

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

УДК 556.537-911.2

А.А. Куракова¹, Р.С. Чалов²

МОРФОЛОГИЯ РУСЛА И РАЗМЫВЫ БЕРЕГОВ НИЖНЕЙ ОБИ (В ПРЕДЕЛАХ ХМАО-ЮГРЫ)

Размывы берегов рек – одна из наиболее опасных форм проявления русловых процессов. Создавая угрозу разрушения объектов жилищной и хозяйственной инфраструктуры на берегах, они оказывают существенное влияние на русловой режим рек, сопровождаются изменениями форм русла, их параметров, структуры и гидравлики потока. Однако размывы берегов и их связь с морфодинамикой русел остаются слабо изученными. В статье дается общая характеристика размывов берегов нижней Оби при относительной однородности их литологического песчано-суглинистого строения на всем протяжении реки с разветвленным руслом в условиях рассредоточения стока воды по многочисленным рукавам и пойменным протокам. Используя данные сопоставления разновременных космических снимков с помощью ГИС-технологий, были получены величины скоростей и протяженности фронта размыва берегов, определены основные параметры рукавов одиночных разветвлений, излучин и русловых (островных) разветвлений рукавов раздвоенного русла – основных типов русла нижней Оби. В рукавах одиночных разветвлений, образующих пологие излучины возле островов, скорости размыва берегов меньше, чем на более крутых излучинах рукавов других типов разветвлений, и определяются местными условиями. Большим радиусам кривизны и шагам излучин или одиночных разветвлений соответствует удлинение фронта и снижение темпов размыва берегов. Установлено, что увеличение расхода воды и рассредоточение стока воды по рукавам и пойменным протокам (ответвлениям) в половодье приводит к активизации размывов берегов на излучинах рукавов раздвоенного русла и в рукавах одиночных разветвлений. При прочих равных условиях в рукавах большей водности интенсивность размыва берегов выше.

Ключевые слова: русловые процессы, излучины, разветвления, раздвоенное русло, фронт размыва

Введение. Река Обь – одна из крупнейших рек России, имеющая важное транспортное и водохозяйственное значение. Свободные условия формирования русла в однородных легкоразмываемых песчано-суглинистых отложениях на нижней Оби способствуют интенсивным размывам берегов и активному развитию русловых деформаций. Это создает риск разрушения объектов, находящихся на приречных территориях.

Размывы берегов – одно из наиболее опасных проявлений русловых процессов – обусловлены гидрологическим и русловым режимами рек. Большое значение имеют морфодинамические типы русла, его извилистость или разветвленность на рукава, рассредоточение стока по рукавам и пойменным протокам, определяющее мощность и структуру потока, воздействующего на берега и вызывающего их размыв, развитие прирусловых отмелей (побочной и осередков), излучин русла и изгибов рукавов возле островов и т. д. [Чалов, 2019; Knighton, 1998; Schumm, 1977; Hemmelder, 2018]. Однако именно формам русла и их параметрам обычно не уделяется должного внимания при оценке размывов берегов, хотя именно они определяют структуру

потока, воздействующего на берега. Так, Г.Я. Эберхардс [1986], дав детальную характеристику перестроений берегов малых рек Прибалтики, типизировал их по различиям в геологическом строении размываемых берегов и показал специфику отступания в разные фазы водного режима. Е.В. Камалова [1988] связала интенсивность разрушения берегов при их размыве и спровоцированных ими оползаний и обрушений блоков пород на реках центра ЕТР с различной водоносностью (выделены шесть категорий рек по среднегодовым расходам от <50 до >1000 м³/с), но также без учета параметров излучин. Все исследованные реки свободно меандрировали, но параметры излучин при этом не учитывались. На больших реках, к которым относится Обь, размывам берегов уделяется еще меньше внимания. На средней [Коркин, Исыпов, 2017; Петров, 1979; Чалов и др., 2012] и нижней Оби [Герасимова, 1959; Петров, 1979; Трепетцов, 1973] исследования касались лишь отдельных участков русла (в т. ч. на основе стационарных наблюдений), где размывы берегов представляют реальную угрозу. Но их результаты сводились обычно к общей характеристике процесса без увязки с

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, аспирант; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор; научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, гл. науч. с., докт. геогр. н.; e-mail: rschalov@mail.ru

морфологией русла и динамикой потока. То же относится и к оценкам размывов берегов на других больших реках – Волге [Попов, 1963], Амуре [Махинов и др., 2001].

По существу, впервые исследование связей характеристик размывов берегов от параметров форм русла (излучин, разветвлений) было выполнено авторами [Куракова, Чалов, 2019] для широтного участка средней Оби (между устьями рек Ваха и Иртыша). Были получены зависимости средних и максимальных скоростей и протяженности фронта размыва берегов от морфологии русла. Было установлено, что главным фактором в размыве берегов на средней Оби является степень развитости излучин русла и рукавов русловых разветвлений. При этом литологический фактор здесь не сказывается, так как на всем протяжении реки пойма и низкие террасы, как и на нижней Оби, сложены легко размываемыми песчано-суглинистыми аллювиальными отложениями.

Задача настоящей статьи – впервые для нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) дать общий анализ распространения размываемых берегов поймы и низких террас, установит их связь с морфологическими параметрами форм русла, морфодинамическими типами русла, водностью и рассредоточением стока по рукавам и пойменным протокам (ответвлениям).

Объект, материалы и методы исследования. Главной особенностью нижней Оби является раздвоенное русло [Чалов, 2001, 2008]. Впервые оно

появляется на средней Оби выше г. Сургута (Юганская Обь, Большая Салымская протока и протока Неулева). На нижней Оби (от устья р. Иртыша до с. Перегребного) русло сначала представляет собой практически единый морфологически однородный участок, расположенный вдоль коренного берега – Белогорского материка – и представляющий одиночные разветвления, чередующиеся с прямолинейным неразветвленным руслом. Ниже с. Перегребного река меняет направление течения с северо-западного на северное и разделяется на два практически равноценных рукава – Малую и Горную Обь. Они образуют сложную систему раздвоенного русла, рукава которого сами имеют раздвоенное русло и связаны между собой и р. Северной Сосьвой, левым притоком Оби, протекающим в тыловой части поймы (рис. 1). В результате водность основных рукавов снижается до 12–15% от общего расхода воды в реке в половодье. Это сказывается на русловых деформациях и на условиях размыва берегов. Нижняя Обь при любом типе русла отличается развитой пойменной многорукавностью, расчленяющей широкую пойму и увеличивающей рассредоточение стока воды. Наиболее крупные протоки, соединяющие с Северной Сосьвой, – Лапоровская, Пырсим, а рукава – протока Вайсова и поперечная протока Большой Нюрик, забирающая 41% от суммарного стока Малой Оби, благодаря чему ниже по течению более полноводным рукавом раздвоенного русла нижней Оби становится правый – Большая Обь.

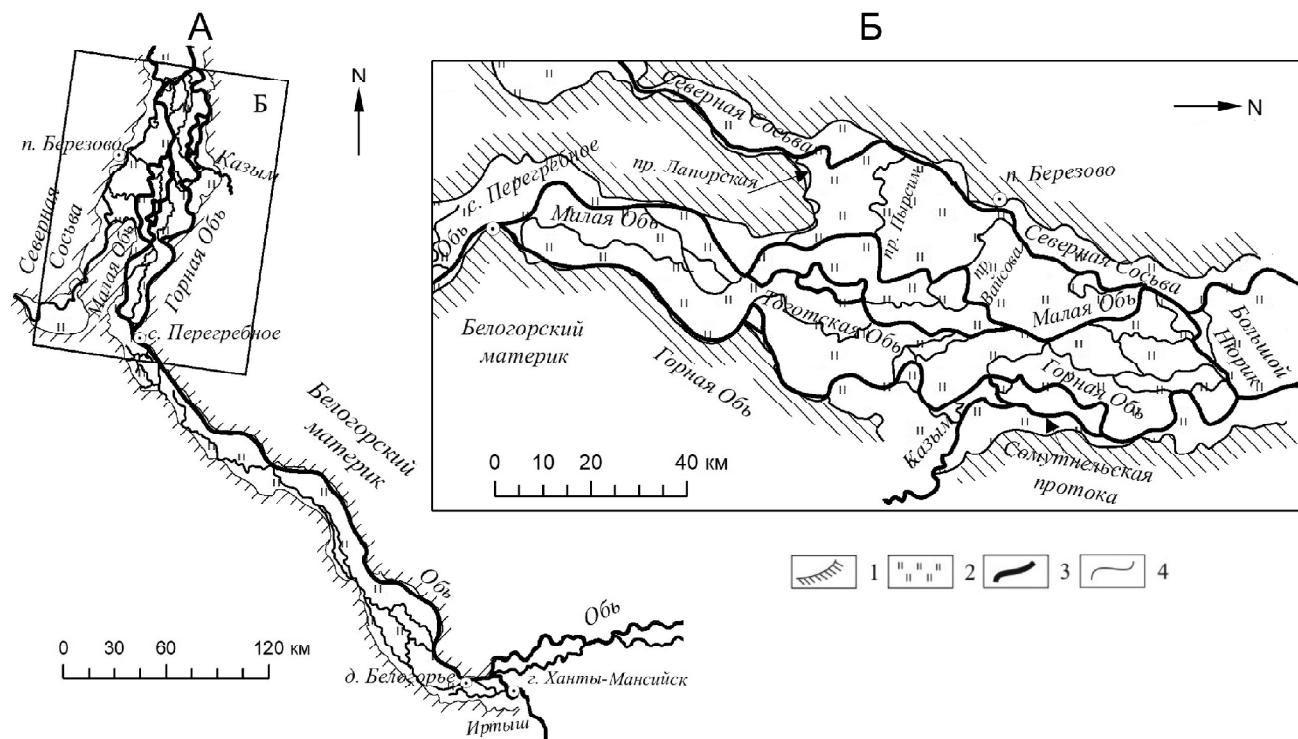


Рис. 1. Нижняя Обь в пределах ХМАО-Югры. А – от устья р. Иртыша до протоки Большой Нюрик; Б – раздвоенное русло: 1 – коренные берега; 2 – пойма; 3 – русло Оби и рукавов раздвоенного русла р. Северной Сосьвы; 4 – наиболее крупные пойменные протоки

Fig. 1. The Lower Ob River (within the KhMAO–Yugra autonomous district). А – from the mouth of the Irtysh river to the Bolshoi Nyurik channel; Б – difurcated channel: 1 – valley sides; 2 – floodplain; 3 – the channel of the Ob River and the branches of the Severnaya Sosva River bifurcation; 4 – the largest floodplain channels

Участок Оби ниже р. Иртыша до раздвоения русла и Горная Обь находятся под влиянием правого коренного берега. Левобережная пойма луговая или закустаренная, с болотами, старичными озерами и пойменными протоками, определяющими течение потока [Камышев и др., 2017]. При впадении в Горную Обь правого притока (р. Казым) появляется правобережная пойма. Ширина поймы колеблется от 20–25 до 40–45 м; ниже Лапоровской протоки, соединяющей Обь с Северной Сосьвой, она расширяется до 60 км. Сток воды с затопленной поймы в русло (по данным измерений в половодье 2019 г.) колебался от 500 до 1700 м³/с.

Среднегогодовой расход воды Оби у д. Белогорье (ниже слияния с р. Иртышом) составляет 10 200 м³/с, у г. Салехарда – 12 800 м³/с; среднемаксимальный – 28 200 и 36 700 м³/с, соответственно. Во время русловых исследований на нижней Оби в июне 2019 г. выше с. Перегребного расход воды в русле в половодье достигал 24 020 м³/с (не считая отвлечения части стока в пределы затопленной поймы и в пойменные протоки). Это соответствует величине руслоформирующего расхода воды по г. п. Белогорье – 25 000 м³/с [Чалов, 1979].

Исследование размывов берегов на нижней Оби (от слияния с р. Иртышом до границы ХМАО–Югры и ЯНАО) было выполнено на основе сопоставления космических снимков серии «Sentinel-2», «Landsat 5 TM», «CORONA KH-4A» за два временных интервала 1969–1988 гг. и 2018 гг. Темпы многолетних смещений берегов русла оценивались традиционным методом сравнения положения береговых бровок за 30–50-летний период.

Показателями размывов берегов были приняты: средние скорости их отступления ($C_{\text{ср}}$, м/год), протяженность фронта размыва ($L_{\text{фр}}$, км) и отношение протяженности фронта размыва берега к длине береговой линии – относительная протяженность фронта размыва берега ($x_{\text{фр}}$) – в русловых разветвлениях единого русла Оби (устье р. Иртыша – с. Перегребное), и в рукавах раздвоенного русла – Малой и Горной Оби. Излучины рукавов раздвоенного русла и рукавов русловых разветвлений характеризовались степенью развитости (l/L), радиусом кривизны (r , км), шагом излучин ($L_{\text{изл}}$, км) и шагом разветвлений ($L_{\text{разв}}$, км). Последний определялся только для одиночных разветвлений; изгибы рукавов, огибающих острова, образуют излучины, имеющие аналогичное излучинам русла расположение зон размыва и аккумуляции наносов. Рукава пойменно-русловых разветвлений, встречающиеся дважды на Малой Оби, состоят из двух–пяти излучин или образуют вторичные разветвления [Чалов, 2017].

Результаты обработки спутниковых снимков были откорректированы и дополнены данными, полученными в ходе экспедиционных исследований на нижней Оби в июне 2019 г.³

Результаты и их обсуждение. По сравнению со средней Обью в нижнем течении разнообразие мор-

фодинамических типов русла (по [Чалов, 2008]) сравнительно меньше: единое русло (от устья р. Иртыша до с. Перегребного) – абсолютно преобладают одиночные разветвления, разделенные прямолинейными вставками, и короткий участок параллельно-рукавного разветвления. Рукава раздвоенного русла образуют излучины или серии излучин, часто осложненные островами у выпуклых берегов и на крыльях, прорванные излучины и, реже, одиночные разветвления. Наиболее распространены на нижней Оби одиночные разветвления с прямолинейными вставками (221 км, 28,4% длины) и свободные излучины в рукавах раздвоенного русла (общее количество – 31, 214 км, 27,5% длины русла); три прорванные излучины имеют суммарную протяженность 32,5 км (4,2%). На Малой Оби есть два участка пойменно-русловых разветвлений, образовавшихся вследствие размыва пойменной перемычки между основным рукавом раздвоенного русла и пойменными протоками, водность которых стала соизмеримой с Малой Обью, которые вместе с ней составляют рукава пойменно-руслового разветвления. У нескольких излучин в привершинной части радиус кривизны r равен или даже меньше ширины русла b_p , т. е. $r < b_p$. Такие излучины приурочены к узлам разделения Малой и Тоготской Оби или к истокам крупных пойменных проток (Нарыкарской и Лапоровской).

На излучинах рукавов раздвоенного русла и рукавов русловых разветвлений чередуются зоны ускорения и замедления течения, соответствующие на пологих и развитых излучинах расположению фронта размыва в верхнем крыле выпуклого берега и в нижнем крыле – вогнутого; аккумуляция наносов и формирование отмелей происходит, наоборот, у вогнутого – в верхнем крыле, а у выпуклого берега – в нижнем. У крутых излучин фронт размыва берега распространяется на вогнутые берега по всей привершинной части излучин. Расположение зон размыва берегов и аккумуляции наносов приводит к продольному или поперечному смещению излучин или узлов разветвления [Чалов и др., 2004; Куракова, Чалов, 2019].

В одиночных разветвлениях образуются изгибы рукавов с соответствующим излучинам полем скоростей течения и положением зон размыва и аккумуляции наносов. Распределение зон ускорения и замедления течения и циркуляционных течений обуславливают размывы оголовка острова и наращивание его в устье. Одновременно происходит размыв противоположных острову берегов в нижней части разветвления и аккумуляция наносов против оголовков островов [Чалов, 2017]. Исключения составляют одиночные разветвления, в которых у оголовков образующих их островов аккумулируются наносы, формируются отмели, а сами острова смещаются регрессивно.

Излучины рукавов в одиночных разветвлениях единого русла Оби, излучины рукавов раздвоенного, старого и нового русел в прорванных излучинах

³ В полевых исследованиях участвовали канд. геогр. н. А.С. Завадский, канд. геогр. н. С.Н. Рулева, аспирант А.А. Камышев.

и излуцинах рукавов одиночных разветвлений Малой, Горной и Тоготской Оби были разделены по степени развитости и типу русла, к которым они относятся (таблица).

В едином русле Оби все излуцины рукавов одиночных разветвлений являются пологими ($l/L=1,1\div1,4$).

На Малой Оби пологие излуцины ($l/L=1,1\div1,4$) преобладают в меандрирующем русле (73%), а также свойственны рукавам одиночных и пойменно-русловых разветвлений (9 и 18%, соответственно); развитые ($l/L=1,4\div1,7$) и крутые ($l/L=1,7\div2,0$) характерны только для меандрирующего русла.

На Горной Оби пологие излуцины ($l/L=1,1\div1,4$) меандрирующего русла составляют 66%, нового русла в прорванных излуцинах – 17%, рукавов одиночных разветвлений – 17%; развитые излуцины ($l/L=1,4\div1,7$) встречаются в меандрирующем русле (63%), новом (12%) и в старых (25%) руслах прорванных излуцин; крутые ($l/L=1,7\div2,0$) излуцины характерны только для меандрирующего русла, петлеобразные излуцины ($l/L>2,0$) – для старого русла прорванных излуцин.

В Тоготской Оби пологие излуцины ($l/L=1,1\div1,4$) встречаются как в меандрирующем русле (80%), так и в новом русле прорванных излуцин (20%); развитые излуцины ($l/L=1,4\div1,7$) характерны только для меандрирующего русла; крутые излуцины ($l/L>2,0$) представлены в основном рукаве раздвоенного русла и старого русла прорванной излуцины (50%).

Степень развитости излуцин вне зависимости от того, являются они самостоятельной формой русла (на нижней Оби – в рукавах раздвоенного русла или пойменно-русловых разветвлениях) или представляют собой излуцины рукавов, огибающих острова в одиночных разветвлениях, определяет скоростное поле потока, расположение и протяженность фронта размыва берегов и его интенсивность. Для оценки этого были использованы данные о средней скорости размыва берегов (C_{cp} , м/год) и степени развитости излуцин (l/L) (рис. 2А), подтвердившие выявленную ранее [Куракова, Чалов, 2019] закономерность как для средней, так и для нижней Оби: при увеличении степени развитости скорость размыва берегов возрастает. При этом точки на графике группируются в соответствии со степенью развитости излуцин: для развитых ($l/L=1,4\div1,7$), крутых ($l/L>1,7$) и пологих ($l/L=1,1\div1,4$) [Чалов и др., 2004]. Для последних, у которых дифференциация поля скорости потока и циркуляционные течения слабо выражены, она проявляется либо по верхней огибающей поля точек ($C_{cp}=11,0/l/L-6,19$), либо прослеживается по группам точек, объединяющихся местными причинами формирования излуцин и разветвлений.

Группа точек I (см. рис. 2А) соответствует излуцинам со степенью развитости больше $l/L>1,7$, которые свойственны преимущественно рукавам пойменно-русловых и сложных трехрукавных разветвлений средней Оби, а также излуцинам меанд-

Таблица

Встречаемость излуцин разной степени развитости в рукавах одиночных разветвлений, рукавах раздвоенного русла, пойменно-русловых разветвлений и прорванных излуцин единого русла Оби от устья р. Иртыша до с. Перегребного, Малой, Горной и Тоготской Оби

Обь, рукава раздвоенного русла	Тип русла [Чалов, 2017]	Степень развитости излуцин, % [Чалов и др., 2004]			
		пологие ($l/L=1,1\div1,4$)	развитые ($l/L=1,4\div1,7$)	крутые ($l/L>1,7$)	петлеобразные ($l/L>2,0$)
Обь от устья р. Иртыша до с. Перегребное (единое русло)	Излуцины рукавов одиночных разветвлений	100	–	–	–
Малая Обь	Излуцины русла	73	100	100	–
	Излуцины рукавов одиночных разветвлений	9	–	–	–
	Излуцины рукавов пойменно-русловых разветвлений	18	–	–	–
Итого		100	100	100	–
Горная Обь	Излуцины русла	66	63	–	–
	Излуцины старого русла в прорванных излуцинах	–	25	–	100
	Излуцины нового русла в прорванных излуцинах	17	12	–	–
	Излуцины одиночных разветвлений	17	–	–	–
Итого		100	100	–	100
Тоготская Обь	Излуцины русла	80	100	–	50
	Излуцины старого русла в прорванных излуцинах	–	–	–	50
	Излуцины нового русла в прорванных излуцинах	20	–	–	–
Итого		100	100	–	100

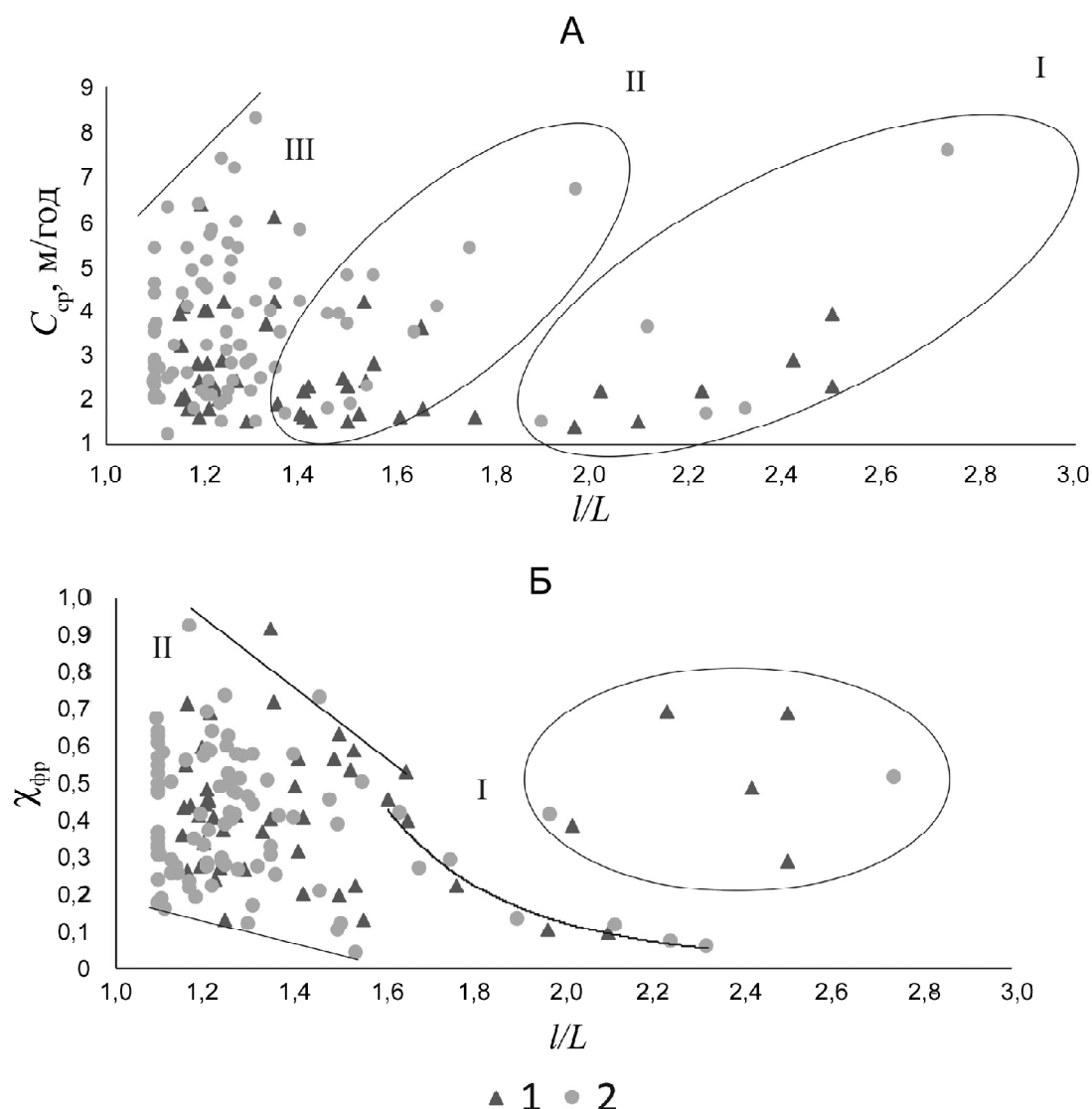


Рис. 2. Зависимость средней скорости ($C_{ср}$, м/год) размыва берегов (А) и отношения протяженности фронта размыва берегов к суммарной длине береговой линии ($\chi_{фр}$) (Б) от степени развитости (l/L) излучин рукавов русловых (островных) разветвлений, основных рукавов раздвоенного русла для нижней (1) и средней (2) Оби. Излучины: I – крутые и петлеобразные; II – развитые; III – пологие

Fig. 2. Dependence of the average rates ($C_{ср}$, m/year) of river banks erosion (A) and the ratio of the length of bank erosion front to the total length of the banks ($\chi_{фр}$) (B) on the degree of meander development (l/L) of the meandering channel, branching channel and bifurcated channel for the Lower (1) and Middle (2) Ob River. Meanders: I – sharp and looplike; II – developed; III – flat

рирующего русла Малой и Тоготской Оби и старых русел прорванных излучин Горной и Тоготской Оби. Их описывает уравнение $C_{ср} = 0,21l/L + 1,77$. В группу II входят развитые излучины ($l/L = 1,4 \div 1,7$) рукавов пойменно-русловых и сложных трехрукавных разветвлений средней Оби, свободные и прорванные излучины рукавов раздвоенного русла нижней Оби ($C_{ср} = 11,4/l/L + 15,4$). Самая многочисленная группа III объединяет пологие ($l/L < 1,4$) излучины рукавов раздвоенного русла и русловых, в основном одиночных, разветвлений средней и нижней Оби. Из-за слабого развития циркуляционных течений и дифференциации скоростного поля, точки, соответствующие этим излучинам, расположены хаотично. Определяющими факторами размыва берегов могут быть наличие побочной и осередков, ответвление

или слияние с пойменными протоками, взаимодействие руслового и пойменного потоков (слив воды с поймы или выход воды на пойму), сопряжение излучин со смежной формой русла и т. д., т. е. условия, определяющие местные воздействия на структуру потока.

Полученные зависимости скорости размыва (отступления) берегов на излучинах с разной степенью развитости (l/L) отражают изменения в форме их развития при переходе от пологих излучин к развитым и от развитых к крутым, от продольного смещения к продольно-поперечным и поперечным.

Связь степени развитости излучин (l/L) и относительной протяженности фронта размыва берега ($\chi_{фр}$), выявленная на средней Оби [Куракова, Чалов, 2019], подтвердилась на нижней Оби (рис. 2Б). При увели-

чении степени развитости излучин происходит удлинение как излучин, так и береговой линии; длина фронта размыва берегов при этом увеличивается медленнее, что определяет обратную зависимость между параметрами. Для разветвлений развитие излучин более многоводного (на нижней Оби – судоходного) рукава неизбежно приводит к перераспределению стока, что соответствует снижению интенсивности деформации и, соответственно, размыва берегов. На графике точки группируются в зависимости от степени развитости излучин: $L/L < 1,6$ (I) и $L/L > 1,6$ (II). Группа I описывается уравнением $x_{\text{фр}} = 6,37/L^{-5,7}$ и включает развитые и крутые излучины. Зависимость для группы II описывается верхней ($x_{\text{фр}} = -0,93/L + 2,07$) и нижней ($x_{\text{фр}} = -0,33/L + 0,55$) огибающими хаотично расположенных точек, соответствующих пологим излучинам.

На графике отдельно выделяется группа точек, соответствующих петлеобразным излучинам в сложном трехрукавном разветвлении на широтном участке средней Оби, а также несколькими свободным и прорванным излучинам Горной и Тоготской Оби. У петлеобразных излучин протяженность фронта размыва берегов связана с их формой, которая представляет собой комбинацию трех сегментных излучин, две из которых сформировались на ее крыльях и одна (средняя) наследует привершинную часть исходной. Это, по-видимому, приводит к удлинению фронта размыва в пределах излучины при увеличении L/L .

Важным морфологическим показателем является радиус кривизны излучины русла или излучин рукавов, огибающих острова (рис. 3А, Б). Поскольку

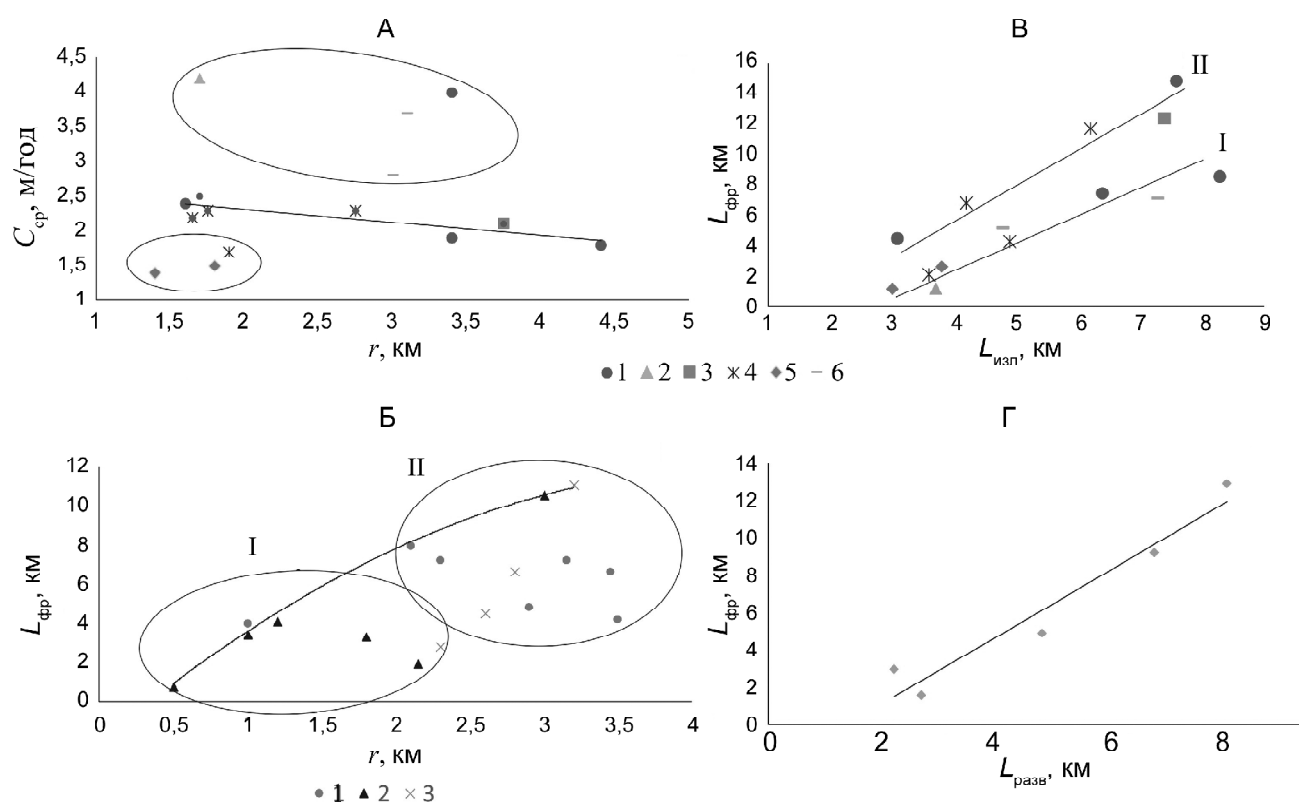


Рис. 3. Зависимость средней скорости ($C_{\text{ср}}$, м/год) размыва берегов на Малой Оби (А), протяженности фронта размыва берегов ($L_{\text{фр}}$, км) на Горной Оби (Б) от радиуса кривизны (r , км) излучин основных рукавов раздвоенного русла и рукавов русловых разветвлений; фронта размыва берегов ($L_{\text{фр}}$, км) на Малой Оби (В) и единого русла Оби (Г) от шага излучины или разветвления ($L_{\text{изл}}$ и $L_{\text{разв}}$, км). А, В – Малая Обь: 1 – до истока Тоготской Оби, 2 – от истока Тоготской Оби до истока Лапорской протоки, 3 – от истока Лапорской протоки до истока протоки Пырсим, 4 – от истока протоки Пырсим до истока протоки Вайсовой, 5 – от истока протоки Вайсовой до устья Тоготской Оби, 6 – от устья Тоготской Оби до истока протоки Большой Нюрик; В – Малая Обь: I – пологие излучин ($L/L=1,1\div1,4$), II – развитые и крутые излучины ($L/L>1,4$); Б – Горная Обь: I – раздвоенное русло, II – единое русло; 1 – до истока правого рукава раздвоенного русла, 2 – русло от истока правого рукава раздвоенного русла до устья Сомутнельской протоки, 3 – русло ниже устья Сомутнельской протоки

Fig. 3. Dependence of the average rates ($C_{\text{ср}}$, m/year) of river banks erosion for the Malaya Ob River (А), the length of bank erosion front ($L_{\text{фр}}$, km) for the Gornaya Ob River (Б) on the curvature (r , km) of the branching channel and bifurcated channel; dependence of the length of bank erosion front ($L_{\text{фр}}$, km) for the Malaya Ob River (В) and the joint Ob River channel (Г) on the wavelength of meander or branching channel ($L_{\text{изл}}$ и $L_{\text{разв}}$, km). А, В – the Malaya Ob River: 1 – upstream the Togotskaya Ob source, 2 – from the source of the Togotskaya Ob to the source of the Laporskaya channel, 3 – from the source of the Laporskaya channel to the source of the Pysim channel, 4 – from the source of the Pysim channel to the source of the Vajsovaya channel, 5 – from the source of the Vajsovaya channel to the Togotskaya Ob mouth, 6 – from the Togotskaya Ob mouth to the source of the Bol'shoj Nyurik channel. В – the Malaya Ob River: I – flat meanders ($L/L=1,1\div1,4$), II – sharp meanders ($L/L>1,4$). Б – the Gornaya Ob River: I – bifurcated channel, II – joint channel. 1 – upstream the source of the right branch of bifurcated channel, 2 – from the right branch of bifurcated channel to the Somutnenskaya channel mouth, 3 – downstream the Somutnenskaya channel mouth

ку данный параметр не является безразмерным, его анализ проводился по участкам с одинаковой водностью, т. е. $k=f(Q)$. Для Малой Оби (см. рис. 3А) при большом радиусе кривизны (излучины более пологие) средняя скорость размыва берегов снижается, так как происходит ослабление поперечной циркуляции, скорости потока выравниваются по ширине русла [Куракова, Чалов, 2019]; связь описывается линейным уравнением $C_{cp} = -0,18r + 2,68$. Отдельно расположились точки выше и ниже зависимости. Первая объединяет пологие излучины русла ($l/L < 1,4$), вторая – излучины русла в местах ответвления пойменных проток (Пырсим и Вайсова). Последняя, забирая 67% стока Малой Оби, является элементом раздвоенного русла этого рукава, соединяющего ее с р. Северной Сосьвой.

Снижение темпов размыва берегов при увеличении радиусов кривизны русла происходит при увеличении протяженности фронта размыва берегов, что объясняется обратной зависимостью радиуса r от степени развитости излучины – $r \sim (l/L)^{-n}$ [Чалов, 2008]. На Горной Оби (см. рис. 3Б) верхняя огибающая описывает поле точек уравнением $L_{фр} = 0,01r^2 + 0,1r + 0,42$. При этом все точки разделились на две группы: I – излучины раздвоенного русла Горной Оби (после отвлечения 42% в Сомутнельскую протоку); II – излучины, расположенные выше и ниже раздвоенного русла, где Горная Обь представляет единое русло.

Длина фронта размыва берегов возрастает с увеличением шага излучин на Малой Оби (см. рис. 3В) или шага в одиночных разветвлениях единого русла Оби. Зависимость описывается линейным уравнением $L_{фр} = \alpha L_{изл} + \beta$, в котором коэффициент α и свободный член β зависят от степени развитости излучин, снижаясь от пологих к развитым и крутым излучинам; при одном и том же шаге излучин (или разветвлений, рукава которых, огибая остров, образуют излучины) фронт размыва у пологих излучин короче, чем у развитых и крутых. I группа включает преимущественно пологие излучины ($l/L = 1,1 \times 1,4$), $\alpha = 0,63$, $\beta = 2,3$; II группа объединяет в основном развитые и крутые излучины ($l/L > 1,4$), у которых $\alpha = 0,46$, $\beta = 1,15$.

Аналогичная зависимость, описываемая линейным уравнением $L_{фр} = 1,4L_{разв} - 2,43$, справедлива для одиночных разветвлений единого русла Оби (см. рис. 3Г) выше его разделения на Малую и Горную Обь. Разветвления образованы в основном элементарными островами (на основе одного осередка при его зарастании) или объединением двух-трех небольших элементарных островов. Самые большие значения шага и протяженности фронта размыва характерны для разветвления у больших островов, представляющего собой «конгломерат» из 8–10 объединившихся элементарных островов [Голубцов, Чалов, 2017]. Графики зависимости скорости размыва берегов (C_{cp} , м/год) от водности рукавов одиночных разветвлений единого русла Оби выше с. Перегребного (рис. 4А) и Малой Оби на ее разных участках (рис. 4Б) показали, что чем боль-

ше расход воды в рукавах во время половодья, тем интенсивнее отступление берега: $C_{cp} = \alpha Q_{пол} + \beta$, где для единого русла Оби выше с. Перегребного $\alpha = 0,0004$, $\beta = -0,36$, для Малой Оби – $\alpha = 0,0002$, $\beta = 1,26$.

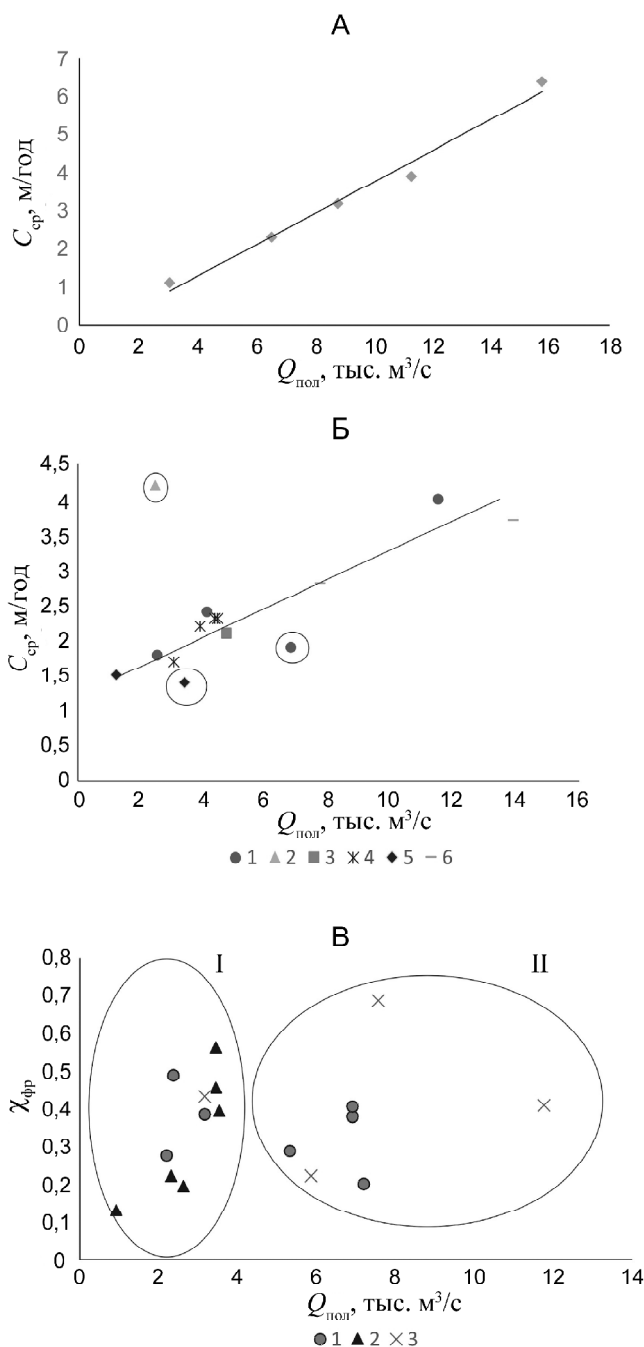


Рис. 4. Зависимость средней скорости размыва берегов (C_{cp} , м/год) в одиночных разветвлениях единого русла Оби (А) и на Малой Оби (Б) и относительной протяженности фронта размыва берегов к суммарной длине береговой линии ($x_{фр}$) на Горной Оби (В) от расхода воды в половодье ($Q_{пол}$, м³/с). Малая Обь (Б) – см. условные обозначения к рис. 3А, Горная Обь (В) – к рис. 3Б

Fig. 4. Dependence of the average rates (C_{cp} , m/year) of river banks erosion for the joint Ob River channel (А), and the Malaya Ob River (Б) and the ratio of the length of bank erosion front to the total length of the banks ($x_{фр}$) for the Gornaya Ob River (В) on high water discharge (Q_{h} , m³/s). The Malaya Ob River (Б) – see legend to Fig. 3А, the Gornaya Ob River (В) – see legend to Fig. 3Б

На графике для Малой Оби (см. рис. 4Б) вне общей зависимости расположились точки, соответствующие пойменно-русовым разветвлениям, забирающим значительную часть стока, и участку, где отходит протока Вайсова, в которую уходит большая часть общего расхода воды рукава.

Связь отношения протяженности фронта размыва берегов к суммарной длине береговой линии ($x_{\text{фр}}$) и расходу воды в половодье на Горной Оби (см. рис. 4В) позволяет разделить все точки на две группы, соответствующие полученным для зависимости $L_{\text{фр}} = f(r)$ (см. рис. 3Б).

Выводы:

– на нижней Оби в однородных геолого-геоморфологических условиях формирования русла размывы берегов являются повсеместным явлением, создавая опасность при освоении территории и водных ресурсов. Поступающие в русло реки наносы, аккумулируясь ниже по течению, создают, наряду с рассредоточением стока по рукавам, дополнительные затруднения для судоходства;

– интенсивность размыва берегов и протяженность фронта размыва на нижней Оби зависят от извилистости рукавов раздвоенного русла и рукавов русловых разветвлений. Для выделенных морфодинамических типов русла нижней Оби характерно наличие излучин как самостоятельных форм русла – рукавов раздвоенного русла, одиночных разветвлений, эквивалентных излучинам русла, либо серии излучин рукавов пойменно-русовых развет-

влений и рукавов прорванных излучин. Параметры излучин рукавов раздвоенного русла или русловых разветвлений определяют структуру скоростного поля потока и циркуляционные течения, влияют на темпы размыва и длину его фронта;

– интенсивность размыва берегов возрастает с увеличением степени развитости и снижения радиусов кривизны излучин рукавов раздвоенного русла или рукавов русловых разветвлений при одновременном сокращении длины фронта размыва. На пологих излучинах, образованных основными рукавами одиночных разветвлений единого русла Оби, наоборот, отмечается снижение скорости размыва берегов и увеличение протяженности размываемого берега. С ростом шага излучин русла Малой Оби или излучин рукавов ее русловых разветвлений и шага одиночных разветвлений единой Оби прослеживается удлинение фронта размыва берегов;

– раздвоение как Оби на самостоятельные рукава, так и рукавов раздвоенного русла – Малой и Горной Оби, приводит к кардинальному рассредоточению стока воды и сказывается на интенсивности размыва берегов. Увеличение водности рукавов раздвоенного русла, рукавов русловых и одиночных разветвлений, старых и новых русел прорванных излучин приводит к активизации размыва берегов; рассредоточение стока по рукавам и пойменным протокам является дополнительным фактором, влияющим на протяженность фронта размыва берегов.

Благодарности. Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии и суши и НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РНФ (проект № 18-17-00086 – размывы берегов рек в разветвленном русле) и РФФИ (проект № 18-05-00487 – экстремальные размывы берегов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Герасимова А.С. Характеристика современных геологических процессов, развитых в долинах нижнего течения рек Оби и Иртыша // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Биология, почвоведение, география, география. 1959. № 2. С. 103–111.

Голубцов Г.Б., Чалов Р.С. Острова верхней Оби: морфометрическая характеристика, эволюция и динамика // Геоморфология. 2019. № 1. С. 81–92.

Камалова Е.В. Географические закономерности процессов разрушения берегов на малых и средних реках бассейнов Волги и верхнего Дона: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1988. 22 с.

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.

Коркин С.Е., Исынов В.А. Многолетний мониторинг русловых деформаций реки Обь на примере ключевого участка «Усть-Вахский» // Эволюция эрозивно-русовых систем, ее хозяйственно-экономические и экологические последствия, прогнозные оценки и учет (Уфа, 3–6 октября 2017 г.). Уфа, Аэтер-на, 2017. С. 156–158.

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.

Махинов А.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Размывы берегов на среднем Амуре // Геоморфология. 2001. № 2. С. 72–81.

Петров И.Б. Обь-Иртышская пойма (типизация и качественная оценка земель). Новосибирск: Наука, 1979. 136 с.

Попов И.В. Русловые переформирования Волги на участке Волгоград – Астрахань // Труды ГТИ. 1963. Вып. 108. С. 4–67.

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.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: КРАСАНД, 2019. 640 с.

Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М, 2017. 569 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. Сложно-разветвленные русла равнинных рек: условия формирования, морфология и деформации // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 2. С. 166–171.

Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.

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

Чалов Р.С., Сурков В.В., Рулёва С.Н., Беликов В.В., Завадский А.С. и др. Русловые процессы на р. Оби в районе г. Колпашево, размыв города, компьютерное моделирование потока и обоснование оптимального варианта защитных мероприятий // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 18. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2012. С. 205–243.

Эберхардс Г.Я. Основные типы и сезонные переформирования берегов малых и средних свободно меандрирующих рек Средней Прибалтики // Геоморфология. 1986. № 3. С. 85–90.

Hemmelder S., Marra W., Markies H., De Jong S.M. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Bunch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, no. 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*. New York, Wiley, 1977. 338 p.

Поступила в редакцию 11.03.2020

После доработки 15.07.2020

Принята к публикации 06.08.2020

A.A. Kurakova¹, R.S. Chalov²

CHANNEL MORPHOLOGY AND BANK EROSION IN THE LOWER REACHES OF THE OB RIVER (WITHIN THE KHAMAO–YUGRA AUTONOMOUS DISTRICT)

The erosion of river banks is a most dangerous form of channel processes. Besides from creating a threat to settlements and engineering facilities on the banks it affects the channel regime of rivers, and provokes changes of the channel forms, their parameters, flow structure and hydraulics. However the bank erosion in relation to the channel morphodynamics is still poorly explored. The paper provides general description of bank erosion for the Lower Ob River. The banks are relatively homogeneous in terms of lithological composition (sandy-loamy) along the whole length of a branching channel under water distribution over numerous branches and floodplain channels. Using the remote sensing data for different time intervals we calculated the erosion rates and the length of erosion front. The main parameters of the principal channel types of the Lower Ob River, i. e. branching channels, meanders and bifurcated channels, were revealed. The erosion rates increase and the length of erosion front decreases in the meanders with low curvature, and the bank erosion depends on the local situation. The high curvature and wavelength of meander or branching channel provide for a long front of erosion and low rates of river banks erosion. It was found that higher water discharge and water distribution over branches and floodplain channels leads to increasing river banks erosion in the branching and bifurcated channels. Under otherwise equal conditions the intensity of river banks erosion is higher in the branches with greater water discharge.

Key words: channel processes, meanders, branching channels, river bifurcation, erosion front

Acknowledgements. The paper is prepared according to the scientific research plans of the Department of Land Hydrology and the Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes and financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00086 – erosion of river banks within channel bifurcations) and the Russian Foundation of Basic Research (project no. 18-05-00487 – bank erosion extremes).

REFERENCES

Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vyp. 3. Antropogennye vozdejstviya, opasnye proyavleniya i upravlenie ruslovymi processami [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 3. Human impacts, dangerous expressions and management of channel processes]. Moscow, KRASAND Publ., 2019, 640 p. (In Russian)

Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh processov* [Geographical studies of channel processes]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1979, 232 p. (In Russian)

Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vyp. 1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 1. Channel processes:

factors, mechanisms, forms and conditions of channel formation]. Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (In Russian)

Chalov R.S. *Ruslovye protsessy (ruslovedenie)* [Channel processes (riverbed science)]. Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 569 p. (In Russian)

Chalov R.S. Slozhno-razvetvlennye rusla ravninnykh rek: usloviya formirovaniya, morfologiya i deformatsii [Intricately braided river channels of lowland rivers: formation conditions, morphology, and deformation], *Vodnye resursy*, 2001, vol. 28, no. 2, p. 166–171. (In Russian)

Chalov R.S., Surkov V.V., Ruleva S.N., Belikov V.V., Zavadskii A.S., Bondarev V.P., Il'iasov A.K., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Turykin L.A. [Channel processes on the river Ob in

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, PhD student; *e-mail*: a.a.kurakova@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor; Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; *e-mail*: rachalov@mail.ru

the Kolpashevo district of the city, the erosion of the city's computer modeling of flow and substantiation of the optimal variant of protective measures], *Eroziya pochv i ruslovyje protsessy* [Soil erosion and channel processes]. Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., vol. 18, 2012, p. 205–243. (In Russian)

Chalov R.S., Zavadskii A.S., Panin A.V. *Rechnye izluchiny* [River meanders]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2004, 371 p. (In Russian)

Eberhards G.YA. Osnovnye tipy i sezonnye pereformirovaniya beregov mal'kh i srednih svobodno meandriruyushchih rek Srednej Pribaltiki [The main types and seasonal transformation of the banks of small and medium meandering rivers of the Middle Baltic], *Geomorfologiya*, 1986, no. 3, p. 85–90. (In Russian)

Gerashimova A.S. *Harakteristika sovremennykh geologicheskikh processov, razvitykh v dolinakh nizhnego techeniya rek Obi i Irtysha* [Modern geological processes in the valleys of the lower reaches of the Ob and Irtysh rivers], *Vest. Mosk. un-ta. Ser. Biologiya, pochvovedenie, geologiya, geografiya*, 1959, no. 2, p. 103–111. (In Russian)

Golubcov G.B., Chalov R.S. *Ostrova verhnjej Obi: morfometricheskaya harakteristika, evolyuciya i dinamika* [Islands of the upper river Ob: morphometric characteristic, evolution and dynamics], *Geomorfologiya*, 2019, no. 1, p. 81–92. (In Russian)

Hemmelder S., Marra W., Markies H., De Jong S.M. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Bultch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, no. 73, p. 428–437.

Kamalova E.V. *Geograficheskie zakonomernosti processov razrusheniya beregov na mal'kh i srednih rekah bassejnov Volgi i verhnego Dona* [Geographical patterns of coastal destruction processes on small and medium rivers of the Volga and the Upper Don river basins]. Extended Abstract of PhD Thesis in Geography, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 198, 22 p. (In Russian)

Kamyshchev A.A., Ruliova S.N., Chalov R.S. *Rassredotochenie stoka vody v razvetvleniyakh rusla srednej Obi* [Water flow spreading in the braided reach of the Ob River], *Geograficheskij vestnik*, 2017, no. 3(42), p. 48–53. (In Russian)

Knighton A.D. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. London, Arnold, 1998. 383 p.

Korkin S.E., Isypov V.A. [Long-term monitoring of channel deformations of the Ob river (case study Ust-Vakhsky)], *Evolutsiya erozionno-ruslovykh system, eyo khozyajstvenno-ekonomicheskie i ekologicheskie posledstviya, prognozyne otsenki i uchet* [Evolution of erosion-channel systems, its economic and environmental consequences, prognostic estimates and due regard]. Ufa, Aeterna Publ., 2017, p. 156–158. (In Russian)

Kurakova A.A., Chalov R.S. *Razmyvy beregov na shirotnom uchastke srednej Obi i ih svyaz' s morfologiej rusla* [Shores erosion within latitudinal section of middle Ob and its correlation with morphology of channel], *Geograficheskij vestnik*, 2019, no. 3(50), p. 34–47. (In Russian)

Mahinov A.N., Chalov R.S., Chernov A.V. *Razmyvy beregov na srednem Amure* [River bank erosion in the middle reaches of the Amur River], *Geomorfologiya*, 2001, no. 2, p. 72–81. (In Russian)

Petrov I.B. *Ob'-Irtyshskaya pojma (tipizaciya i kachestvennaya ocenka zemel')* [Ob-Irtysh floodplain: typification and land quality evaluation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 136 p. (In Russian)

Popov I.V. [Channel transformations of the Volga River along the Volgograd to Astrakhan section], *Trudy GGI* [Proceedings of the State Hydrological Institute], vol. 108, 1963, p. 4–67. (In Russian)

Schumm S.A. *The fluvial system*. New York, Wiley, 1977, 338 p.

Trepetsov E.V. [Deformation of the banks of the Ob river in the Tyumen region], *Eroziya pochv i ruslovyje processy* [Soil erosion and channel processes], Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., vol. 3, 1973, p. 276–284. (In Russian)

Received 11.03.2020

Revised 15.07.2020

Accepted 06.08.2020