

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ И ГЕОМОРФОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.435.1:4.01:001.4

doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-40-59

**РАЗМЫВЫ ПОЙМЕННЫХ БЕРЕГОВ ОБИ И ИРТЫША
И ИХ СВЯЗЬ С МОРФОЛОГИЕЙ РУСЛА****Анна Александровна Куракова**

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

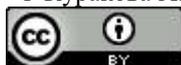
a.a.kurakova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0234-6454>

Аннотация. Впервые для средней и нижней Оби (от устья р. Томи до г. Салехарда) и нижнего Иртыша (от слияния с р. Тоболом до устья) дается обобщенная характеристика опасных проявлений русловых процессов – размывов берегов, условий и закономерностей их развития. Геолого-геоморфологические условия формирования русел рек и изменения водоносности рек вниз по течению обеспечивают изменение темпов размыва берегов. На средней и нижней Оби при большом разнообразии типов русла наиболее активными переформированиями отличаются излучины русла и излучины рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенного русла; на нижнем Иртыше, имеющем преимущественно меандрирующее русло, размывы берегов приурочены к свободным излучинам русла. Параметры форм русла, определяющие гидравлику потока, влияют на характеристики размыва берегов (скорость и протяженность фронта). С увеличением степени развитости излучин скорости размыва берегов возрастают при одновременном сокращении длины фронта размыва. На пологих излучинах направленный тренд в изменении скоростей размыва берегов отсутствует, но происходит увеличение протяженности размываемых берегов. Для излучин и разветвлений русла с большим шагом также прослеживается удлинение фронта размыва берегов. Увеличение порядка реки, характеризующего ее водоносность, сопровождается ростом темпов размыва берегов на нижнем Иртыше; на Оби весомый вклад вносит рассредоточение стока по рукавам разветвлений и раздвоенных русел, отвлечение части стока в пойменные протоки (ответвления) и на затопленную в половодье пойму. Полученные данные имеют важное значение для освоения водных ресурсов и приречных пространств Оби и Иртыша.

Ключевые слова: русловые процессы, размывы берегов, излучины, разветвления

Сведения о финансировании: выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-35-90003\20 – размывы берегов) и РНФ (проект № 18-17-00086п – размывы берегов в разветвленных руслах).

Для цитирования: Куракова А.А. Размывы пойменных берегов Оби и Иртыша и их связь с морфологией русла // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 1(60). С. 40–59. doi: .17072/2079-7877-2022-1-40-59.



PHYSICAL GEOGRAPHY, LANDSCAPES AND GEOMORPHOLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-40-59

RIVERBANK EROSION ON THE OB AND THE IRTYSH
AND ITS CONNECTION WITH THE RIVER CHANNEL MORPHOLOGY

Anna A. Kurakova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

a.a.kurakova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0234-6454>

Abstract. This is the first study to provide generalized description of dangerous channel processes – riverbank erosion, conditions and patterns of its development for the Middle and Lower Ob (from the mouth of the Tom River to the city of Salekhard) and the Lower Irtysh (from the confluence with the Tobol River to the mouth). The geological and geomorphological conditions for the formation of the river channels and changes in the water content of the rivers downstream entail a change in the rate of riverbank erosion. On the Middle and Lower Ob, with a wide variety of channel types, the most active re-formations can be seen along the channel bends and the bends of the branches of the floodplain-channel branching and the bifurcated channel. On the Lower Irtysh, which has a predominantly meandering channel, riverbank erosion is confined to the free bends of the channel. The parameters of the channel forms, which determine the hydraulics of the flow, affect the characteristics of riverbank erosion (speed and length of the front). With an increase in the degree of bend development, the riverbank erosion rates increase with a simultaneous reduction in the length of the erosion front. On flat bends, there is no directional trend in the change in the riverbank erosion rates, but there is an increase in the length of the erosion front. The elongation of the riverbank erosion front is also traced for bends and forks of the channel with a larger step. The increase in the order of the river, which characterizes its water content, is accompanied by an increase in the rate of riverbank erosion on the Lower Irtysh. On the Ob, a significant contribution is made by the dispersal of the water runoff along the branches of the forks and forked channels, as well as the diversion of part of the runoff into floodplain channels (branches) and onto the inundated floodplain. The data obtained are of great importance for the development of water resources and the riverine areas of the Ob and Irtysh.

Keywords: channel processes, riverbank erosion, meanders, anabranching channel

Financial Support: The paper was prepared with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 18-17-00086p) and the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-35-90003\20).

For citation: Kurakova, A.A. (2022). Riverbank erosion on the Ob and the Irtysh and its connection with the river channel morphology. *Geographical Bulletin*. No. 1(60). Pp. 40–59. doi:10.17072/2079-7877-2022-1-40-59.

Введение

Обь и Иртыш – крупнейшие водные артерии Западной Сибири, ресурсы которых широко используются в экономике региона, а сами реки являются важнейшими водными путями. В связи с этим изучение русловых процессов и связанных с ними опасных явлений, способных нанести ущерб при хозяйственном освоении приречных территорий, имеет большое значение. Наиболее ярким проявлением опасности русловых процессов являются размывы берегов, которые представляют как реальную угрозу (например, в районе г. Колпашево за последние 100 лет берег отступил на 1,5–2 км, и была смыта часть города [12]), так и потенциальную, так как в связи с малой плотностью населения (особенно на севере) многие прибрежные территории пока не освоены, но могут быть обустроены и использованы в будущем, подвергаясь при этом опасности разрушения рекой. Однако оценка размывов берегов преимущественно фрагментарна, во многих случаях не увязана с русловыми процессами, проявлением которых они являются.

Физическая география, ландшафтоведение и геоморфология
Куракова А.А.

Первые сведения об Оби и Иртыше, в том числе об их русловых деформациях, появлялись еще в конце XVI в. в донесениях и материалах сибирских воевод и первых землепроходцев. Начало первым научным академическим исследованиям на Оби было положено в первой половине XVIII в. в связи с развитием Великого водного пути (из г. Тобольска в Китай) [23]. Тогда же немецкий ученый И. Г. Гмелин обратил внимание на размывы берегов на Иртыше у г. Тобольска и предложил мероприятия по их защите [14]. Более подробные и длительные научные изыскания начались с середины XX в., что связано с нефтегазовым освоением Западной Сибири и регулированием стока Новосибирским гидроузлом на Оби. В первую очередь, эти работы сосредотачивались в среднем течении Оби (до впадения р. Вах), где изучались переформирования ее русла, выполнялись натурные наблюдения за размывами берегов и давались их прогнозные оценки учеными Томского университета [15; 22], продолжающиеся и в настоящее время с использованием методов компьютерного моделирования, гидрометеорологической информации и данных дистанционного зондирования [7; 16]. С 1960-х гг. средняя Обь становится объектом изучения НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева (МГУ) и Государственного гидрологического института [26]. Одним из ключевых результатов по итогам изысканий становится монография о переформированиях русла на верхней и средней Оби, влиянии на них водохранилища и возникающих в связи с этим проблем в судоходстве и при освоении приречных территорий [28]. Обь ниже впадения р. Ваха рассматривалась О.И. Баженовой [16], которая использовала картографический материал для анализа развития излучин и переформирований русла. Позже И. Б. Петров [25] дал характеристику пойм средней и нижней Оби и нижнего Иртыша и геолого-геоморфологических условий формирования их русел. Размывы берегов на средней, нижней Оби и нижнем Иртыше рассматривали А.С. Герасимова [9] и Е.В. Трепетцов [30], но в основном с инженерно-геологических позиций. В.В. Дегтярев [11] для улучшения условий судоходства на среднем и нижнем Иртыше обосновал возможности искусственного спрямления излучин на особо затруднительных участках. С.В. Боровков [5] на основе компьютерного моделирования обосновал необходимость спрямления излучины Иртыша в районе г. Ханты-Мансийска для решения проблемы сохранения прибрежной городской территории, подвергающейся размыву.

Однако перечисленные работы дают либо общие представления о размывах берегов без их связи с морфологией русла, его параметрами и динамикой потока, либо исключение составляют работы, характеризующие размывы русла на отдельных участках реки [2; 9; 12; 16; 19] или выполненные в последнее время исследования руслового режима на широтном участке средней Оби [21] и в ее нижнем течении [20; 35].

Важным аспектом анализа размывов берегов (вне зависимости от объектов) являются подходы к их оценкам, на основе которых можно делать прогнозы. В Государственном гидрологическом институте была предложена методика прогноза смещения излучин на основе морфометрических характеристик излучин русла на разных стадиях их развития [18]. В ПНИИСе была разработана методика расчета скорости размыва берегов на основе сопоставления глубины русла в половодье и межени, амплитуды уровней воды, высоты берега и типа грунта [27]. Другим направлением в подходе к расчетам скоростей размыва берегов является их связь с характеристиками стока воды [38]. Более комплексный подход был предложен К.М. Берковичем [4] на основе зависимости размыва берегов от транспортирующей способности потока, высоты берега и крупности донных наносов. Применение математического моделирования позволило выявить зависимости скорости отступления берега от разницы между скоростями течения у берега и по середине живого сечения русла с учетом свойств слагающего берега грунта, его прочности, влияния растительности, а также таких морфометрических характеристик русла, как уклон, высота берега, ширина русла и др. [36;37].

Физическая география, ландшафтоведение и геоморфология
Куракова А.А.

Задача настоящей статьи – дать анализ пространственно-временной изменчивости размывов берегов на средней и нижней Оби (от устья р. Томи до г. Салехарда) и нижнем Иртыше (от слияния с р. Тоболом до устья) (рис. 1) и влияния на них геолого-геоморфологических условий формирования русла, морфодинамических типов русла, параметров его форм, водоносности, выраженной через порядок реки, и рассредоточения стока по рукавам, отвлечения части стока в пойменные протоки (ответвления) и на пойму при ее затоплении в половодье.

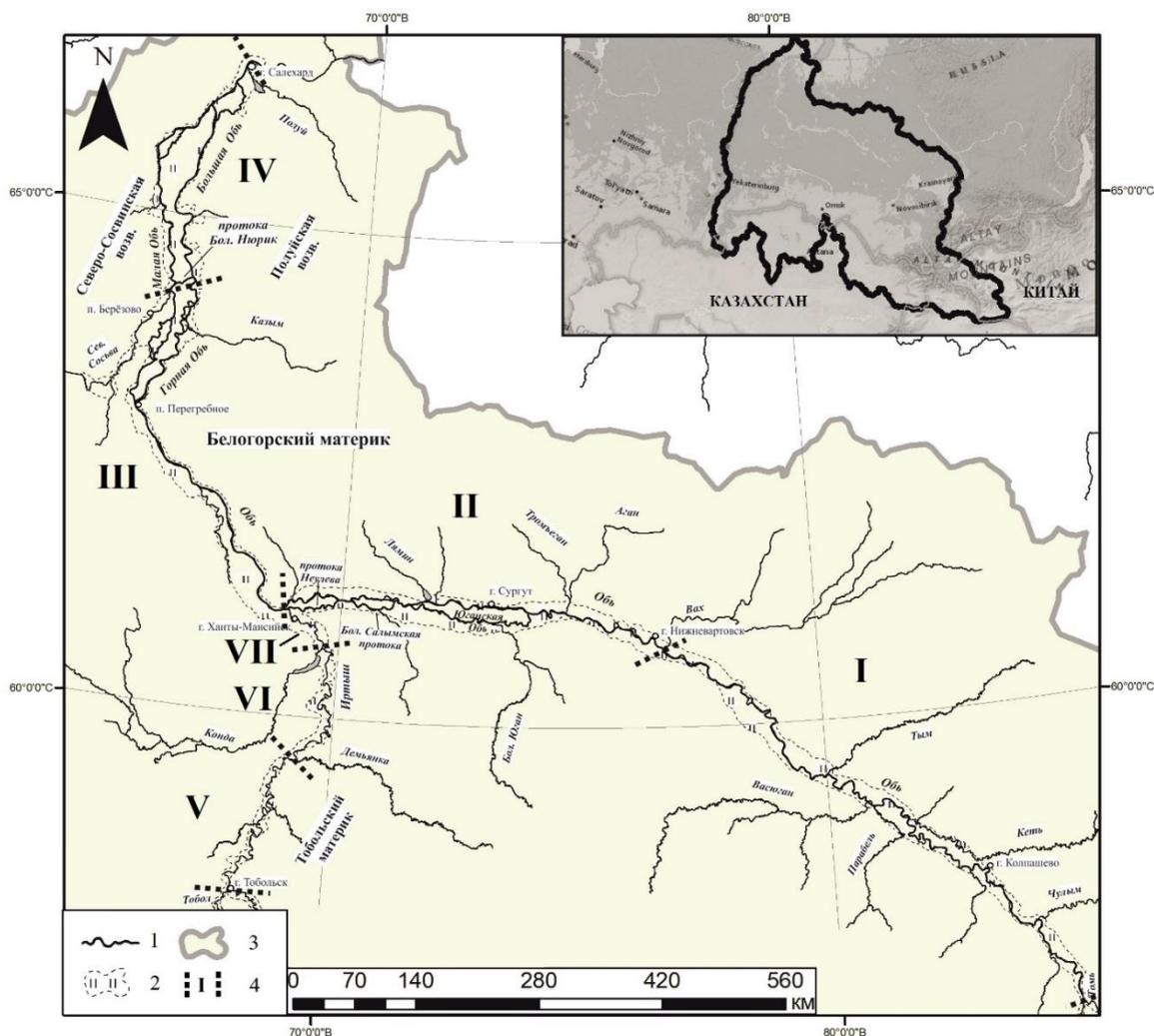


Рис. 1. Общая схема Обь-Иртышского бассейна: 1 – крупные реки, 2 – пойма, 3 – граница бассейна, 4 – границы и номера участков рек.

Обь: I – средняя Обь (между устьями рек Томь и Вах), II – средняя Обь (между устьями рек Вах и Иртыш), III – нижняя Обь (от слияния с р. Иртышом до протоки Большой Нюрик), IV – нижняя Обь (от протоки Большой Нюрик до г. Салехарда); Нижний Иртыш: V – между устьями рек Тобол и Демьянка, VI – между устьями рек Демьянка и Конда, VII – от устья реки Конда и до устья Иртыша

Fig. 1. General scheme of the Ob-Irtysh basin: 1 – large rivers, 2 – floodplain, 3 – basin boundary, 4 – boundaries and numbers of river sections.

The Ob: 1 – Middle Ob (between the mouths of the Tom and Vakh Rivers), 2 – Middle Ob (between the mouths of the Vakh and Irtysh Rivers), 3 – Lower Ob (from the confluence with the Irtysh River to the Bolshoi Nyurik channel), 4 – Lower Ob (from the Bolshoi Nyurik channel to the city of Salekhard).

The Lower Irtysh: V - between the mouths of the Tobol and Demyanka Rivers, VI - between the mouths of the Demyanka and Konda Rivers, VII - from the mouth of the Konda River and the mouth of the Irtysh River.

Объекты и методы исследования

Бассейн Оби в среднем и нижнем течении и нижнего Иртыша представляет собой равнинную территорию с отметками до 200 м, сложенную супесчано-суглинистыми отложениями ледникового, водноледникового, речного и озерного происхождения, накопившимися в результате их аккумуляции и многократного переотложения. Это обуславливает развитие русел Оби и Иртыша практически в однородной геолого-геоморфологической обстановке, обеспечивающей свободные условия активного развития горизонтальных русловых деформаций [29].

Обь в среднем и нижнем течении (от впадения р. Томи до г. Салехарда) и нижний Иртыш (от слияния с р. Тоболом) представляют собой крупнейшие реки России. Ширина поймы на Оби колеблется от 10–15 км до 30–40 км с максимумом 60 км в нижнем течении (район п. Берёзово), на нижнем Иртыше – от 5–10 до 15–20 км (в низовьях на 20-километровом участке Иртыш пересекает пойму Оби). На обеих реках пойма луговая или закустаренная, местами заболоченная, с множеством пойменных озер, стариц и соров, расчлененная (на Оби и в нижнем течении Иртыша) многочисленными пойменными протоками (ответвлениями). Ширина русла изменяется в среднем от 0,5–0,8 до 2–3 км на средней и нижней Оби и от 0,5 до 1,5 км на нижнем Иртыше [29].

Особенностью средней и нижней Оби является наличие раздвоенного русла – разделения реки на два равноценных по водности рукава, проходящих в левой и правой частях днища долины на протяжении сотен километров [21]. На средней Оби оно образовано собственно Обью и левыми рукавами – протоками Юганская Обь, Большая Салымская и Неулева. Последняя самостоятельно впадает в Иртыш двумя рукавами выше его слияния с основным правым рукавом Оби. Нижняя Обь после слияния с р. Иртышом представляет собой единое русло с одиночными русловыми разветвлениями вдоль правого коренного берега – уступов Белогорского «материка». У с. Перегрёбного река разделяется на левый (Малая Обь) и правый (Горная Обь, впоследствии изменяющая свое название на Большую Обь, проходящую вдоль коренного берега) рукава. Они соединяются ниже п. Берёзово крупным квазипоперечным рукавом – протокой Большой Нюрик. Обширная по размерам затопленная в половодье пойма между Малой и Горной (Большой) Обью получила особое название – Межобье. Рукава раздвоенного русла имеют гидравлическую связь по многочисленным пойменным протокам (ответвлениям) как между собой, так и с впадающей в Малую Обь слева р. Северной Сосьвой. Рукава раздвоенного русла Оби, в свою очередь, сами образуют раздвоенное русло. Слияние рукавов – Малой и Большой Оби происходит выше г. Салехарда, после чего до конца рассматриваемого участка (290 км) она течет в едином русле, хотя и осложнённом русловыми разветвлениями.

На участке от г. Тобольска до г. Ханты-Мансийска русло Иртыша имеет субмеридиональное направление, проходит вдоль правого борта долины – возвышенности Тобольский материк, сложенной среднечетвертичными суглинками, накопившимися в эпоху самаровского оледенения [8], и имеет в основном широкую левобережную пойму.

Питание Оби и Иртыша преимущественно снеговое. Половина годового стока рек проходит во время весеннего половодья, чуть меньше – в летне-осенний период, зимой 7% стока – на Иртыше и 15% – на Оби. Среднегодовое расхождение воды Оби в г. Колпашево составляет 4030 м³/с, перед устьем Иртыша – 7350 м³/с, в д. Белогорье (ниже слияния с р. Иртышом) – 10200 м³/с, в устье у г. Салехарда – 12800 м³/с, т.е. увеличиваясь более, чем в 3 раза. Максимальные расходы воды изменяются от 29800 м³/с в г. Колпашево до 42800 м³/с в г. Салехарде. Среднегодовое расхождение воды Иртыша у г. Тобольска – 2150 м³/с, в устье – 2800 м³/с; среднемаксимальный, соответственно, – 6500 м³/с и 7950 м³/с; минимальный – 660 м³/с в устье. Средняя продолжительность половодья на средней и нижней Оби составляет 120–140 дней, на нижнем Иртыше – 130 дней, отличаясь особенно

в нижнем течении Оби долгим и глубоким затоплением поймы. Обь и Иртыш попеременно подпирают друг друга в период прохождения волн весеннего половодья, которые проходят в разное время на реках; дальность подпора распространяется на 200–400 км [25].

Среднемноголетняя мутность воды колеблется от 140 до 1400 г/м³ на средней и нижней Оби и 75–200 г/м³ – на нижнем Иртыше. Влияние Новосибирского водохранилища сказывается на водном режиме Оби до устья р. Томи, на стоке взвешенных наносов – до устья р. Кети [28; 32]. Влияние водохранилищ, находящихся в Казахстане на р. Иртыше, на гидрологическом режиме в его нижнем течении не сказывается.

Ледовые явления на обеих реках обычно появляются в ноябре, часто сопровождаясь образованием зажоров. Вскрытие рек происходит с юга на север, которому сопутствуют заторные явления.

Оценка темпов размывов берегов и определение параметров форм русла проводились на основе данных дистанционного зондирования Земли («Sentinel-2», «Landsat 5 TM», «CORONA KH-4A, В») за два временных интервала 1969–1988 гг. и 2017–2020 гг. Для определения темпов смещений русла за многолетний период были применены два метода: традиционный для Оби, заключающийся в оцифровке береговых бровок вручную, и автоматизированный – дешифрирование снимков в определенном спектре цветовых каналов спутниковых снимков и построение на их основе осевых линий русла реки, которые совмещаются за разные годы [13]. В результате по всей длине средней и нижней Оби и нижнего Иртыша были определены изменения скорости ($C_{ср}$, м/год) и протяженности фронта ($L_{фр}$, км) размыва берегов (или их отсутствие при наличии ограничивающего фактора – правого коренного берега в нижнем течении Оби и Иртыша). Для каждого фронта размыва были получены среднегодовые и среднемаксимальные скорости смещения берегов как частное от деления величины отступления береговой линии на временной промежуток (от 30 до 50 лет). Разрешение космических снимков (3–30 м) и точность методики определяют пороговое значение выявляемых скоростей размыва берегов – 0,5–1 м/год. По картам русла (ранее они назывались лоцманскими) и при проведении натурных исследований проводилось уточнение границ фронтов размыва.

Каждая форма русла (излучины, разветвления) характеризовалась следующими морфологическими параметрами: степенью развитости (l/L), радиусом кривизны (r , м), стрелой прогиба ($h_{и}$, м), шагом излучин ($L_{изл}$, м) и разветвлений ($L_{разв}$, м), l – длина излучины русла или протяженности рукава, ширина B_0 и длина L_0 островов. Последний определялся только для одиночных разветвлений; изгибы рукавов, огибающих острова, образуют излучины, имеющие аналогичное излучинам русла расположение зон размыва и аккумуляции наносов, и характеризуются такими же процессами.

Полученные результаты были откорректированы во время экспедиционных исследований на средней и нижней Оби (2018–2020 гг) и нижнем Иртыше (2021 г); при их проведении осуществлялись измерение расходов воды в рукавах русловых разветвлений и раздвоенных русел, определение скоростных полей на крутых излучинах и в узлах разветвлений с использованием доплеровского измерителя скоростей течения. Это позволило получить детальные сведения о рассредоточении стока и гидравлических характеристиках потока как факторов размыва берегов.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки влияния величины стока воды и размыва берегов ввиду небольшой плотности гидростатов был использован косвенный показатель – порядок реки. Он характеризует размер реки и изменение расходов воды вниз по течению. Порядок реки был рассчитан по схеме А.Е. Шайдегера в интерпретации Н.И. Алексеевского [1]: $N = \log_2 P + 1$ (P – количество водотоков с длиной меньше 10 км). Тесная связь между

Физическая география, ландшафтоведение и геоморфология
Куракова А.А.

среднегодовыми расходами воды ($Q_{\text{ср}}$, м³/с) и порядками Оби и Иртыша (N) описывается экспоненциальным уравнением вида $Q_{\text{ср}} = ae^{bN}$ (коэффициент корреляции достигает 0,92–0,96). С увеличением порядка, т.е. водности, возрастание скоростей размыва берегов прослеживается на нижнем Иртыше для всех излучин по верхней огибающей (рис. 2, а), а для развитых ($l/L=1,4\div 1,7$) излучин (рис. 2, б) – линейная зависимость, описываемая уравнением $C_{\text{ср}} = 17,4N - 262$. Для средней и нижней Оби изменения скорости размыва берегов в зависимости от N имеют обратный направленный тренд (рис. 2, а), что обусловлено усилением степени рассредоточенности стока по длине реки из-за постоянного расширения поймы, разветвлений русла, количества пойменных проток и развития раздвоенного русла. Исследования, проведенные на нижней Оби в период весеннего половодья, когда измеренные расходы близки к руслоформирующим, соответствующим верхнему интервалу (проходят при затопленной пойме – 33000 м³/с по г.п. Салехард [29]), подтверждают связь между водностью Малой Оби и интенсивностью горизонтальных русловых деформаций [20]: чем больше расход воды в этом левом рукаве нижней Оби в половодье, тем выше скорости размыва берегов и характеризуются зависимостью $C_{\text{ср}} = 0,0002Q_{\text{пол}} + 1,26$ (рис. 2, в).

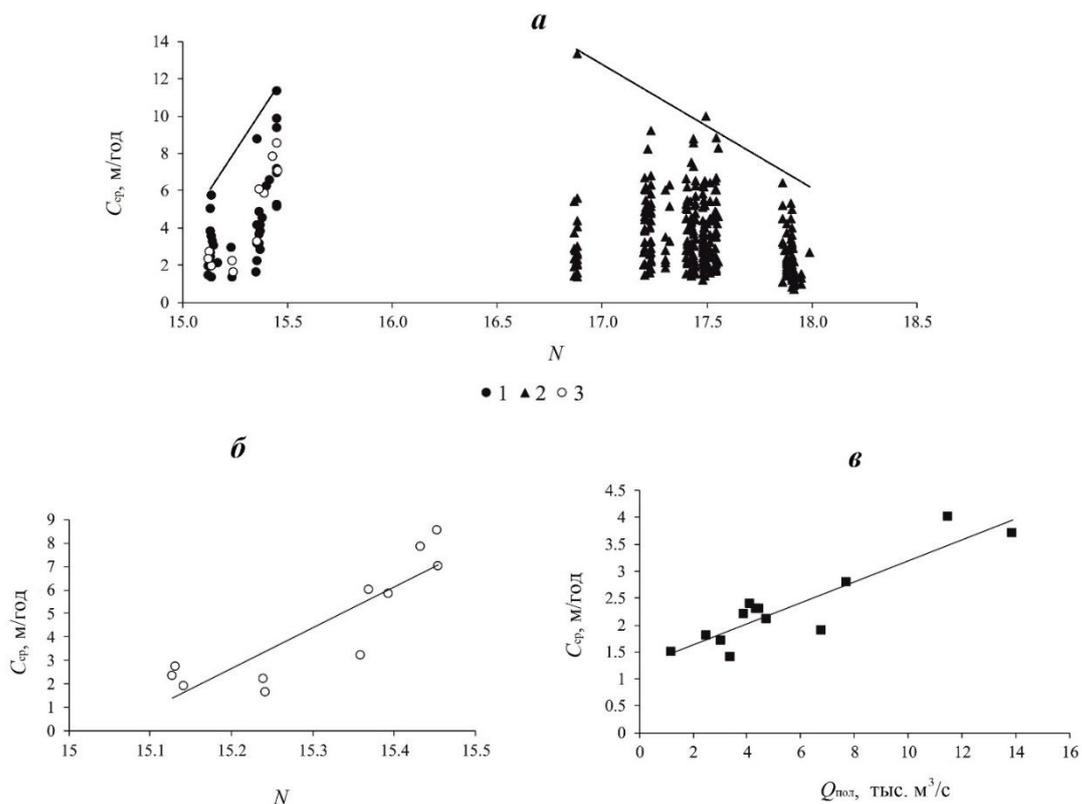


Рис. 2. Связь средней скорости размыва берегов ($C_{\text{ср}}$), порядка реки (N) на всех излучинах Иртыша (1) и Оби (2) (а) и на развитых излучинах нижнего Иртыша (3) (б) и расходов воды в половодье ($Q_{\text{пол}}$) на Малой Оби (в) [20]

Fig.2 Correlation of the average rate of riverbank erosion ($C_{\text{ср}}$), river order (N) on all the bends of the Irtysh (1) and Ob (2) (a) and on the developed bends of the Lower Irtysh (3) (б) and water discharges in the flood ($Q_{\text{пол}}$) on the Malaya Ob (в) [20].

Свободные условия развития русловых деформаций на Оби и Иртыше обуславливают высокие значения скоростей размыва берегов. На всем рассматриваемом участке Оби средние скорости изменяются от 1,0 до 13,3 м/год, среднемаксимальные – 1,1–26,6 м/год. При широком диапазоне скоростей размыва берегов их значение не имеет какого-либо

направленного тренда изменений по длине реки (от устья р. Томи до г. Салехарда) (рис. 3, а) несмотря на существенное увеличение водности (если не считать отмеченных изменений водности рукавов раздвоенного русла).

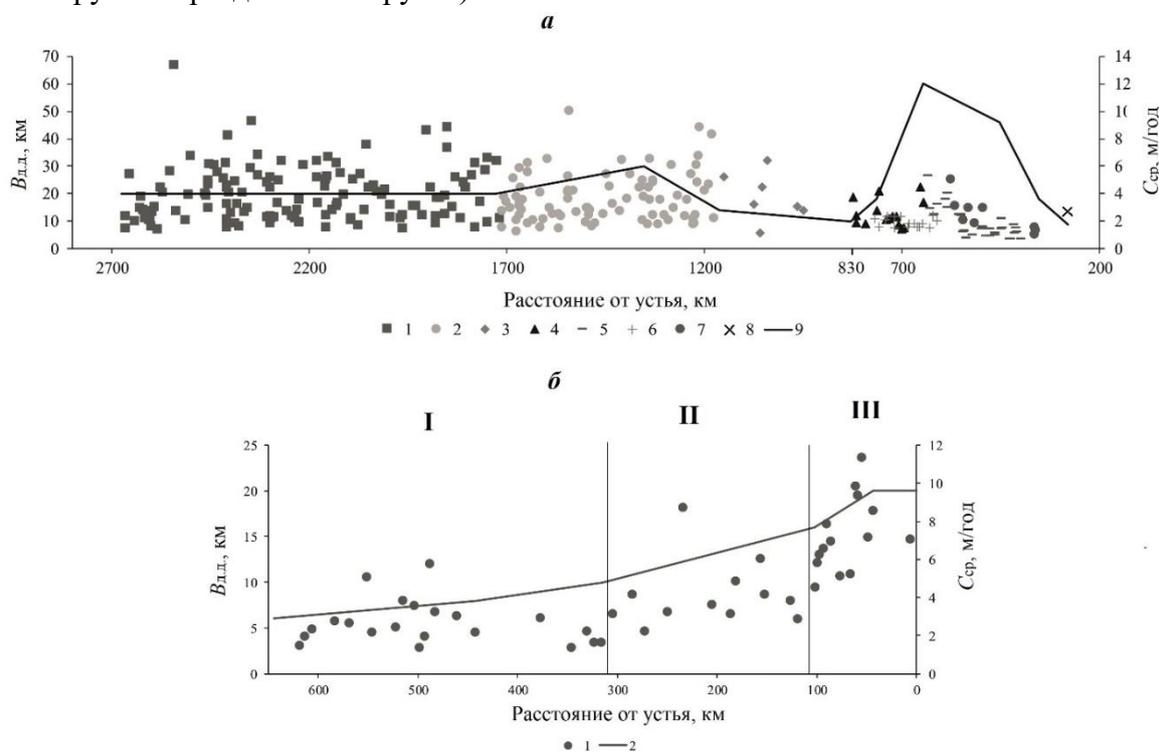


Рис. 3. Изменение скорости размыва берегов на Оби (а) и Иртыше (б) вниз по течению:

Обь (а): 1 – Обь между устьями рек Томь и Ваха, 2 – Обь между устьями рек Ваха и Иртыша, 3 – Обь от устья р. Иртыша до с. Перегрёбного, 4 – Малая Обь (от истока до поперечной протоки Большой Нюрик), 5 – Малая Обь (от поперечной протоки Большой Нюрик до устья), 6 – Горная Обь, 7 – Большая Обь, 8 – Обь ниже слияния Малой и Большой Оби, 9 – ширина дна долины;

Иртыш (б): 1 – от слияния с р. Тоболом до устья, 2 – ширина дна долины. I–III – объяснение в тексте

Fig. 3. Change in the rate of bank erosion on the Ob (a) and Irtysh (б) downstream.

The Ob (а): 1 - Ob between the mouths of the Tom and Vakh Rivers, 2 - Ob between the mouths of the Vakh and Irtysh Rivers, 3 - Ob from the mouth of the Irtysh River to Peregrebnoe village, 4 - Malaya Ob (from the source to the Bolshoy Nyurik transverse channel), 5 - Malaya Ob (from the Bolshoy Nyurik transverse channel to the mouth), 6 - Gornaya Ob, 7 - Bolshaya Ob, 8 - Ob below the confluence of the Malaya and Bolshaya Ob, 9 - the width of the valley bottom.

The Irtysh (б): 1 - from the confluence with the Tobol River to the mouth, 2 - the width of the valley bottom.

I-III – explanations are given in the text.

Очевидно, что это связано с рассредоточением стока по рукавам раздвоенного русла и русловых разветвлений, многочисленным пойменным протоком (от 1–2 до 10–15% общего расхода), существенным оттоком воды в пойму при ее затоплении (по данным Н.Б. Барышникова [3], в пойму средней Оби у г. Сургута уходит 58,5% ее стока), взаимодействием пойменного и руслового потоков; имеет значение также изменение морфодинамического типа русла, а местами – влияние коренных берегов. Размывы последних либо очень локальны, либо их отступление связано со склоновыми процессами (оползнями), которые лишь провоцируются воздействием на них потока, и, собственно говоря, они, а не размывы являются причиной их разрушения. При наличии коренного берега (Обь ниже слияния с р. Иртышом, большая часть Горной и Большой Оби) русло в основном прямолинейное; размывы пойменного берега невелики из-за субпараллельности потока и берегов либо места их локализованы у крупных побочней, отклоняющих поток, либо сосредоточены в левых пойменных рукавах одиночных разветвлений. В то же время выступы (мысы) коренных берегов оказывают направляющее воздействие на поток,

способствуя размыву противоположных пойменных берегов. Это наблюдается и на нижнем Иртыше, где формируются «выбоины» (вогнутости) пойменных берегов под направляющим воздействием на поток мысов или изгибов противоположных коренных. Исключение составляют берега, образованные уступами речных аллювиальных террас, сложенных легкоразмываемыми песчаными отложениями. Будучи вогнутыми по отношению к излучинам русла или излучинам рукавов, они характеризуются очень интенсивным (до 20–25 м/год) отступанием берегов (как в г. Колпашево), чему способствует слив осветлённых вод с выклинивающейся непосредственно выше по течению поймы.

Единственное различие в темпах размыва берегов на Оби (их сокращение по наибольшим значениям в 2 и более раза) наблюдается ниже 830 км от устья (рис. 3, а), когда на нижней Оби появляется раздвоенное русло, в котором расход воды в каждом из рукавов по сравнению со всей рекой уменьшается более, чем вдвое, обуславливая снижение интенсивности размыва берегов. К этому добавляются такие факторы, оказывающие влияние на скорости размыва, как отвлечение части стока из рукавов раздвоенного русла в пойменные протоки (ответвления), а также в пределы очень широкой поймы (максимальная для всех рек России – от 40 до 60 км) во время ее длительного и глубокого затопления, снижая долю расхода воды в половодье в рукавах раздвоенного русла до 10% общей водности реки.

От слияния с р. Томью до устья р. Ваха средние скорости размыва берегов на Оби составляют 3,1 м/год, максимальные – 26,6 м/год (таблица). Ниже, где впервые появляется раздвоенное русло, в его главном рукаве (собственно Обь) средние скорости размыва берегов остаются неизменными – 3,2 м/год, тогда как максимальные снижаются до 17,6 м/год [21; 31].

Таблица

Характеристики размыва берегов на средней и нижней Оби и нижнем Иртыше
Characteristics of riverbank erosion on the Middle and Lower Ob and Lower Irtysh

Номер участка (рис. 1)	Характеристика размыва берегов		
	$S_{ср.}$, м/год	$S_{ср\max}$, м/год	$L_{фр.}$, км
I	3,1	26,6	944
II	2,1	17,6	680
III	2,3	16,6	798
IV	1,5	10,7	535
V	1,3	11,9	76
VI	1,9	13,0	84
VII	5,5	17,2	46

По-видимому, это связано с тем, что здесь отвлечение части стока в левые рукава раздвоенного русла не приводит к общему увеличению рассредоточенности потока по затопленной пойме и пойменным протокам по сравнению с вышерасположенным участком средней Оби, сохраняясь в тех же пределах. В левых рукавах раздвоенного русла средней Оби, водность которых составляет от 19–31 в их истоке и до 33–40% от общего стока реки в низовьях, скорости размыва меньше в 1,5–2 раза: средние скорости размыва в Юганской Оби – 1,8 м/год, Большой Салымской протоке – 1,9 м/год, протоке Неулева – 1,4 м/год, максимальные – 5,3, 4,2 и 3,1 м/год, соответственно.

Ниже слияния с Иртышом русло Оби консолидируется вдоль правого коренного берега; скорости размыва левых пойменных берегов в одиночных разветвлениях в среднем равны 2,8 м/год с максимумом – 16,6 м/год. Такие же скорости характерны и для размывов островов. В раздвоенном русле нижней Оби (от 830 км) наблюдается общее снижение интенсивности размыва берегов. При этом, с одной стороны, прослеживается тесная связь между интенсивностью горизонтальных русловых деформаций и изменениями расходов воды, с другой, важную роль играет наличие коренного берега у правых рукавов

раздвоенного русла. Так, в верхней части Малой Оби из-за оттока воды в рукава ее раздвоенного русла (Тоготская Обь, протока Вайсова) и пойменные протоки, в том числе связывающие ее с р. Северной Сосьвой (Лапорская, Пырсим), наблюдается снижение скорости до минимальных значений – 1,4 м/год. Исключение составляют два участка заметной активизации размыва берегов (до 4,2 м/год), в пределах которых произошли образование и развитие пойменно-руслых разветвлений: с одной стороны, существенно (в несколько раз) возрастает водность бывшей нижней части пойменной протоки, превращаясь в левый рукав разветвления, а, с другой, началась перестройка излучин русла Малой Оби из-за сокращения ее водности. После слияния с Тоготской Обью и р. Северной Сосьвой средние скорости вновь увеличиваются до 4,5 м/год. Максимальные скорости размыва берегов на Малой Оби не превышают 10,1 м/год. На Горной Оби, протекающей вдоль правого коренного берега, скорости размыва ниже: средняя – 1,9, максимальная – 6,8 м/год. Заметное снижение темпов размыва берегов имеет место при отходе от нее Сомутнельской протоки (до 1,5 м/год) по сравнению с участками выше и ниже по течению [34].

Перераспределение стока по поперечной протоке Большой Нюрик между Малой и Большой Обью в пользу последней привело к изменению интенсивности размыва берегов в рукавах раздвоенного русла. На Малой Оби ниже по течению вновь наблюдается постепенное снижение размыва берегов по мере рассредоточения стока по пойменным протокам и при ответвлении левого рукава (Малой Горной Оби) до минимальных значений – 1,2 м/год; максимальные скорости на крутых излучинах остаются на том же уровне – 10,7 м/год. На Большой Оби (ниже слияния Горной Оби с протокой Большой Нюрик) средние скорости размыва возрастают до 4,5 м/год, но затем, там, где этот рукав располагается вдоль правого коренного берега, наблюдаются лишь локальные размывы левобережной поймы, и только в низовьях его, ниже ответвления вправо Игорской Оби, где появляется правобережная пойма, скорости отступления берегов в рукавах русловых разветвлений составляют до 1,7 м/год. Ниже слияния Малой и Большой Оби средние скорости размыва берегов составляют 1,7 м/год, максимальные – 7,4 м/год [35].

На нижнем Иртыше средние скорости размыва берегов колеблются от 1,3 до 11,3 м/год (рис. 3, б), максимальная – 17,2 м/год, в целом возрастают вниз по течению. По геолого-геоморфологическим условиям формирования русла нижнее течение реки можно разделить на 3 участка: I – между устьями рек Тобола и Демьянки, II – между устьями рек Демьянки и Конды, III – от устья р. Конды до слияния с Обью, различающиеся по ширине поймы и взаимодействию русла с коренным правым берегом, что отражается в темпах отступления берегов. Первый (I) участок нижнего Иртыша характеризуется относительно суженным днищем долины (до 10 км), отсутствием пойменных протоков (ответвлений); русло образует «большие» излучины, вершины которых касаются противоположных бортов долины; при подходе к коренному берегу формируются трапециевидные, вынужденные и вписанные излучины; имеются три очень крутых петлеобразных излучины, в пределах которых русло пересекает все днище долины. Средняя скорость размыва берегов составляет 1,3 м/год, среднемаксимальная – 11,9 м/год. На втором (II) участке днище долины расширяется до 12 км; русло реки, хотя и тяготеет к правому борту долины, возле которого образует вынужденные и вписанные излучины, в основном свободно меандрирует. Средние и максимальные скорости размыва берегов возрастают до 1,9 и 13,0 м/год, соответственно. Для первых двух участков характерно наличие локальных повышений скоростей размыва берегов, приуроченных в первом случае к спрямленной излучине (образование прорана за счет встречного размыва берегов на крыльях излучины), а во втором – к прорванной излучине (образование и развитие спрямленного рукава, в котором сосредоточены основные размывы, тогда как старый отмирает и превращается в пойменную протоку). Третий (III)

Физическая география, ландшафтоведение и геоморфология
Куракова А.А.

участок характеризуется самой большой шириной дна долины – до 20 км, в низовьях соединяющейся с долиной р. Оби. Пояс меандрирования занимает центральное положение, образуя несколько серий свободных излучин. Появляются пойменные протоки (ответвления), расчленяющие пойму. Это, как и расширение поймы и разливов реки в половодье, является причиной уменьшения параметров форм русла и формирования островов в привершинных частях и на крыльях излучин. В то же время, в связи с общим возрастанием водоносности реки и отсутствием ограничивающего влияния коренного берега, интенсивность размыва берегов на данном участке самая высокая: средняя – 5,5, максимальная – 17,2 м/год.

На всем протяжении средней и нижней Оби происходит постоянная смена морфодинамических типов русла – относительно прямолинейного, неразветвленного, преобладающего на реке извилистого (меандрирующего) и разветвленного, в том числе раздвоенного русла, рукава которых обладают таким же набором типов русла. Средняя Обь между устьями рек Томи и Ваха характеризуется преобладанием свободных излучин (35,2%) и пойменно-руслых разветвлений (20,6%), рукава которых образуют по несколько излучин [17]. Ниже до слияния с р. Иртышом основной правый рукав раздвоенного русла в основном меандрирует (44,1%), но значимую долю составляют разветвления – сопряженные и сложные трехрукавные пойменно-руслые (11,0 и 11,9%, соответственно) [31]. Русло нижней Оби сначала, располагаясь вдоль правого коренного берега, является морфологически однородным участком, представленным одиночными разветвлениями, разделенными прямолинейными отрезками русла (93,7%). Малая Обь имеет извилистое русло; доля излучин в нем постепенно снижается вниз по течению (с 53,7 до 37,6%), тогда как протяженность прямолинейного русла, наоборот, увеличивается (с 16,6 до 27,2%). На Горной Оби почти треть длины русла приходится на прямолинейные участки – 23,8%, доля свободных излучин – 35,1%, одиночных разветвлений – 22,6% [34]; на Большой Оби доля прямолинейного русла возрастает вдвое – 48,4% [35]. Ниже слияния Малой и Большой Оби и до г. Салехарда река в основном представлена прямолинейным неразветвленным руслом (43,3%) и параллельно-рукавными разветвлениями (31,7%). Каждый из типов русла отличается своими особенностями расположения размываемых берегов, причем в русловых разветвлениях рукава, огибающие острова, образуют, как правило, пологие или развитые излучины.

Снижение доли меандрирующего русла Оби вниз по течению объясняется ее большой водностью и, соответственно, шириной русла, разделением потока на две-три или более динамических осей (стрежневых зон), что обуславливает формирование либо разветвленных, либо прямолинейных русел, осложненных вторичными разветвлениями или осередками [6]. Это – одна из причин отличий морфологии русла Оби от нижнего Иртыша, который до самого устья сохраняет извилистое русло (65,9% общей длины); иногда излучины осложнены разветвлениями в привершинных частях и на крыльях излучин, протоки в которых относительно маловодны (до 10–15%). Почти половина береговой линии нижнего Иртыша (41,8%) размывается, приходясь на свободные излучины, скорости размыва достигают в среднем 3,3 м/год, максимум – 17,2 м/год. На Оби излучины (практически все они с островами в привершинных частях или на крыльях) приурочены в среднем течении к основному руслу, в нижнем – к рукавам раздвоенного русла или пойменно-руслым разветвлениям, часто встречаются русловые разветвления, рукава которых также образуют изгибы русла.

Распределение соотношения общей протяженности размываемых берегов ($L_{фр}$) и суммарной длины береговой линии (X) (рис. 4, а) и средней скорости размыва берегов ($C_{ср}$, м/год) (рис. 4, б) по типам русла показывает, что практически все эти показатели для нижней Оби несколько ниже, чем для средней.

Это также объясняется увеличением вниз по течению продолжительности и глубины

Физическая география, ландшафтоведение и геоморфология
Куракова А.А.

затопления поймы при ее расширении до 60 км и бóльшей рассредоточенностью стока в крупнейшем раздвоенном русле в нижнем течении реки, что приводит к снижению удельной величины руслоформирующего расхода воды. В среднем течении (выше устья

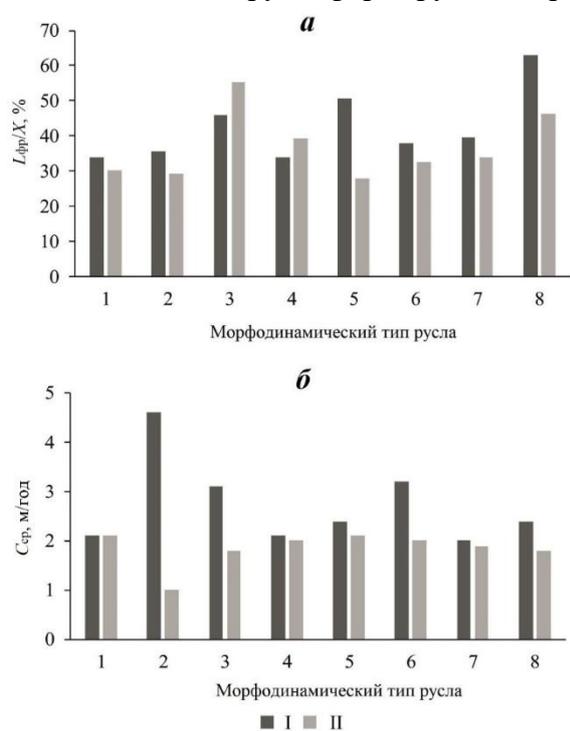


Рис. 4. Относительная протяженность ($L_{фр}/X$, где $L_{фр}$ – общая протяженность фронтов размыва, X – суммарная длина береговой линии) (а) и средние скорости ($C_{ср}$) (б) на средней (I) и нижней (II) Оби в различных типах русла:

1 – прямолинейное русло; излучины: 2 – вынужденные, 3 – вписанные, 4 – свободные, 5 – прорванные; разветвления: 6 – русловые (островные), 7 – одиночные, в т.ч. чередующиеся, 8 – пойменно-русловые.

Fig. 4. Relative length ($L_{фр}/X$, where $L_{фр}$ is the total length of erosion fronts, X is the total length of the coastline) (a) and average rate ($C_{ср}$) (б) on the Middle (I) and Lower (II) Obi in various channel types:

1 - rectilinear channel; bends: 2 - forced, 3 - inscribed, 4 - free, 5 - broken; branches: 6 - channel (island), 7 - single, 8 - floodplain-channel.

высоки средние скорости вогнутых берегов вписанных излучин, а также в некоторых русловых разветвлениях (параллельно-рукавных, сопряженных), где стрежень потока под большим углом подходит к пойменным берегам или островам. В нижнем течении Оби скорости размыва на свободных излучинах несколько снижаются из-за их распространения в рукавах раздвоенного русла. Этот же фактор имеет большое значение и для пойменно-русловых и одиночных разветвлений (соотношение расходов воды чаще всего около 1:1), рукава которых почти всегда образуют пологие или развитые излучины.

Степень развитости свободных излучин русла или рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных рукавов, излучин рукавов, огибающих острова в одиночных или сопряженных разветвлениях, определяет скоростное поле потока, расположение и протяженность фронта и интенсивность размыва берегов в их пределах [20; 21; 35]. На Оби и

р. Кети) руслоформирующий расход воды проходит в бровках поймы и только на широтном участке и в нижнем течении – при ее полном затоплении [29]. Для обоих участков Оби наибольшие значения $L_{фр}/X$ характерны для пойменно-русловых разветвлений, рукава которых образуют серии излучин (от 2 до 6) со своими фронтами размыва берегов, и вписанных излучин, где вогнутый берег сложен легкоразмываемыми песчаными отложениями (рис. 4, а). На средней Оби высокие значения $L_{фр}/X$ наблюдаются также в прорванных излучинах, в которых наряду с активным развитием спрямляющего рукава продолжает функционировать старое русло, тогда как в нижнем течении Оби их всего 3, находящихся на Горной Оби.

Самые высокие значения средних скоростей размыва присущи вынужденным излучинам (рис. 4, б), в которых происходит активный размыв пойменного берега в верхнем крыле, а нарушение условия безотрывного обтекания потоком берегов ($r > 3b_p$) [24] обуславливает образование водоворотной зоны у вогнутого берега, что приводит к смещению динамической оси потока и размыву выпуклого. В то же время большое влияние оказывают слив осветленных вод с выклинивающегося выше по течению пойменного массива, а также постепенное увеличение угла подхода потока к коренному берегу, что также способствует активизации размыва последнего. На средней Оби достаточно

нижнем Иртыше точки на графике связи скорости размыва берегов от степени развитости свободных излучин русла и излучин рукавов можно разделить на группы в соответствии со степенью развитости форм русла (рис. 5, а, б): I – пологие ($l/L=1,1\div 1,4$), II – развитые ($l/L=1,4\div 1,7$) и III – крутые ($l/L > 1,7$) (по классификации [33]); они все описываются верхними огибающими как для Оби в целом, так и отдельно для ее участков, а также для нижнего Иртыша, показывая, что скорости размыва берегов растут на излучинах с $l/L < 1,7$, после чего интенсивность горизонтальных деформаций снижается.

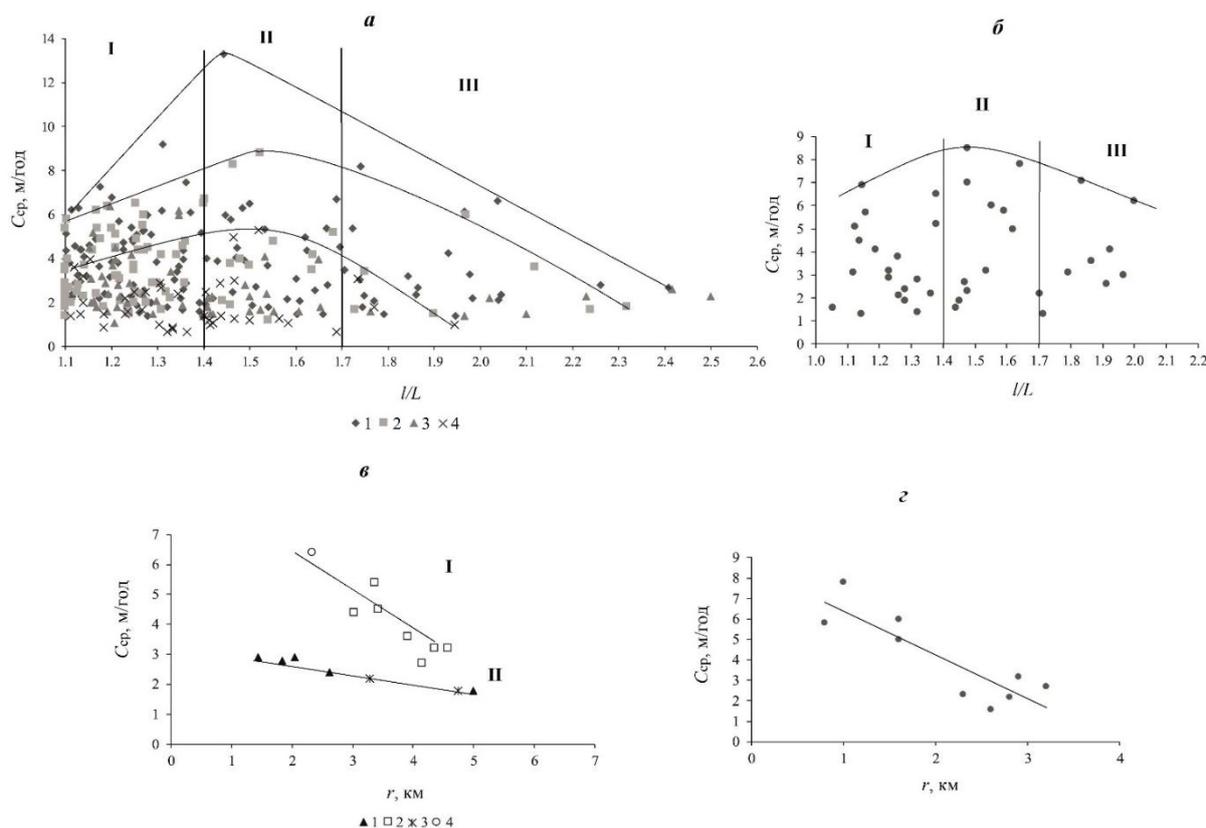


Рис. 5. Гидролого-морфологические зависимости размывов берегов на излучинах русла, изгибах рукавов русловых (островных разветвлений), пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел средней и нижней Оби (а, в) и нижнего Иртыша (б, з):

а – связь степени развитости (l/L) и средней скорости размыва берегов ($C_{\text{ср}}$, м/год): 1 – средняя Обь (между устьями рек Томь и Вах), 2 – средняя Обь (между устьями рек Вах и Иртыш), 3 – нижняя Обь (от слияния с р. Иртышом до протоки Большой Нюрик), 4 – нижняя Обь (от протоки Большой Нюрик до г. Салехарда).

I–III – объяснение в тексте;

б – связь степени развитости (l/L) и средней скорости размыва берегов ($C_{\text{ср}}$, м/год). I–III – объяснение в тексте;

в – связь радиуса кривизны (r , км) и средней скорости размыва берегов ($C_{\text{ср}}$, м/год) [21]: 1- пойменно-русловые разветвления, 2 – свободные излучины, 3 – сопряженные разветвления, 4 – одиночные разветвления.

I, II – объяснение в тексте;

з – связь радиуса кривизны (r , км) и средней скорости размыва берегов ($C_{\text{ср}}$, м/год)

Fig. 5. Hydrological and morphological dependences of bank erosion at channel bends, bends of channel branches (island ramifications), floodplain-channel branching, and bifurcated channels of the Middle and Lower Ob (a, v) and Lower Irtysh (b, z). a – relationship between the degree of development (l/L) and the average rate of bank erosion ($C_{\text{ср}}$, m/year): 1 – Middle Ob (between the mouths of the Tom and Vakh Rivers), 2 – Middle Ob (between the mouths of the Vakh and Irtysh Rivers), 3 – Lower Ob (from the confluence with the Irtysh River to the Bolshoi Nyurik channel), 4 – Lower Ob (from the Bolshoy Nyurik channel to the city of Salekhard). I–III – explanations are given in the text; б – relationship between the degree of development (l/L) and the average rate of coastal erosion ($C_{\text{ср}}$, m/year). I–III – explanations are given in the text; в – relationship between the radius of curvature (r , km) and the average rate of bank erosion ($C_{\text{ср}}$, m/year) [21]: 1 – floodplain-channel forks, 2 – free meanders, 3 – conjugated forks, 4 – single forks. I, II – explanations are in the text; з – relationship between the radius of curvature (r , km) and the average coast erosion rate ($C_{\text{ср}}$, m/year).

Пологие излуцины и изгибы рукавов в русловых (островных) разветвлениях на Оби и Иртыше, для которых слабо выражены дифференциация поля скорости потока и циркуляционные течения, представлены полем точек (рис. 5 а, б), на которые оказывают большее влияние местные условия (тип русла и сопряжение с соседними формами русла, наличие побочной или осередков, взаимодействие пойменного и руслового потоков и т.д.), локально воздействующие на структуру потока. При переходе к развитым излуцинам ($l/L=1,4\div 1,7$) на средней и нижней Оби интенсивность размыва берегов достигает максимума (рис. 5, а), после чего снижается, на нижнем Иртыше это происходит после достижения $l/L\approx 1,55$ (рис. 5, б). Это обусловлено утратой извилистой формой русла гидравлической выгоды, ростом потерь напора [24] и, как следствие, снижением интенсивности русловых деформаций [26; 33]. На этом этапе возрастает также вероятность (максимум при $l/L=1,6$) спрямления излуцины за счет сосредоточения значительной части вод, затопивших пойму в половодье, в тыловой части пойменной шпоры, и установления вдоль него большего продольного уклона [26]. Отсутствие на Оби, в отличие от нижнего Иртыша, явной границы перехода к снижению скоростей размыва берегов, вероятно, обусловлено большим количеством факторов, влияющих на формирование и развитие свободных излуцин (распределение стока по рукавам разветвлений и раздвоенного русла, взаимодействие руслового и пойменного потоков при длительном и глубоком затоплении поймы, сопряжение с соседними типами русла и т.д.). При дальнейшем увеличении l/L , когда излуцины на Оби и Иртыше становятся крутыми или даже гипертрофированными ($r>3b_p$) по форме, скорости размыва берегов еще больше уменьшаются. Такая закономерность распределения скоростей размыва берегов как на Оби, так и на Иртыше соответствует переходу от пологих излуцин к развитым, а затем к крутым, что также отражается в последовательной смене продольного смещения продольно-поперечным и поперечным [33].

Другой важный параметр – радиус кривизны (r , км) не является безразмерным; поэтому анализ связи с ним размывов берегов проводится по участкам с одинаковой водностью, так как $r=f(Q)$. При большом радиусе кривизны (излуцины более пологие) средняя скорость размыва берегов меньше, так как у них циркуляционные течения выражены сравнительно слабо, а скорости потока относительно выровнены по ширине русла. Для развитых излуцин нижнего Иртыша, находящихся в однородных условиях, наиболее полно отражающих на данном этапе развития условия формирования русла и имеющих хорошо выраженное скоростное поле потока и развитые циркуляционные течения [33] (рис. 5, з), и формы русла средней Оби (на участке от истока до устья Юганской Оби) (рис. 5, в), а также ниже слияния с р. Иртышом [20; 21], зависимость $C=f(r)$ описывается линейными уравнениями вида $C_{cp}=-ar+b$, причем точки на средней Оби (рис. 5, в) разделяются по типам русла (I – излуцины русла и рукавов одиночных разветвлений в основном русле, II – излуцины рукавов пойменно-русловых и сопряженных разветвлений) (рис. 5, б). Очевидно, что различия в зависимостях связаны с большей рассредоточенностью стока в последнем случае [21].

Меньшие темпы размыва берегов при больших радиусах кривизны русла коррелируют с увеличением протяженности фронта размыва берегов, что объясняется обратной зависимостью радиуса r от степени развитости излуцины: $r\sim(l/L)^n$ [33]. Это нашло подтверждение как на средней [21], так и на нижней Оби, в частности, в правом рукаве ее раздвоенного русла – Горной Оби (рис. 6, а). Данная зависимость описывается для верхней огибающей уравнением $L_{фр}=0,01r^2+0,1r+0,42$. При этом все точки разделилась на две группы: I – излуцины раздвоенного русла Горной Оби в пойменных берегах (после отвлечения 42,0% в Сомутнельскую протоку) и прорванная излуцина выше по течению, представляющая собой также разветвление русла; II – излуцины, относящиеся к единому руслу Горной Оби, в основном выше ее раздвоения, и испытывающие влияние правого коренного берега. Отдельно выделяется связь для излуцин единого русла Горной Оби ниже

Физическая география, ландшафтоведение и геоморфология
Куракова А.А.

впадения Сомутнельской протоки (III) с двусторонней поймой, характеризующихся линейной зависимостью $L_{фр}=9,28r-19,07$. В то же время на нижнем Иртыше, на котором встречаются исключительно излучины русла, зависимость также имеет линейный вид – $L_{фр}=1,89r+1,15$ (рис. 6, б).

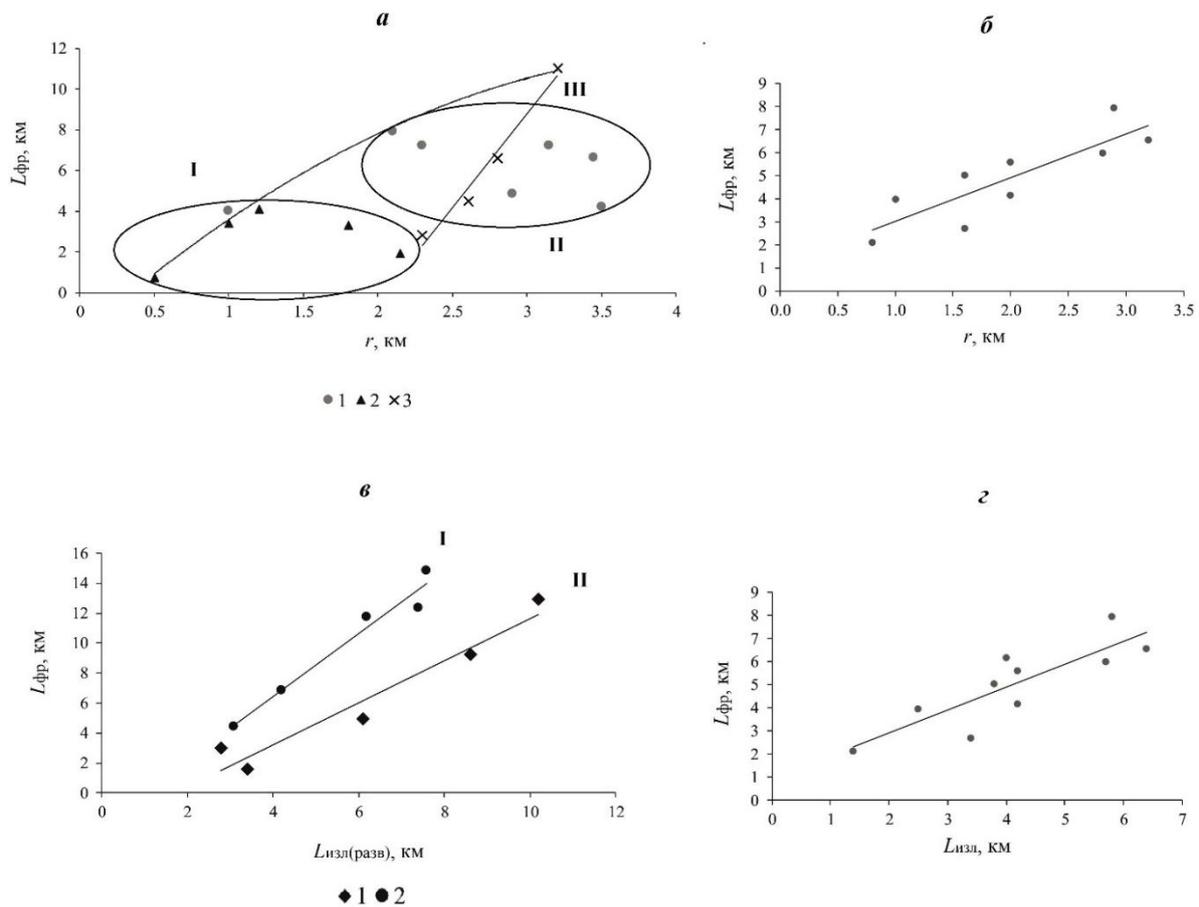


Рис. 6. Гидролого-морфологические зависимости размывов берегов на излучинах русла, изгибах рукавов русловых (островных разветвлений), пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел нижней Оби (а, в) и нижнего Иртыша (б, з):

а – связь радиуса кривизны (r , км) и протяженности фронтов размыва ($L_{фр}$, км) на Горной Оби:

1 – от истока Горной Оби до ответвления Сомутнельской протоки, 2 – Горная Обь от истока до устья Сомутнельской протоки (раздвоенное русло), 3 – от устья Сомутнельской протоки до слияния Горной Оби и протоки Большой Нюрик,

б – связь радиуса кривизны (r , км) и протяженности фронтов размыва ($L_{фр}$, км),

в – связь шага одиночных разветвлений нижней Оби ($L_{разв}$, км) (1) и излучин русла Малой Оби ($L_{изл}$, км) (2) и протяженности фронтов размыва ($L_{фр}$, км),

з – связь шага излучин ($L_{изл}$, км) и протяженности фронтов размыва ($L_{фр}$, км)

Fig. 6. Hydrological and morphological dependences of bank erosion at channel bends, bends of channel branches (island ramifications), floodplain-channel branching and bifurcated channels of the Lower Ob (а, в) and Lower Irtysh (б, з) а – relationship between the radius of curvature (r , km) and the length of erosion fronts ($L_{фр}$, km) on the Gornaya Ob: 1 – from the source of the Gornaya Ob to the branch of the Somutnel branch, 2 – the Gornaya Ob from the source to the mouth of the Somutnel branch (forked channel), 3 – from the mouth of the Somutnel channel to the confluence of the Gornaya Ob and the Bolshoi Nyurik channel,

б – relationship between the radius of curvature (r , km) and the extent of erosion fronts ($L_{фр}$, km),

в – relationship between the pitch of single branches of the Lower Ob ($L_{разв}$, km) (1) and the meanders of the Malaya Ob channel ($L_{изл}$, km) (2) and the length of the erosion fronts ($L_{фр}$, km),

з – relationship between the step of the meanders ($L_{изл}$, km) and the length of the erosion fronts ($L_{фр}$, km)

Физическая география, ландшафтоведение и геоморфология
Куракова А.А.

Наибольшая протяженность фронтов размыва берегов у более пологих излучин подтверждается не только связью $L_{\text{фр}}=f(r)$, но и зависимостью от шага излучин ($L_{\text{изл}}$) или разветвлений ($L_{\text{разв}}$). На развитых излучинах нижнего Иртыша она описывается уравнением $L_{\text{фр}}=L_{\text{изл}}+0,94$: излучины с меньшим шагом (т.е. более развитые) имеют более короткий фронт размыва берегов по сравнению с излучинами, характеризующимися большим шагом (т.е. более пологие) (рис. 6, з). На Оби в отличие от Иртыша, ввиду большего морфологического разнообразия русла, эта связь проявляется отдельно для русловых (островных) разветвлений и для излучин русла в рукавах пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел [20; 21]. В едином русле нижней Оби (от слияния с Иртышом до с. Перегрёбного), представленного исключительно одиночными разветвлениями, протяженность размываемых берегов ($L_{\text{фр}}$) больше у тех из них, которые образованы большими островами («конгломератами» из 8–10 объединившихся элементарных островов [10]): $L_{\text{фр}}=1,4L_{\text{разв}}-2,43$ (рис. 6, в); в левом рукаве раздвоенного русла – Малой Оби, русло которой меандрирует, – $L_{\text{фр}}=2,11L_{\text{изл}}-2,02$ (рис. 6, в).

Заключение

Обь и Иртыш характеризуются активными горизонтальными деформациями, представляющими реальную и потенциальную угрозу для хозяйственного и транспортного освоения рек и прибрежной территории (следует иметь в виду, что большинство инфраструктурных объектов находится на пойме).

На средней и нижней Оби отсутствует направленный тренд в изменении темпов размыва берегов вниз по течению; основную роль в этом процессе играют рассредоточение стока по рукавам раздвоенного русла и пойменным протокам (ответвлениям), длительное и глубокое затопление поймы, что приводит к общему снижению скорости потока и расходов воды и, следовательно, интенсивности отступления берегов. На нижнем Иртыше, наоборот, наблюдается возрастание скоростей размыва берегов вниз по течению в соответствии с увеличением его водности и по мере снижения влияния коренного берега на развитие излучин.

Для средней и нижней Оби характерно большее разнообразие типов русла, чем на нижнем Иртыше, имеющем преимущественно меандрирующее (извилистое) русло. Интенсивность размыва берегов в различных типах русла выше на средней Оби, чем в ее нижнем течении, что обусловлено рассредоточенностью стока и влиянием коренных берегов. Наиболее активные горизонтальные русловые деформации на Оби приурочены к пойменно-русловым разветвлениям с меандрирующими рукавами и вписанным излучинам.

Гидролого-морфологический анализ показал, что характеристики размывов берегов ($C_{\text{ср}}$, м/год, $L_{\text{фр}}$, км) как на Оби, так и на Иртыше зависят от параметров форм русла, которые определяют структуру скоростного поля потока и циркуляционные течения, оказывая влияние на темпы и длину фронта размыва. С ростом степени развитости форм русла скорости размыва берегов на Оби и Иртыше возрастают, достигая максимальных значений в диапазоне $l/L=1,4\div 1,7$, после чего они снижаются. Наибольшая протяженность фронта размыва берегов наблюдается, как правило, у более пологих излучин с большим шагом и радиусом кривизны.

Список источников

1. 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.
2. Баженова О.И. Развитие излучин и современные геоморфологические процессы на Средней Оби // Тр. ин-та географии Сибири и Дальнего Востока АН СССР. 1975. Вып. 59. С. 64–71.

3. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 456 с.
4. Беркович К.М., Власов Б.Н. Особенности русловых процессов на реках Нечерноземной зоны РСФСР // Вестник Московского ун-та. Сер. 5. География, 1982. № 3. С. 28–34.
5. Боровков С.В. Инженерное регулирование русла реки Иртыш в районе г. Ханты-Мансийска // Вест. гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала СО Макарова. 2010. №. 2(6). С. 167–171.
6. Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Госфизматиздат, 1958. 395 с.
7. 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 третье пленар. межвуз. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: докл. и краткие сообщ. Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2018. С 30–38.
8. Воскресенский С.С. Геоморфология СССР. М.: Высшая школа, 1968. 368 с.
9. Герасимова А.С. Характеристика современных геологических процессов, развитых в долинах нижнего течения рек Оби и Иртыша // Вестник Московского ун-та. Сер. Биология, почвоведение, геология, география. 1959. № 2. С. 103–111.
10. Голубцов Г. Б., Чалов Р. С. Острова верхней Оби: морфометрическая характеристика, эволюция и динамика // Геоморфология. 2019. № 1. С. 81–92.
11. Дегтярев В.В. Улучшение судоходных условий сибирских рек. М.: Транспорт, 1987. 176 с.
12. Завадский А.С., Ильясов А.К., Рулёва С.Н., Сурков В.В., Турыкин Л.А., Чалов Р.С. Эволюция Колпашевской излучины Оби и развитие опасных проявлений русловых процессов // География и природные ресурсы. 2013. № 1. С. 56–64.
13. 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. Вып. 21. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2019. С. 149–170.
14. Земцов А.А. Геоморфология Западно-Сибирской равнины (северная и центральная части). Томск.: Изд-во ТГУ, 1976. 344 с.
15. Земцов А.А., Бураков Д.А. Перемещения русла р. Оби и их прогноз // Природа и экономика севера Томской области. Томск: Изд-во ТГУ, 1977. С. 8–25.
16. Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г. Исследования в области динамики потоков, стока наносов и русловых деформаций на сибирских реках методом компьютерного моделирования // Тридцатое пленар. юбилейное межвуз. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: докл. и краткие сообщ. Набережные Челны, 2015. С. 59–72.
17. Камышев А.А., Рулёва С.Н., Чалов Р.С. Рассредоточение стока воды в разветвлениях русла средней Оби // Географический вестник. 2017. № 3(42). С. 48–53.
18. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
19. Коркин С.Е., Исынов В.А. Многолетний мониторинг русловых деформаций реки Обь на примере ключевого участка «Усть-Вахский» // Эволюция эрозионно-русловых систем, её хозяйственно-экономические и экологические последствия, прогнозные оценки и учёт. Уфа: Аэтерна, 2017. С. 156–158
20. Куракова А.А., Чалов Р.С. Морфология русла и размывы берегов Нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) // Вестник Московского ун-та. Сер. 5. География. 2020. №. 6. С. 41–50.
21. Куракова А.А., Чалов Р.С. Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла // Географический вестник. 2019. № 3(50). С. 34–47.
22. Льготин В.А. Новые данные о деформациях русла р. Оби // Вопросы географии Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 1984. С. 115–120.
23. Льготина Л.П. Из истории изучения природы территории Томской области (дореволюционный период) // Вопросы географии Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. С. 78–83.

24. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
25. Петров И.Б. Обь-Иртышская пойма (типизация и качественная оценка земель). Новосибирск: Наука, 1979. 136 с.
26. Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
27. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства. ПНИИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1987. 200 с.
28. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 336 с.
29. Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
30. Третьяков Е.В. Деформации берегов р. Оби в Тюменской области // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 3. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. С. 276–284
31. Чалов Р.С., Камышев А.А., Завадский А.С., Куракова А.А. Морфодинамика и гидролого-морфологическая характеристика русла средней Оби на широтном участке // География и природные ресурсы. 2021. № 2. С. 92–102.
32. Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во Московского ун-та, 2000. 216 с.
33. Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 371 с.
34. Чалов Р.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Завадский А.С. Особенности рассредоточения стока воды и взвешенных наносов в половодье в раздвоенном русле нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 1. С. 22–33.
35. Чалов Р.С., Завадский А.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Гидролого-морфологическая характеристика и переформирования разветвленного русла нижней Оби (в пределах Ямало-Ненецкого АО) // Изв. РАН. Сер. географ. 2021. Т. 85, № 4. С. 539–553.
36. Constantine C. R., Dunne T., Hanson G. J. Examining the physical meaning of the bank erosion coefficient used in meander migration modeling // *Geomorphology*. 2009. № 106. P. 242–252
37. Ikeda S., Parker G., Sawai K. Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development // *J. Fluid Mech.* 1981. № 112. P. 363–377.
38. Rutherford I. Some human impacts on Australian stream channel morphology // *River Management: The Australasian Experience*. Chichester, John Wiley & Sons, 2000. P. 2–52.

References

1. Alekseevskii, N.I., Aibulatov, D.N., Kosickii, A.G. (2004), Large-Scale Effects of Changes in Runoff in the Channel Network of the Territory, *Geografiya, obshchestvo i okruzhayushchaya sreda. Dinamika i vzaimodeistviya atmosfery i gidrosfery*, vol. 6, pp. 345–412.
2. Bazhenova, O.I. (1975), Development of meanders and modern geomorphological processes in the Middle Ob, *Tr. in-ta geografii Sibiri i Dal'nego Vostoka AN SSSR*, vol. 59, pp. 64–71.
3. Baryshnikov, N.B., Popov, I.V. (1988), *Dinamika ruslovyh potokov i ruslovyh process* [Channel flow dynamics and channel processes], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.
4. Berkovich, K.M., Vlasov, B.N. (1982), Peculiarities of channel processes on the rivers of the Non-Chernozem zone of the RSFSR, *Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, no. 3, pp. 28–34.
5. Borovkov, S.V. (2010), Engineering regulation of the Irtysh river bed in the area of Khanty-Mansiysk, *Vest. gos. un-ta morskogo i rechnogo flota im. admirala SO Makarova*, no. 2(6), pp. 167–171.
6. Velikanov, M.A. (1958), *Ruslovoj process (osnovy teorii)* [Channel process (fundamentals of theory)], Gosfizmatgiz, Moscow, Russia.
7. Vershinin, D.A., Zemcov, V.A., Inishev, N.G., Tarasov, A.S., Domrachev, E.A. (2018), Problems of channel processes in the rivers of Western Siberia and the results of research in this area», *Tridcat' tret'e plenar. mezhvuz. soveshch. po probleme erozionnyh, ruslovyh i ust'evykh processov: Dokla. i kratkie soobshch.*, Nizhnevartovsk, pp. 30–38.

8. Voskresenskii, S.S. (1968), *Geomorfologiya SSSR* [Geomorphology of the USSR], Izd. Vyssh. Shkola, Moscow, Russia.
9. Gerasimova, A.S. (1959), Characteristics of modern geological processes developed in the valleys of the lower reaches of the Ob and Irtysh rivers, *Vest. Mosk. un-ta. Ser. biologiya, pochvovedenie, geologiya, geografiya*, pp. 103–111.
10. Golubcov, G.B., Chalov, R.S. (2019), Islands of the upper river Ob: morphometric characteristic, evolution and dynamics, *Geomorfologiya*, no. 1, pp. 81–92.
11. Degtyarev, V.V. (1987), *Uluchshenie sudohodnykh uslovii sibirskikh rek* [Improving the navigable conditions of Siberian rivers], Izd. Transport, Moscow, Russia.
12. Zavadskii, A.S., Il'yasov, A.K., Rulyova, S.N., Surkov, V.V., Turykin, L.A., Chalov, R.S. (2013), The evolution of the Kolpashevskaya meander of the Ob' and ongoing hazardous manifestations of channel processes, *Geografiya i prirodnye resursy*, no. 1, pp. 56–64.
13. Zavadskii, A.S., Chalov, S.R., Chernov, A.V., Golovlev, P.P., Moreido, V.M., Belyakov, P.A. (2019), Morphodynamics of channels and sediment balance of rivers in the Selenga basin (Mongolia-Russia), *Eroziya pochv i ruslovye protsessy*, vol. 12, pp. 149–170.
14. Zemtsov, A.A. (1976), *Geomorfologiya Zapadno-Sibirskoi ravniny (severnaya i tsentral'naya chasti)* [Geomorphology of the West Siberian Plain (northern and central parts)], Izd. TGU, Tomsk, Russia.
15. Zemcov, A.A., Burakov, D.A. (1977), Riverbed movements the Ob river and their forecast, *Priroda i ekonomika severa Tomskoi oblasti*, pp. 8–25.
16. Zemcov, V.A., Vershinin, D.A., Inishev, N.G. (2015), Research in the field of flow dynamics, sediment runoff and channel deformations on Siberian rivers by computer modeling, *Tridcatoe plenar. yubileinoe mezhev. soveshch. po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh processov: Dokl. i kratkie soobshch.*, Naberezhnye Chelny, pp. 59–72.
17. Kamyshev, A.A., Ruliova, S.N., Chalov, R.S. (2017), Water flow spreading in the braided reach of the Ob river, *Geographical bulletin*, no. 3(42), pp. 48–53.
18. Kondrat'ev, N.E., Popov, I.V., Snishchenko, B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoy teorii ruslovogo processa* [Fundamentals of the hydromorphological theory of the channel process], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.
19. Korkin, S.E., Isypov, V.A., (2017), Long-term monitoring of channel deformations of the Ob river (case study Ust-Vakhsky), *Evolution of erosion-channel systems, its economic and environmental consequences, forecast estimates and accounting*, Ufa, pp. 156–158.
20. Kurakova, A.A., Chalov, R.S. (2020), Channel morphology and bank erosion in the lower reaches of the Ob river (within the KHAMAO–Yugra Autonomous District), *Vest. Mosk. Univ. , Ser. 5: Geogr.*, no. 6, pp. 41–50.
21. Kurakova, A.A., Chalov, R.S. (2019), Shores erosion within latitudinal section of the middle Ob and its correlation with morphology of the channel, *Geogr. Vestn.*, vol. 50, no. 3, pp. 34–47.
22. L'gotin, V.A. (1984), New data on the deformations of the river bed. Obi, *Voprosy geografii Sibiri*, pp. 115–120.
23. L'gotina, L.P. (1993), From the history of studying the nature of the territory of the Tomsk region (pre-revolutionary period), *Voprosy geografii Sibiri*, pp. 78–83.
24. Makkaveev, N.I. (1955), *Ruslo reki i eroziya v ee bassejne* [The river and erosion in its basin], Izd. AN SSSR, Moscow, Russia.
25. Petrov I.B. (1979), *Ob'-Irtyshskaya poima (tipizatsiya i kachestvennaya otsenka zemel')* [Ob-Irtysh floodplain (typification and qualitative assessment of lands)], Nauka (Publ.), Novosibirsk, Russia.
26. Popov, I.V. (1965), *Deformatsiya rechnykh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Deformation of river channels and hydraulic engineering], Gidrometeoizda, Leningrad, Russia.
27. *Rekomendacii po ocenke i prognozu razmyva beregov ravninnykh rek i vodohranilishch dlya stroitel'stva. PNIIS Gosstroya SSSR* [Recommendations for the assessment and forecast of erosion of the banks of lowland rivers and reservoirs for construction. PIIS Gosstroy of the USSR.] (1987), Stroiizdat, Moscow, Russia.

28. *Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii* [Channel regime of the rivers of Northern Eurasia] (1994), Izd. MGU, Moscow, Russia.
29. *Ruslovye processy i vodnye puti na rekah Obskogo bassejna* [Channel processes and waterways on the rivers of the Ob basin] (2001), Izd. RIPEL plyus, Novosibirsk, Russia.
30. Trepettsov, E.V. (1973), Deformation of the banks of the Ob river in the Tyumen region, *Eroziya pochv i ruslovye processy*, vol. 3, pp. 276–284.
31. Chalov, R.S., Kamyshev, A.A., Zavadsky, A.S., Kurakova, A.A. (2021), Morphodynamics and hydrologic-morphological characteristics of the middle Ob riverbed at the latitudinal stretch (within the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Ugra), *Geografiya i prirodnye resursy*, no. 2, pp. 92–102.
32. Chalov, R.S., Lyu, Shuguan, Alekseevskii, N.I. (2000), *Stok nanosov i ruslovye processy na bol'shih rekah Rossii i Kitaya* [Sediment Runoff and Channel Processes on Large Rivers of Russia and China], Izd. MGU, Moscow, Russia.
33. Chalov, R.S., Zavadskii, A.S., Panin, A.V. (2004), *Rechnye izluchiny* [River meanders], Izd. MGU, Moscow, Russia.
34. Chalov, R.S., Kamyshev, A.A., Kurakova, A.A., Zavadskii, A.S. (2021), The distribution of water and suspended sediment flow during spring flood in the forked channel of the Lower Ob (within Khanty-Mansi Autonomous Area), *Vodnye resursy*, vol. 48, pp. 18–28.
35. Chalov, R.S., Zavadskii, A.S., Kamyshev, A.A., Kurakova, A.A., Mihailova, N.M., Ruleva, S.N. (2021), «Hydrology-morphodynamic characteristics and reforming the branched channel in the lower reaches of the Ob river (within the Yamalo-Nenets Autonomous okrug)», *Izv. RAN. Ser. geograf.*, vol. 85, no. 4, pp. 539–553.
36. Constantine, C. R., Dunne, T., Hanson, G. J. (2009), «Examining the physical meaning of the bank erosion coefficient used in meander migration modeling», *Geomorphology*, no. 106, pp. 242–252.
37. Ikeda, S., Parker, G., Sawai, K. (1981), «Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development», *J. Fluid Mech*, no.112, pp. 363–377.
38. Rutherford, I. (2000), «Some human impacts on Australian stream channel morphology», *River Management: The Australasian Experience*, pp. 2–52.

Статья поступила в редакцию: 22.02.2022; одобрена после рецензирования: 01.02.2022; принята к опубликованию: 09.03.2022.

The article was submitted: 22 February 2022; approved after review: 01 February 2022; accepted for publication: 9 March 2022.

Информация об авторе

Анна Александровна Куракова

аспирант кафедры гидрологии суши;
Географический факультет, МГУ имени М.В.
Ломоносова;

626020, Тюменская область, Нижнетавдинский
район, с. Нижняя Тавда, ул. Калинина, д. 20,
кв. 22

Information about the author

Anna A. Kurakova

Postgraduate Student, Department of Land
Hydrology, Lomonosov Moscow State University;

apt. 22, 20, Kalinina st., Nizhnyaya Tavda,
Nizhnetavdinskiy rayon, Tyumenskaya oblast,
626020, Russia

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