим использовался косвенный показатель — порядок реки (N). Он характеризует изменение вниз по течению размеров реки и расходов воды. Порядок реки рассчитывался по схеме А.Е. Шайдеггера в интерпретации Н.И. Алексеевского (2004) по формуле $N = \lg_2 P + 1$ (P — количество водотоков с длиной меньше 10 км). Связь между среднегодовыми расходами воды ($Q_{\text{ср}}$, м³/с) и порядками рек (N) Обь-Иртышского бассейна описывается по нижней огибающей, в общем соответствуя экспоненциальным уравнением вида $Q_{\text{ср}} = ae^{bN}$ (корреляционное отношение — 0.8) (рис. 1), причем для каждой реки можно провести свою зависимость общего увеличения водности при возрастании порядка.

На основе тесной связи между водоносностью ($Q_{\text{ср}}$) и порядком (N) отдельных рек внутри Обь-Иртышского бассейна была создана карта районов, объединяющих реки со схожими условиями

Таблица 1. Характеристики рек Обь-Иртышского бассейна

Река	F , км ²	$Q_{\text{ср}}$, м ³ /с	$Q_{\text{макс}}$, м ³ /с	N
Томь	62000	1100	13600	15.65
Чулым	134000	785	8220	14.81
Кеть	94200	560	1960	12.78
Тым	32300	250	2000	11.05
Вах	76700	665	3500	11.99
Тромъеган	55600	425	1100	11.42
Аган	32200	275	1000	10.70
Лямин	15900	100	394	9.57
Казым	35600	367	700	11.69
Полуй	21000	132	1270	10.66
Парабель	25500	123	380	11.12
Васюган	61800	345	1300	13.02
Большой Юган	34700	178	1200	11.67
Северная Сосьва	98300	860	6200	12.89
Демьянка	34800	167	1290	11.60
Тобол	426000	810	6350	14.32
Тура	80400	177	3330	12.85
Тавда	88100	462	3250	13.08
Конда	72800	310	2000	11.17

формирования стока воды (рис. 2), проявляющиеся в зависимости $Q = f(N)$. Всего было выделено семь районов, охватывающих бассейны рек: I — Томь и Чулым; II — Кеть, Тым и Вах; III, несмотря на близкие значения между реками, выделяются подрайоны IIIа, объединяющий Тромъеган, Аган и Лямин, и IIIб — Казым и Полуй; IV — Парабель, Васюган, Большой Юган, Тара и Демьянка; V — Тобол, Тура, Тавда; VI — Конда и Северная Сосьва. Данные районы хорошо согласовываются с гидрогеологическим районированием, проведенным В.А. Земцовым (1979), а также каждый из районов имеет свои природные особенности, влияющие на формирование и внутригодовое распределение стока (заболоченность, заозеренность и залесенность). Для I района (Томь и Чулым) характерна достаточно высокая степень залесенности бассейнов (больше 70%) при низкой заболоченности (до 6%) и заозеренности (не более 1%) территории. Во II районе (Кеть, Тым, Вах) при достаточно высокой залесенности бассейнов (62–88%) доля болот в бассейнах при продвижении на север возрастает (с 10 до 38%), а заозеренность составляет от 1 до 3%. У Тромъеган, Аган и Лямин, объединяющиеся в III район, около половины территории бассейнов заболочены (до 55%); они имеют относительно невысокую залесенности бассейнов (не более 30%),

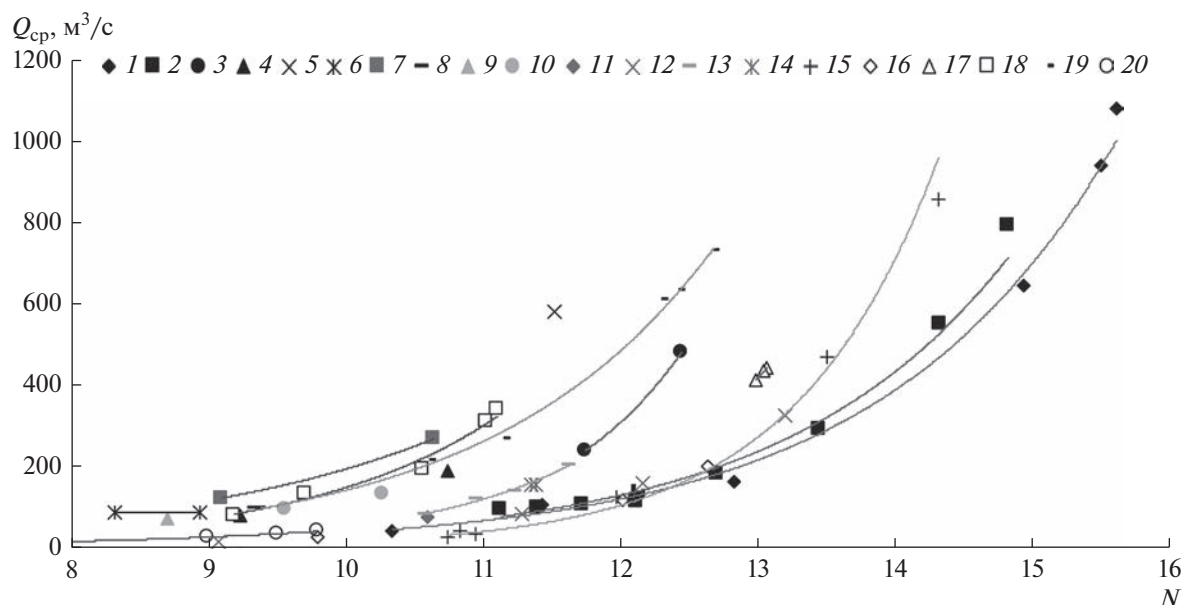


Рис. 1. Связь водоносности ($Q_{ср}$) и порядка (N) рек Обь-Иртышского бассейна.

1 — Томь, 2 — Чулым, 3 — Кеть, 4 — Тым, 5 — Вах, 6 — Тромъеган, 7 — Аган, 8 — Лямин, 9 — Казым, 10 — Полуя, 11 — Парабель, 12 — Васюган, 13 — Большой Юган, 14 — Демьянка, 15 — Тобол, 16 — Тура, 17 — Тавда, 18 — Конда, 19 — Северная Сосьва, 20 — Тара.

а заозеренность изменяется от 14 до 23%. Для самых северных рек — Казыма и Полуя (IV район) лесистость территории составляет около 60% при заболоченности и заозеренности территории в 10 и 3%, соответственно. V район, приуроченный к Обь-Иртышскому междуречью и включающий Парабель, Васюган, Большой Юган и Демьянку, имеет широкий диапазон изменения от бассейна к бассейну степени залесенности (от 45 до 65%) и заболоченности, увеличивающейся с юго-востока на северо-запад (с 35 до 50%), тогда доля озер остается низкой (до 2%). Лесистость бассейнов рр. Тобола и Конды (VI район) составляет от 50 до 70%, заболоченность — до 30%, увеличиваясь с юга на север, а степень заозеренности не превышает 5%.

Коэффициенты a и b в уравнении $Q = ae^{bN}$, описывающее реки каждого района (табл. 2),

Таблица 2. Коэффициенты a и b в уравнении $Q = ae^{bN}$

Район (рис. 2)	a	b
I	0.112	0.586
II	0.425	0.573
IIIa	0.970	0.526
IIIб	2.59	0.382
IV	0.064	0.666
V	0.002	0.929
VI	0.310	0.617

причем a закономерно возрастает по правобережью Оби с юго-востока на северо-запад, захватывая левобережье нижнего Иртыша и нижней Оби, и уменьшается по югу региона с востока на запад. В обратной последовательности изменяется коэффициент b . Отмеченные изменения соответствуют разным условиям формирования стока в Обь-Иртышском бассейне, что связано с изменением количества осадков, степени заболоченности и заозеренности, появлением на севере в бассейне рек многолетнемерзлых пород.

Связь между средними скоростями размыва берегов и порядком рек Обь-Иртышского бассейна описывается возрастающий верхней огибающей зависимости $C_{ср} = f(N)$ (рис. 3).

Средние скорости размывы берегов на реках Обь-Иртышского бассейна изменяются от 1.2 до 2.4 м/год, максимальные — 2.1–12.7 м/год (табл. 3). Наибольшие скорости размыва берегов наблюдаются на правобережных притоках Оби на юго-востоке региона (Томь и Чулым) и на западе (реки бассейна Тобола, Северная Сосьва). Истоки этих рек берут свое начало в горах соответственно в Саяно-Алтайской и Уральской горных систем (Западная ..., 1963).

Геолого-геоморфологические условия играют большую роль в развитии горизонтальных русловых деформаций. Большая ширина дна долины и преимущественно аллювиальные песчано-суглинистые строение пойменных берегов обеспечивают активные смещения русла, тогда как в относи-

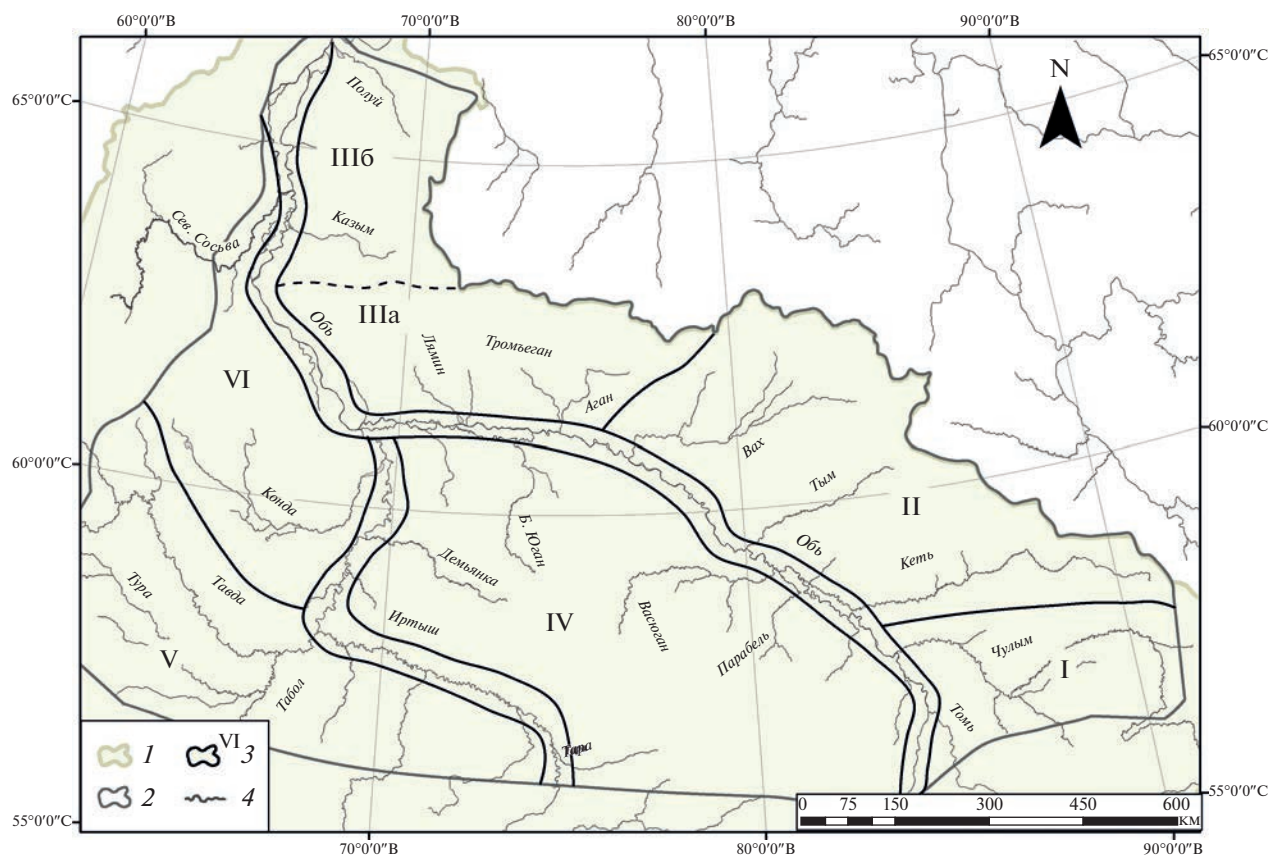


Рис. 2. Условия формирования стока воды на реках Обь-Иртышского бассейна. I–VI – районы, выделенные по связи $Q = f(N)$. 1 – граница Обь-Иртышского бассейна, 2 – равнинная часть лесной зона бассейна, 3 – границы и номера районов, 4 – средние, большие и крупнейшие реки бассейна.

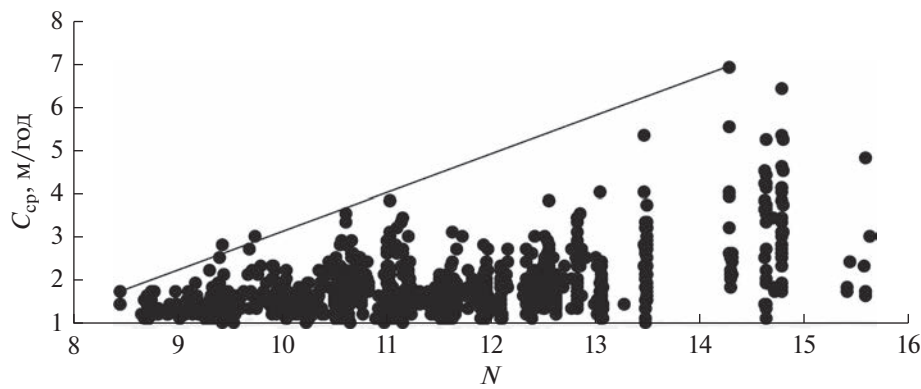


Рис. 3. Связь средней скорости размыва берегов ($C_{ср}$, м/год) и порядка (N) рек Обь-Иртышского бассейна.

тельных сужениях долины (например, соотношение B_n/b_p снижается с 9.5 до 4.7, а русло реки становится преимущественно прямолинейным), наоборот, темпы отступления берегов снижаются. Это – следствие наличия коренных берегов, отступление которых обычно связано не с размывающим воздействием непосредственно на них водного потока, а провоцированием им склоно-

вых процессов (оползней, осыпей). Русло реки вдоль коренных бортов долины преимущественно прямолинейное, и размыв пойменных берегов происходит в местах, где поток либо огибает по- бочни и осередки, либо направляется к ним вы- ступами (мысами) коренных берегов. Если берега представляют собой уступы речных аллювиаль- ных террас, сложенных легкоразмываемыми пес-

Таблица 3. Характеристики размыва берегов на реках Обь-Иртышского бассейна

Район (рис. 5)	Река	Границы рассматривае- мого участка, км	C, м/год			
			среднее	медиана	мода	максимальные
I	Томь	120–0	2.4	1.9	1.5	6.5
	Чулым	400–0	3.3	2.8	1.3	12.7
II	Кеть	556–0	1.9	1.7	1.2	6.2
	Тым	311–0	2.3	2.1	1.7	5.3
	Вах	771–0	1.6	1.5	1.3	3.8
III	Тромъеган	389–0	1.6	1.3	1.1	5.9
	Аган	373–0	1.7	1.5	1.2	8.9
	Лямин	277–0	1.3	1.2	1.1	2.4
IV	Казым	444–0	1.7	1.6	1.4	4.9
	Полуй	397–0	1.4	1.3	1.1	3.1
V	Парабель	246–0	1.2	1.2	1.1	2.1
	Васюган	470–0	2.1	2.0	1.8	4.4
	Большой Юган	294–0	1.5	1.3	1.2	3.4
	Демьянка	311–0	1.4	1.2	1.1	3.3
VI	Тобол	434–0	1.9	1.7	1.4	6.8
	Тура	659–0	2.0	1.7	1.1	6
	Тавда	730–0	2.2	2.0	1.1	7.1
	Конда	735–0	1.7	1.5	1.2	5.2
VII	Северная Сосьва	153–0	2.3	1.9	1.7	6.8

чаными отложениям, то размывы на них могут достигать десятки метров в год, что способствует слив осветленных вод с выклинивающейся непосредственно выше по течению поймы (Чалов, 2008). Но в этих случаях формируются вписанные излучины и отсутствует ограничивающая размывы литология отложений, слагающих террасовые берега.

На рассматриваемых реках ширина днища долины для всех рек преимущественно расширяется к устью, а для некоторых из них (Кеть, Северная Сосьва, Большой Юган и др.) она становится общей с Обью, причем Кеть, Северная Сосьва и Казым, соединяясь с рукавами ее раздвоенного русла, по-существу, становятся их частью, сопоставимой с главной рекой по водности. Но изменение скоростей размыва берегов по длине рек имеют разные тренды (рис. 4). На значительной части рек Обь-Иртышского бассейна (Томи, Тромъегане, Полуде, Большом Югане, Тоболе, Тавде и Северной Сосьве) скорости размыва возрастают к устью, но в самых низовьях снижаются (см. рис. 4а). Это обусловлено резким расширением днища долины, приводящем к растеканию потока половодья по пойме, а зачастую и образованию в устьях озеровидных расширений – соров (на

пример, на Полуде) в результате систематического подпора со стороны Оби. У другой части рек возрастающий тренд сохраняется до самого устья (см. рис. 4б), что согласуется с увеличением расходов воды вниз по течению (Тым, Аган, Казым, Васюган, Демьянка, Тура и Конда). На прямолинейных участках в относительном сужении дна долины некоторых рек скорости размыва снижаются и становятся меньше порогового значения (см. рис. 4б). Еще один вариант – реки, не имеющие какого-либо направленного тренда (см. рис. 4в). На этих реках (Чулым, Кеть, Вах и Лямин) скорости размыва обусловлены изменением по длине параметров излучин (степени развитости, радиусов кривизны и шагов) в зависимости от ширины днища долины, степени разветвленности русла и др.

На основе полученных данных об интенсивности размыва берегов (средние и максимальные скорости размыва в табл. 3) и географической близости, а, соответственно, схожести соседних бассейнов рек составлена карта условий размыва берегов на реках Обь-Иртышского бассейна (рис. 5). Выделено семь районов, включающих реки: I – Томь и Чулым; II – Кеть, Тым и Вах; III – Тромъеган, Аган и Лямин; IV – Казым и Полуде; V – Парабель, Васюган, Большой Юган и Демьянка; VI – Тобол, Тура,

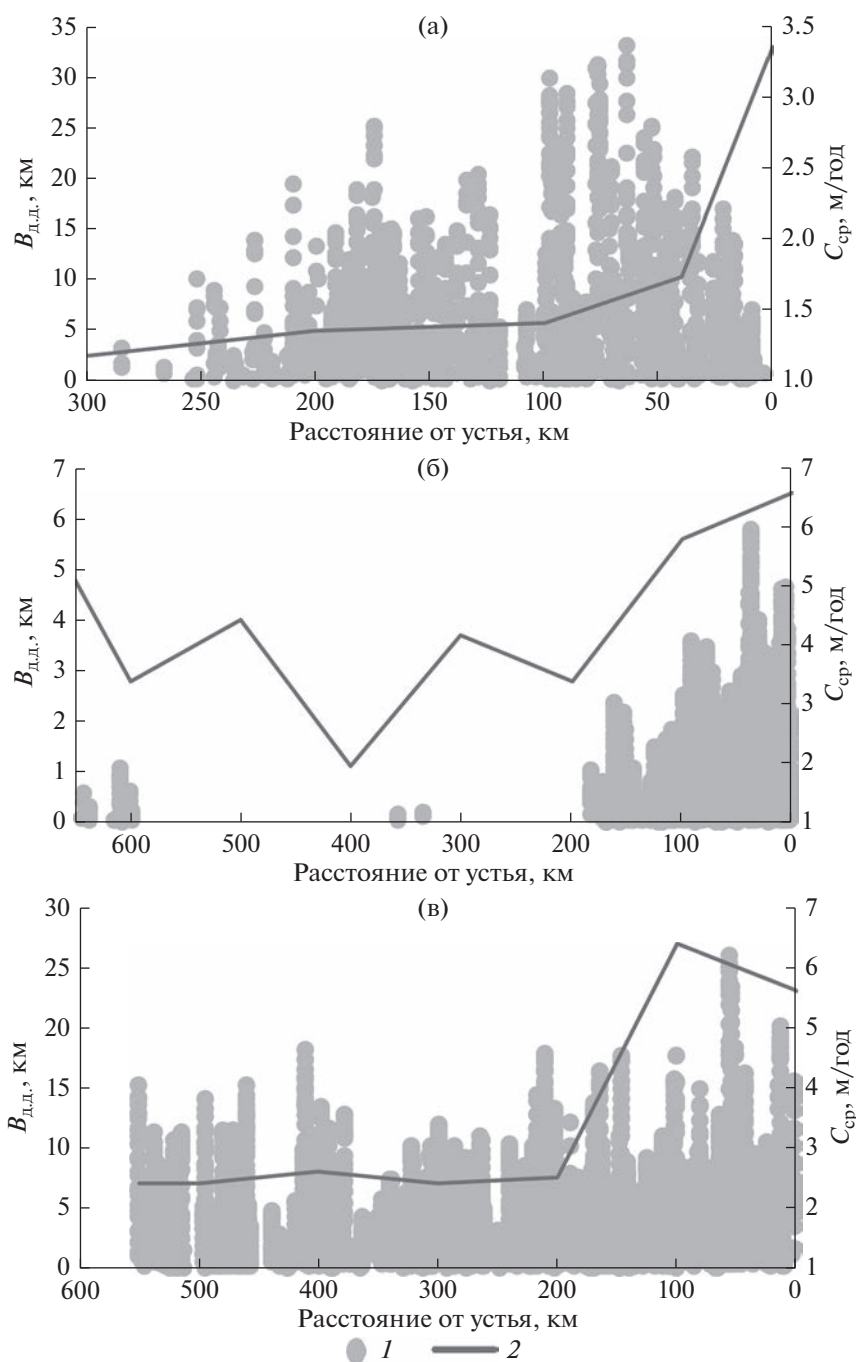


Рис. 4. Изменение средней скорости размыва берегов (1) и ширина дна долины (2) по длине рр. Большой Юган (а), Тура (б) и Кеть (в).

Тавда и Конда; VII – Северная Сосьва. Эти районы в основном согласуются с районами, которые выделены на карте условий формирования стока воды (см. рис. 2), что является дополнительным обоснованием проведенного районирования по условиям размыва берегов, так как сток воды является одним из важнейших факторов размыва берегов. Различия между двумя картами заключаются в том, что Конда объединяется в один район

с реками бассейна Тобола, а Северная Сосьва составляет отдельный район.

Выделенные районы различаются, прежде всего, по темпам размывов берегов. Для I района, включающего крупные правые притоки Томь и Чулым, берущие свое начало в горах, характерны самые высокие скорости смещения русла: средние скорости размыва берегов – 2.4 и 3.3 м/год, максимальные – 6.5 и 12.7 м/год соответственно. На

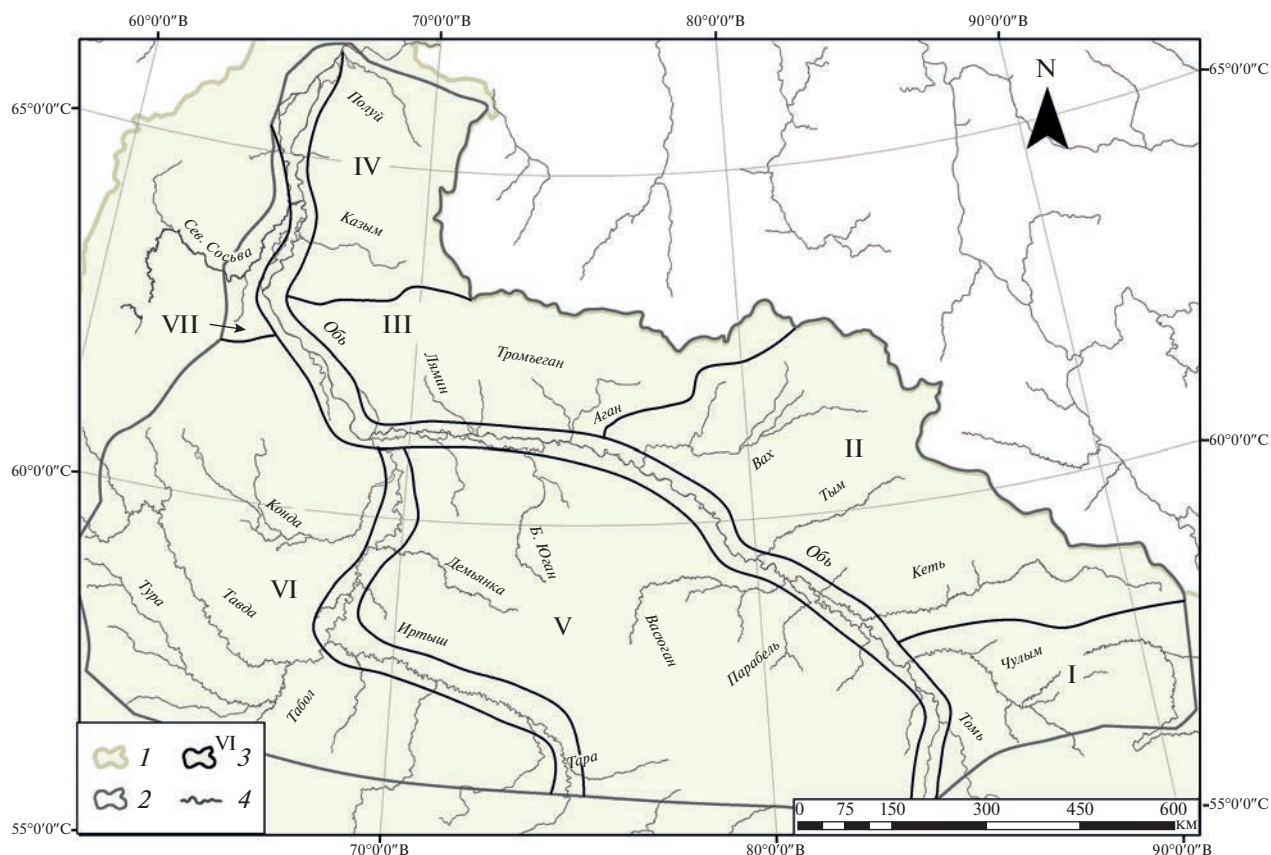


Рис. 5. Условия размыва берегов на реках Обь-Иртышского бассейна. I–VII – районы, выделенные по условиям размыва берегов на основе интенсивности размыва берегов (см. табл. 3), условий формирования стока (см. рис. 2) и географической близости. 1 – граница Обь-Иртышского бассейна, 2 – равнинная часть лесной зона бассейна, 3 – границы и номера районов, 4 – средние, большие и крупнейшие реки бассейна.

северо-запад в пределах II района (Кеть, Тым и Вах) они снижаются, составляя в среднем 1.9 м/год, а среднемаксимальные – от 3.8 до 6.2 м/год. На широтном участке правобережья средней Оби располагается III район, в который входят сильно заболоченные и заозеренные бассейны Тромъегана, Агана и Лямина, скорости размыва уменьшаются до 1.5 м/год в среднем, максимальные колеблются от 2.4 до 8.9 м/год. Самый северный район IV, включающий в себя правые притоки Оби – Казым и Полуй, также характеризуется относительно невысокими средними скоростями – 1.4 и 1.7 м/год, максимальные – не превышают 4.9 м/год. Реки, протекающие по сильно заболоченному Обь-Иртышскому междуречью (Парабель, Васюган, Большой Юган и Демьянка), составляют V район, у которого средние скорости самые низкие (в среднем 1.6 м/год), максимальные достигают лишь 4.4 м/год. VI район объединяет реки бассейна Тобола и левый крупный приток Иртыша – Конду. Для них характерны повышенные средние (от 1.7 до 2.2 м/год) и максимальные (от 5.2 до 7.1 м/год) скорости. VII район включает в себя только Северную

Сосьву, которая на нижнем 153-километровом участке получила субмеридианальное направление и частично течет в общей с Обью долине, сливаясь с ней по пойменным протокам (Лапорская и Пырсим) и крупному рукаву раздвоенного русла – протокой Вайсова. Северная Сосьва имеет среднюю скорость размыва берегов 2.3 м/год, а максимальную – 6.8 м/год.

Рассматриваемые районы также отличаются по зависимостям, связывающим характеристики размыва берегов с параметрами форм русла (излучин русла, излучин рукавов пойменно-русовых и одиночных разветвлений, раздвоенных русел). Гидролого-морфологический анализ позволяет не только выявить особенности развития горизонтальных русловых деформаций на реках, но и использовать полученные связи для неизученных рек и прогнозных оценок русловых деформаций в пределах выделенных районов. Зависимости были получены для всех районов кроме VII, включающего р. Северная Сосьва, из-за малого количества материала по размывам берегов на формах русла, необходимого для проведения анализа.

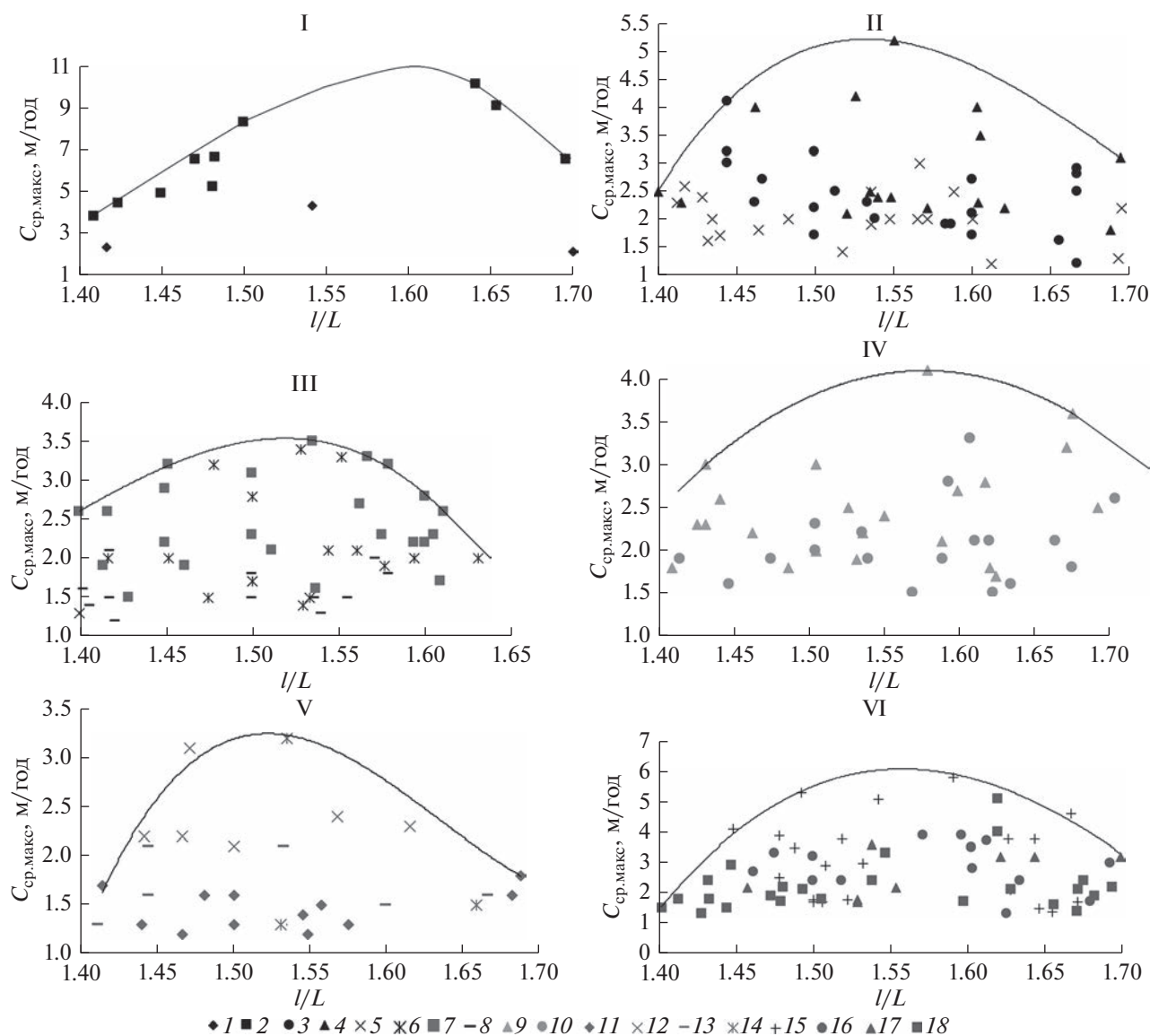


Рис. 6. Связь между степенью развитости (l/L) и среднemaxимальной скоростью размыва берегов ($C_{\text{ср.макс}}$, м/год) на формах русла (излучины, изгибы рукавов русловых разветвлений) рек Обь-Иртышского бассейна. I–VI – см. рис. 5. 1–18 – см. рис. 1.

Ключевым параметром излучин русла и излучин рукавов разветвлений является степень их развитости (l/L), определяющая скоростное поле потока и, как следствие, расположение и длину фронта и скорости размыва берегов. Для анализа были выбраны развитые ($l/L = 1.4–1.7$) излучины русла и рукавов разветвлений, которые наиболее полно отражают на данной стадии своего развития условия формирования русла, имеют четко выраженное скоростное поле потока и развитые циркуляционные течения (Чалов и др., 2004). Зависимость $C = f(l/L)$ для развитых форм русла Обь-Иртышского бассейна описывается верхней огибающей (рис. 6). Скорости размыва берегов

возрастают до значений $l/L = 1.5–1.6$, после чего снижаются. Это объясняется тем, что при удлинении извилистой формы русла в ходе ее развития происходит рост потерь напора и утрачивается ее гидравлическая выгодность (Маккавеев, 1955), приводящие к замедлению смещения русла (Попов, 1965; Чалов и др., 2004). При приближении излучин к $l/L > 1.7$ велика вероятность их спрямления за счет образования спрямляющего рукава через шпору во время половодья (Попов, 1965). При этом в основном русле постепенно происходит затухание русловых деформаций, тогда в спрямляющих и развивающих рукавах за счет

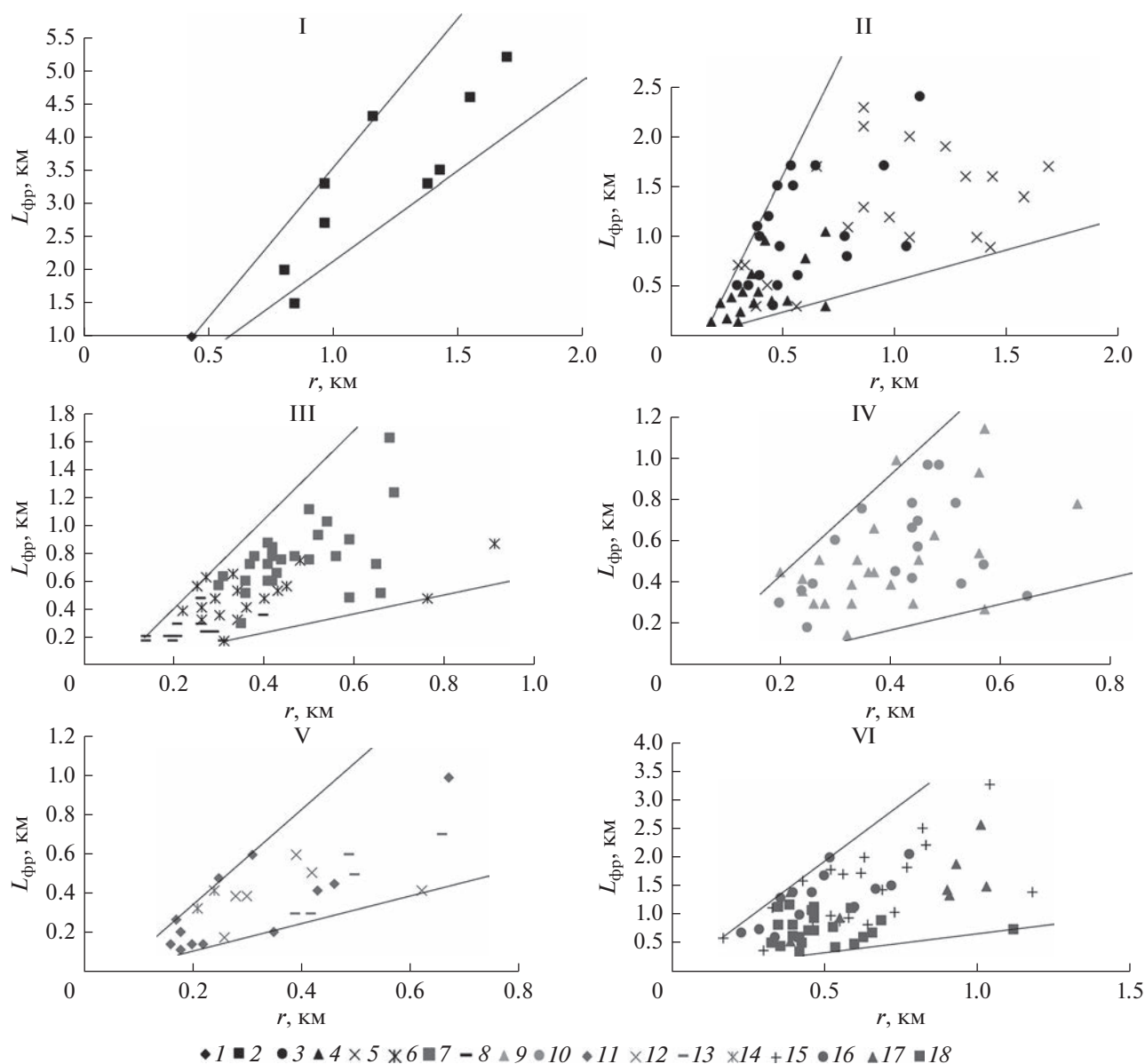


Рис. 7. Связь между радиусом кривизны (r , км) и протяженностью фронта размыва берегов ($L_{фр}$, км) на формах русла (излучины, изгибы рукавов русловых разветвлений) рек Обь-Иртышского бассейна. I–VI – см. рис. 5. 1–18 – см. рис. 1.

увеличения водности размывы берегов возрастают (Чалов и др., 2004).

Каждый район отличается по положению вершины перегиба верхней огибающей как по диапазону l/L от 1.5 до 1.6, так и по величине $C_{ср. макс}$ – от 3.1 до 10.1 м/год что связано с природными особенностями каждого из района.

Другим не менее важным показателем является радиус кривизны r , км. Его связь со скоростью размыва на реках Обь-Иртышского бассейна не проявляется, т.к. сам по себе r зависит от водно-

сти – $r = f(Q)$. Но радиус кривизны r определяет протяженность фронта размыва берегов (рис. 7).

Все районы описываются возрастающими верхними и нижними огибающими (см. рис. 7), показывающими, что у более пологих излучин (с большим r) фронт размыва, при прочих равных условиях, длиннее, чем у более крутых (с меньшими r), а линейные уравнения имеют вид $L_{фр} = ar + b$. Расширение диапазона зависимости $L_{фр} = f(r)$ прослеживается с юга на север по правобережью Оби (районы I–IV) и с востока на запад (районы II, V, VI), что согласуется с условиями

Таблица 4. Коэффициенты a и b в уравнении $L_{\text{фр}} = ar + b$

Район (рис. 5)	Верхняя огибающая		Нижняя огибающая	
	a	b	a	b
I	4.46	−0.94	3.43	−0.14
II	4.51	−0.7	0.63	−0.02
III	3.49	−0.31	0.75	−0.02
IV	2.46	−0.06	0.53	−0.02
V	2.38	−0.13	0.68	−0.004
VI	3.92	−0.09	0.56	0.13

Таблица 5. Коэффициенты a и b в уравнении $L_{\text{фр}} = aL + b$

Район (рис. 5)	Верхняя огибающая		Нижняя огибающая	
	a	b	a	b
I	2.26	−1.29	1.15	−0.07
II	1.86	−0.5	0.34	−0.12
III	1.5	−0.15	0.56	−0.14
IV	1.03	0.13	0.2	0.05
V	1.02	−0.07	0.3	0.02
VI	1.75	−0.12	0.28	0.14

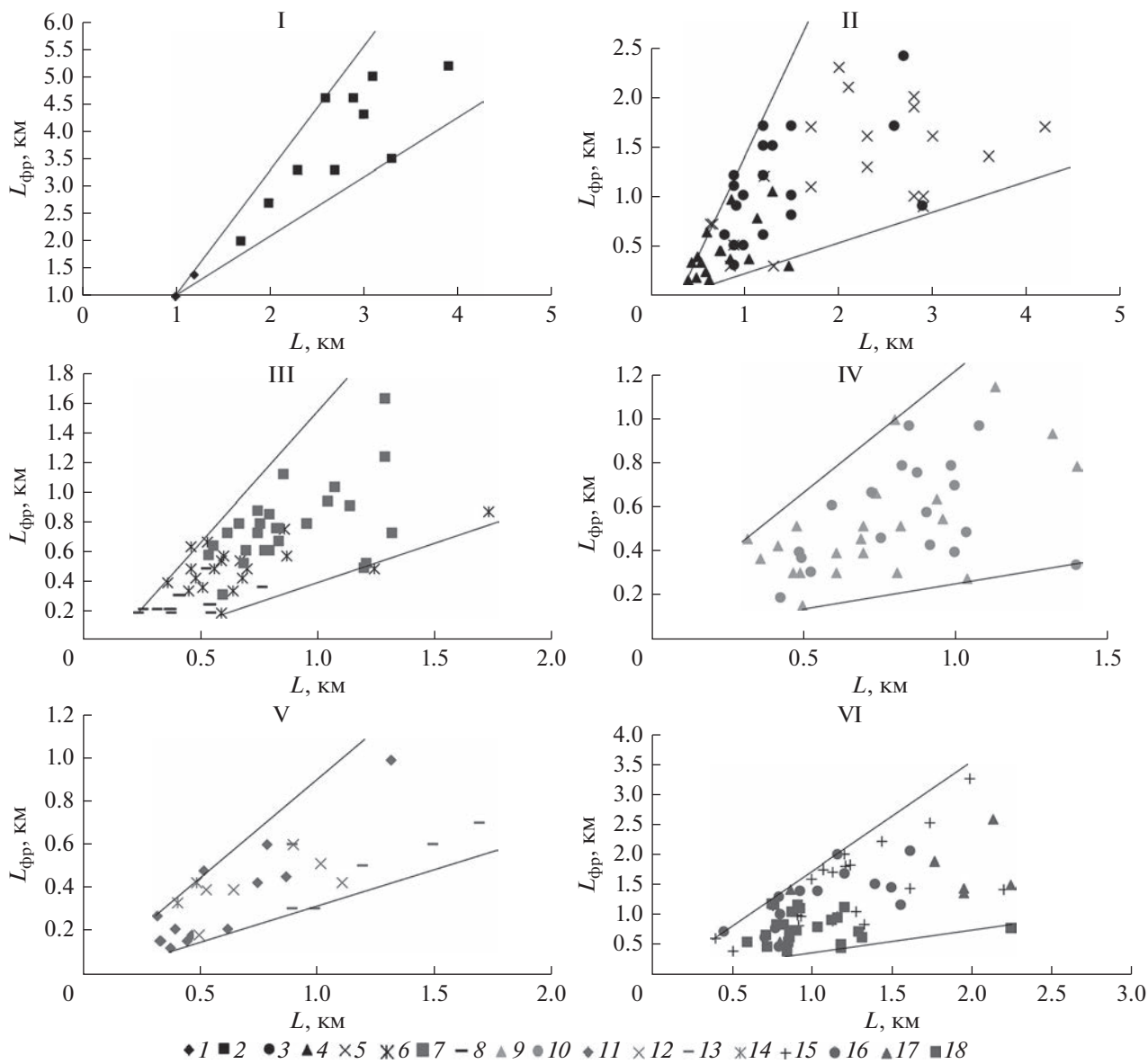


Рис. 8. Связь между шагом (L , км) и протяженностью фронта размыва берегов ($L_{\text{фр}}$, км) на формах русла (излучины, изгибы рукавов русловых разветвлений) рек Обь-Иртышского бассейна. I–VI – см. рис. 5. 1–18 – см. рис. 1.

формирования стока воды, т.е. $Q = f(N)$. То же происходит и с изменениями коэффициентов a и b в уравнении $L_{\text{фр}} = ar + b$ (табл. 4).

Коэффициенты верхней огибающей $L_{\text{фр}} = f(r)$ изменяются следующим образом: a — уменьшается на север и вглубь региона (Обь-Иртышское междуречье), b — увеличивается с юга на север и с востока на запад. Для нижней огибающей выявленные колебания в значениях a и b выражены хуже: a имеет отличие только для I района, а для остальных он находится в узком диапазоне (0.53—0.75), тогда как b также растет на север и запад.

Наибольшая протяженность размываемых берегов наблюдается у форм русла с большим шагом (рис. 8).

Как и в случае со связью $L_{\text{фр}} = f(r)$, районы в зависимости между $L_{\text{фр}}$ и L характеризуются возрастающими верхними и нижними огибающими (см. рис. 8), которые описываются линейным уравнением вида $L_{\text{фр}} = aL + b$. Диапазоны значений расширяются к северу (районы I—IV) и западу (районы II, V, VI). Коэффициенты a и b в уравнении $L_{\text{фр}} = aL + b$ представлены в табл. 5.

Коэффициенты верхней огибающей $L_{\text{фр}} = f(L)$ имеют следующие тенденции: a — уменьшается на север и к внутренним районам (Обь-Иртышское междуречье), b , наоборот, увеличивается в этих же направлениях. Для нижней огибающей $L_{\text{фр}} = f(L)$ a значительно отличается только для I района, для остальных он находится в узком диапазоне (0.2—0.56), b понижен для правобережья Оби (I—III районы).

ВЫВОДЫ

Русла притоков Оби и Иртыша формируются в свободных, относительно однородных условиях, где размывы берегов являются повсеместно распространенным явлением. Они не только создают опасность для освоения приречных территорий и водных ресурсов, но и выступают источником поступления наносов в русло, которые аккумулируясь ниже по течению, могут вызывать затруднения для судоходства, снижая гарантированные глубины. Дополнительно на развитие русловых деформаций могут влиять особенности природной среды (мерзлота, лесные заломы, уклоны и т.д.).

Территория Обь-Иртышского бассейна в пределах лесной зоны на основе связи $Q_{\text{ср}} = f(N)$ разделяется на районы по природным условиям формирования стока (климатическим, гидрогеологическим и другим факторам). С ростом порядка реки, т.е. размера и водоносности, интенсивность горизонтальных русловых деформаций увеличивается в среднем с 1.7 до 6.9 м/год (скорости рассчитаны за период с 1970-х годов по настоящее

время). Геолого-геоморфологические условия, проявляющиеся в ширине днища долины и влиянии коренных берегов, наравне с постоянным изменением параметров форм русла и водности, взаимодействием руслового и пойменного потоков в половодья, также оказывают влияние на изменение скоростей размыва берегов по длине рек.

Районирование территории по условиям размыва берегов показывает снижение темпов размыва берегов к северу и к внутренним районам (Обь-Иртышскому междуречью). Протяженность фронтов размыва и скорости на них зависят от извилистости русла, характеризующиеся параметрами ($l/L, r, L$), которые, в свою очередь, определяют структуру скоростного поля потока и циркуляционные течения. Скорости размыва берегов растут с увеличением степени развитости излучин русла и излучин рукавов разветвлений, снижаясь при $l/L > 1.5$ —1.6. Фронт размыва, при прочих равных условиях, длиннее у более пологих излучин (с большими r и L). Каждый из районов характеризуется гидролого-морфологическими зависимостями, коэффициенты которых изменяются с юга на север и с востока на запад, а также вглубь рассматриваемой территории.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-35-90003/20 — размывы берегов) и РНФ (проект № 18-17-00086 П — размывы берегов на реках с разветвленным руслом, натурные исследования).

FUNDING

The paper is prepared with financial support of the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00086 П) and Russian Foundation of Basic Research (project no. 20-35-90003/20).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Косицкий А.Г. Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, общество и окружающая среда. Т. VI. Динамика и взаимодействия атмосферы и гидросферы. М.: Городец, 2004. С. 345—412.
- Беркович К.М., Вершинин Д.А., Земцов В.А., Рулева С.Н., Сурков В.В., Фролова Н.Л. Ледовый и русловой режим нижнего течения реки Томи // Эрозионные и русловые процессы. М.: Географ. ф-тет МГУ, 2015. Т. 6. С. 183—198.
- Вершинин Д.А., Земцов В.А., Инишев Н.Г., Тарасов А.С., Домрачев Е.А. Проблемы русловых процессов рек Западной Сибири и результаты исследования в этой области // Тридцать третья пленар. межвуз. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и

- устьевых процессов: Докл. и краткие сообщ. Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2018. С. 30–38.
- Горбачкий Г.В. К вопросу об эрозионной деятельности полярных рек // Землеведение. 1935. Т. 37. № 3. С. 26–34.
- Евсеева Н.С., Земцов А.А. Рельефообразование в лесоболотной зоне Западно-Сибирской равнины. Томск: Изд-во ТГУ, 1990. 242 с.
- Завадский А.С., Чалов С.Р., Чернов А.В., Головлев П.П., Морейдо В.М., Беляков П.А. Морфодинамика русел и баланс наносов рек бассейна Селенги (Монголия–Россия) // Эрозия почв и русловых процессов. М.: Географ. ф-тет МГУ, 2019. Вып. 21. С. 149–170.
- Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году по территории СССР // Труды НИУ ГУГМС. Сер. IV. Л.–М., 1946. Вып. 24. С. 67–95.
- Западная Сибирь / под ред. Г.Д. Рихтера. М.: АН СССР, 1963. 488 с.
- Земцов А.А. Геоморфология Западно-Сибирской равнины: Северная и центральная части. Томск: Изд-во ТГУ, 1976. 353 с.
- Земцов А.А., Бураков Д.А. О деформациях русел Оби и ее притоков // Докл. Ин-та географ. Сибири и Дальнего Востока. Иркутск, АН СССР. Сиб. отд., 1966. Вып. 13. С. 31–34.
- Земцов В.А. Влияние физико-географических условий на естественную зарегулированность стока рек Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 1979. Вып. 12. С. 46–58.
- Камалова Е.В. Географические закономерности процессов разрушения берегов на малых и средних реках бассейнов Волги и верхнего Дона: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1988. 22 с.
- Коркин С.Е., Исыпов В.А. Русловые деформации в нижнем течении реки Вах // Тридцать третье пленар. межвуз. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: Докл. и краткие сообщ. Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2018. С. 4–10.
- Крутовский А.О., Лыготин В.А. Исследования русловых процессов Среднего Приобья // Вопросы географии Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 2001. Вып. 24. С. 469–478.
- Куракова А.А., Чалов Р.С. Морфология русла и размывы берегов Нижней Оби (в пределах ХМАО–Югры) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 6. С. 41–50.
- Куракова А.А., Чалов Р.С. Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла // Географический вестн. 2019. № 3 (50). С. 34–47.
- Лыготина Л.П. Из истории изучения природы современной Томской области (дореволюционный период) // Вопросы географии Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 1989. Вып. 18. С. 154–159.
- Маккаев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Попов И.В. Деформация речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
- Сурков В.В., Крыленко И.В., Чалова А.С., Головлев П.П., Рулева С.Н. Русловые процессы на р. Чулыме, режим перекатов и рекомендации по оптимизации сроков навигации и улучшению условий судоходства // Тридцать третье пленар. межвуз. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: Докл. и краткие сообщ. Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2018. С. 16–29.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.
- Эберхардс Г.Я. Основные типы и сезонные переформирования берегов малых и средних свободно меандрирующих рек Средней Прибалтики // Геоморфология. 1986. № 3. С. 85–90.
- Янышев Л.И. Описание рек Туры и Тобола как водных путей сообщения, связывающих систему р. Оби с Екатеринбургско-Тюменской ж. д., по исследованиям 1884–1885 годов // Инженер. СПб.: Мин-ва пут. сообщ., 1885. Т. 3. 32 с.
- Hemmelder S., Marra W., Markies H., De Jong S.M. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France // Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. № 73. P. 428–437.
- Knighton A.D. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. London: Arnold, 1998. 383 p.
- Schumm S.A. The fluvial system. N.Y.: Wiley, 1977. 338 p.

Regionalization of the Ob–Irtysch Basin According to the Conditions of Riverbanks Erosion

A. A. Kurakova*

Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

The article analyzes the patterns of riverbanks erosion of medium and large rivers of the Ob–Irtysch rivers' basin. They have a real and potential threat. The territory in different parts differs in the regime of water and sediment runoff under free and relatively homogeneous free conditions of channel formation (wide floodplains composed of sandy deposits). The increase in the order of rivers, which is an indirect indicator of their water content, leads to the activation and increase in the intensity of horizontal channel deformations. The geological and geomorphological conditions of channel formation (the width of the valley bottom and the in-

fluence of bedrock banks), along with hydroclimatic factors, affect the rate of channel displacement and their re-formation. According to the conditions of river bank erosion, seven regions are distinguished in the Ob–Irtysk basin, each of which is characterized by different intensities of channel deformations and hydrological and morphological dependences that connect their indicators (rate and length of riverbanks erosion fronts) with the channel and water content of the flow. The characteristics of bank erosion (rate and the length of the erosion front) depend on the shape of the channels, which determines the hydraulic characteristics of the flow. Riverbanks erosion rates increase with an increase in the degree of development of the meanders. The water content of the river and decreases in the branches due to the dispersal of the runoff. The washout front, ceteris paribus, is longer for flat bends. The bedrock banks recede mainly due to the development of landslides and scree, provoked by the impact of the flow on them.

Keywords: channel processes, riverbanks erosion, meanders, branching, erosion rate, erosion front

REFERENCES

- Alekseevsky N.I., Aibulatov D.N., Kosickii A.G. Large-Scale Effects of Changes in Runoff in the Channel Network of the Territory. In *Geografiya, Obshchestvo i Okruzhayushchaya Sreda. Dinamika i Vzaimodeistviya Atmosfery i Gidrosfery* [Geography, Society, and the Environment. Vol. VI. Dynamics and Interactions of the Atmosphere and Hydrosphere]. Moscow, 2004, pp. 345–412. (In Russ.).
- Berkovich K.M., Vershinin D.A., Zemtsov V.A., Ruleva S.N., Surkov V.V., and Frolova N.L. Ice and channel regime of the lower reaches of the Tom River. In *Erozionnye i ruslovye protsessy* [Erosion and Channel Processes]. Moscow: Fakul'tet Geogr. Mosk. Gos. Univ., 2015, vol. 6, pp. 183–198. (In Russ.).
- Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov* [Geographic Studies of Channel Processes]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1979. 232 p.
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: Teoriya, geografiya, praktika. Vyp. 1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Theory, Geography, Practice. Vol. 1. Channel Processes: Factors, Mechanisms, Forms and Conditions of Channel Formation]. Moscow: LKI Publ., 2008. 608 p.
- Chalov R.S., Zavadskii A.S., Panin A.V. *Rechnye izluchiny* [River Meanders]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2004. 371 p.
- Eberhards G.Ya. The main types and seasonal transformation of the banks of small and medium meandering rivers of the Middle Baltic. *Geomorfologiya*, 1986, no. 3, pp. 85–90. (In Russ.).
- Evseeva N.S., Zemtsov A.A. *Rel'efoobrazovanie v lesobolotnoi zone Zapadno-Sibirskoi ravniny* [Relief Formation in the Forest-Bog Zone of the West Siberian Plain]. Tomsk: TGU Publ., 1990. 242 p.
- Gorbatskii G.V. On the issue of erosion activity of polar rivers. *Zemlevedenie*, 1935, vol. 37, no. 3, pp. 26–34. (In Russ.).
- Hemmeler S., Marra W., Markies H., De Jong, S.M. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France. *Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf.*, 2018, no. 73, pp. 428–437.
- Kamalova E.V. Geographical patterns of coastal destruction processes on small and medium rivers of the Volga and Upper Don basins. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1988. 22 p.
- Knighton A.D. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. London: Arnold Publ., 1998. 383 p.
- Korkin S.E., Isypov V.A. Channel deformations in the lower reaches of the Vakh River. In *Tridtsat' tret'e plenar. mezhvuz. soveshch. po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov: Dokl. i kratkie soobshch.* [Thirty-third Plenary Interuniversity Meeting on the Problem of Erosion, Channel and Estuarine Processes: Reports and Brief Communications]. Nizhnevartovsk: NVGU Publ., 2018, pp. 4–10. (In Russ.).
- Krutovskii A.O., L'gotin V.A. Studies of channel processes in the Middle Ob. *Vopr. Geogr. Sib.*, 2001, vol. 24, pp. 469–478. (In Russ.).
- Kurakova A.A., Chalov R.S. Channel morphology and bank erosion in the lower reaches of the Ob River (within the Khanty-Mansi Autonomous Okrug). *Vest. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2020, no. 6, pp. 41–50. (In Russ.).
- Kurakova A.A., Chalov R.S. Shores erosion within latitudinal section of the middle Ob and its correlation with morphology of the channel. *Geogr. Vestn.*, 2019, vol. 50, no. 3, pp. 34–47. (In Russ.).
- L'gotina L.P. From the history of studying the nature of modern Tomsk oblast (pre-revolutionary period). *Vopr. Geogr. Sib.*, 1989, vol. 18, pp. 154–159. (In Russ.).
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River Bed and Erosion in Its Basin]. Moscow: AN SSSR, 1955. 347 p.
- Popov I.V. *Deformatsii rechnykh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [River Channel Deformations and Hydraulic Engineering]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1965. 328 p.
- Schumm S.A. *The fluvial system*. New York: Wiley Publ., 1977. 338 p.
- Surkov V.V., Krylenko I.V., Chalova A.S., Golovlev P.P., and Ruleva S.N. Channel processes on the Chulym River, riffle regime and recommendations for optimizing navigation time and improving navigation conditions. In *Tridtsat' tret'e plenar. mezhvuz. soveshch. po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov: Dokl. i kratkie soobshch.* [Thirty-third Plenary Interuniversity Meeting on the Problem of Erosion, Channel and Estuarine Processes: Reports and Brief Communications]. Nizhnevartovsk: NVGU Publ., 2018, pp. 16–29. (In Russ.).
- Vershinin D.A., Zemtsov V.A., Inishev N.G., Tarasov A.S., Domrachev E.A. Problems of channel processes in the rivers of Western Siberia and the results of research in this area. In *Tridtsat' tret'e plenar. mezhvuz. soveshch. po*

- probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov: Dokl. i kratkie soobshch.* [Thirty-third Plenary Interuniversity Meeting on the Problem of Erosion, Channel and Estuarine Processes: Reports and Brief Communications]. Nizhnevartovsk: NVGU Publ., 2018, pp. 30–38. (In Russ.).
- Yanyshchev L.I. Description of the Tura and Tobol rivers as waterways connecting the system of the river. Ob from the Yekaterinburg–Tyumen railway according to research in 1884–1885. In *Inzhener* [Engineer]. St. Petersburg: Min-va put. soobshch. Publ., 1885, vol. 3, 32 p.
- Zaikov B.D. Average runoff and its distribution per year on the territory of the USSR. *Tr. NIU GUGMS*, 1946, vol. 4, no. 15, pp. 67–95. (In Russ.).
- Zapadnaya Sibir'* [Western Siberia]. Rihtera G.D., Ed. Moscow: AN SSSR, 1963. 488 p.
- Zavatskii A.S., Chalov S.R., Chernov A.V., Golovlev P.P., Moreido V.M., Belyakov P.A. Morphodynamics of channels and sediment balance of rivers in the Selenga basin (Mongolia–Russia). In *Eroziya pochv i ruslovyye protsessy* [Soil Erosion and Channel Processes]. Moscow: Fakul'tet Geogr. Mosk. Gos. Univ., 2019, vol. 12, pp. 149–170. (In Russ.).
- Zemtsov A.A. *Geomorfologiya Zapadno-Sibirskoi ravniny (severnaya i tsentral'naya chasti)* [Geomorphology of the West Siberian Plain (Northern and Central Parts)]. Tomsk: TGU Publ., 1976. 353 p.
- Zemtsov A.A., Burakov D.A. On the Deformations of the Channels of the Ob River and Its Tributaries. In *Dokl. In. geograf. Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Reports of the Institute of Geography of Siberia and the Far East]. Irkutsk: AN SSSR. Sib. Otd. Publ., 1966, vol. 13, pp. 31–34. (In Russ.).
- Zemtsov V.A. The influence of physical and geographical conditions on the natural regulation of river flow in the West Siberian Plain. *Vopr. Geogr. Sibiri*, 1979, vol. 12, pp. 46–58. (In Russ.).