

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.537;551.435.133

ОЦЕНКА ОПАСНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА РЕКАХ ОБЬ-ИРТЫШСКОГО БАССЕЙНА¹

© 2023 г. А. А. Куракова*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119899 Россия

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

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 15.04.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Размывы берегов — опасное проявление русловых процессов, которые широко распространены на реках Обь-Иртышского бассейна и несут как реальную, так и потенциальную угрозы. Наиболее распространенная форма переформирования русла на реках бассейна — развитие излучин русла, излучин рукавов раздвоенного русла и излучин рукавов пойменно-русловых разветвлений, а также рукавов русловых (островных) разветвлений за счет размыва берегов, что приводит к направленному изменению их морфологических параметров. Устойчивость русла — важная характеристика при оценке опасности русловых процессов. Крупнейшие реки бассейна (Обь и Иртыш) характеризуются относительно устойчивым руслом, соответствующим умеренной опасности. Средние и большие реки, опасность русловых процессов на которых оценивалась баллами, имеют относительно невысокую степень (преимущественно 1–2 балла), увеличиваясь вниз по течению и достигая 3 баллов в низовьях крупных рек (Томь и Чулым). В целом для рек Обь-Иртышского бассейна интенсивность размыва берегов, соответственно — и степень опасности горизонтальных русловых деформаций, снижаются в направлении к С и к Обь-Иртышскому междуречью. Полученные результаты можно использовать для безопасного использования водных путей и приречных пространств, а также эффективно управлять опасными проявлениями русловых процессов.

Ключевые слова: русловые процессы, русловые деформации, размывы берегов, опасность, устойчивость, излучины, разветвления.

DOI: 10.31857/S0321059623600254, EDN: NWMMQO

ВВЕДЕНИЕ

Русловые процессы представляют собой природные явления, угрожающие разрушением прибрежных территорий населенных пунктов, аварийными ситуациями для инженерных сооружений и коммуникаций, осложняют судоходство, а также ведут к потенциальной потере ценных сельскохозяйственных и лесных угодий и в целом затрудняют освоение рек и приречных территорий [2, 20].

Размывы берегов — одна из наиболее распространенных и ярких форм проявления опасных русловых процессов — как обусловлены естественными причинами, так и могут быть усилены в ходе освоения рек и прибрежных территорий. Проектирование объектов жилищной и хозяйственной инфраструктуры или нарушения при их

эксплуатации естественных процессов могут привести к созданию аварийных ситуаций, например в створе мостовых переходов, на трубопроводах и других линейных коммуникациях, пересекающих русла и поймы рек, к утрате ценных земель, угрозе разрушения береговых инженерных объектов и т. д. [9, 20].

Выделяют потенциальную и реальную опасность русловых процессов [20]. Первая опасность присутствует всегда, и ее надо учитывать при освоении территории, зная закономерности и направленность развития процесса; вторая представляет собой уже существующую угрозу. Причем объект может быть построен тогда, когда опасности не было, но в ходе русловых деформаций она появилась. На реках со слабоустойчивым руслом в свободных условиях всегда есть потенциальная опасность размыва берегов [9].

В различных подходах к оценке опасности русловых процессов размывы берегов учитываются как один из главных факторов, характеризующих их интенсивность [19, 20]. Степень и частота про-

¹ Исследование выполнено по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (проект 121051200166-4).

явления опасных русловых процессов зависят от устойчивости — интенсивности русловых переформирований, которая оценивается числом Лохтина L и коэффициентом стабильности Н.И. Макавеева K_c [14]:

$$L = \frac{d}{I}, \quad K_c = \frac{d}{I b_p} \times 1000,$$

где d — крупность донных наносов, мм; I — уклон, ‰ (в K_c — безразмерный); b_p — ширина русла реки, м.

В зависимости от градации степени устойчивости речных русел для них характерны определенные скорости размывов или намывов берегов (средние и максимальные) и смещения форм руслового рельефа (осередки и побочни), протяженность фронта размыва, периодичность горизонтальных русловых деформаций или развития рукавов. Выделяют русла от абсолютно неустойчивых (с высокой степенью интенсивности русловых деформаций) до абсолютно неустойчивых, когда какие-либо русловые переформирования отсутствуют [14].

Первые исследования общей опасности русловых процессов относятся к последнему десятилетию XX в., когда была разработана интегральная оценка опасных их проявлений и принципы их картографирования [3, 4, 17]. Оценка была направлена на выделение основных явлений и процессов природного и антропогенного происхождения, которые могут оказать влияние на состояние русел и поймы больших и малых рек: естественные деформации речных русел (размывы берегов и смещение русел, смещение и формирование прирусловых отмелей и перекатов), неблагоприятные проявления естественных и антропогенных изменений гидрологического режима рек, заиливание и деградация русел, механистические изменения русел рек и влияние гидротехнических сооружений. При таком подходе каждый фактор ранжировался по градациям по степени неблагоприятности и присваивался соответствующий балл. После балл пересчитывался с учетом весовых коэффициентов, что позволяло учитывать роль фактора в создании опасной обстановки. На основе этого формировался единый интегральный балл опасности [3, 21].

При обобщении всех наработок по оценке опасных русловых процессов и методам их картографирования были составлены классификация и карта опасных русловых процессов для всех рек России. Такой подход был применен для рек, протекающих по равнинным территориям [18]. Выделены четыре степени опасности отдельно для малых, больших и крупнейших рек. Каждой группе соответствуют свой балл опасности (от 0 — незначительно опасный до 4 — опасный) и соответствующий ему показатель устойчивости русла

(L и K_c). Количественная оценка опасности определялась через параметры природных и антропогенно обусловленных факторов, приводящих к плановым изменениям русла и отметок дна: средняя скорость размыва берегов и смещения форм руслового рельефа, протяженность зон размыва, характер и периодичность горизонтальных деформаций, вертикальные деформации и степень антропогенной измененности русла.

Позднее Р.С. Чалов в [20] переработал классификацию участков рек, опираясь на характер и интенсивность горизонтальных деформаций и устойчивость. Он выделил шесть степеней опасности проявления процессов при соответствующей устойчивости русла, которые ранжируются баллами от 0 (абсолютно устойчивые русла, опасность отсутствует) до 6 (абсолютно неустойчивое русло с очень высокой степенью опасности). Оценка баллов в ноль баллов условная, так как полностью безопасных рек не бывает. Так, берега скальных рек Восточной Сибири могут быть стабильны, но происходит, хотя и с малыми скоростями, смещение галечно-валунных гряд или занесение дноуглубительных прорезей, возникают прижимы течения к берегам, провоцируя их обвалы. Степень опасности горизонтальных деформаций зависит как от геолого-геоморфологических условий, так и от морфодинамического типа русла (прямолинейное, извилистое или разветвленное), так как для каждого характерен свой режим русловых деформаций в зависимости от стадии развития формы русла.

А.С. Завадский и др. [6] применили другой подход к интегральной оценке опасности для бассейна р. Селенги. Критериями оценки выступали: морфодинамический тип русла; характеристики размыва берегов (скорость и протяженность), полученные на основе стационарных наблюдений, дешифрирования и сопоставления разновременных космических снимков; смоделированные характеристики водоносности, которые в совокупности с полученными с цифровой модели местности и топографических карт уклонами дна речных долин дают следующую величину удельной мощности потока:

$$N = \frac{\rho g Q I}{B} \text{ (Вт/м}^2\text{)},$$

где ρ — плотность воды, g — ускорение свободного падения, Q — характерный (руслоформирующий) расход воды, I — уклон дна долины, B — ширина потока. Каждый критерий оценивался баллами от 1 до 5, кроме размыва берегов, для которого максимальными были 4 балла (максимальная опасность по скорости размыва берегов — в 5 баллов — в бассейне р. Селенги не наблюдается). Интегральная опасность русловых процессов оценивалась суммой баллов по четырехбалльной шкале по каждому критерию для каждого десятикило-

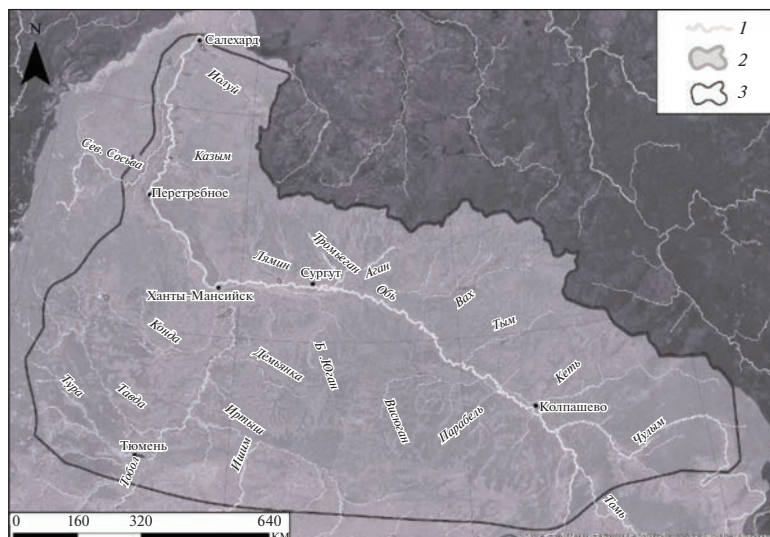


Рис. 1. Обзорная карта исследуемой территории Обь-Иртышского бассейна. 1 – реки, 2 – граница Обь-Иртышского бассейна, 3 – граница лесной зоны в пределах равнинной части Обь-Иртышского бассейна [9].

метрового участка реки. Это позволило создать карту опасности русловых процессов на реках бассейна р. Селенги [6].

За рубежом для оценки интенсивности размыва берегов и их прогноза используются индексы ВЕНІ (Bank Erosion Hazard Index – индекс опасности береговой эрозии), рассчитывающийся в отдельных створах реки, и NBS (Near Bank Stress – индекс воздействия касательного напряжения) для русловых форм. Оба индекса имеют классы опасности, наивысший соответствует экстремальным русловым деформациям [22, 23]. В основу расчетов положены данные о морфометрии русла, материале, которым сложены берега, наличии растительности, закрепляющей берег и ее характеристике, превышение размываемого берега над пойменной бровкой и над дном реки и т. д.

ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследовались среднее и нижнее течение Оби (от устья р. Томи до г. Салехарда), нижний Иртыш (от устья р. Тары до слияния с Обью) и наиболее крупные их притоки (рис. 1): Томь, Чулым, Кеть, Тым, Вах, Тромъеган, Аган, Лямин, Казым, Полуй, Паробель, Васюган, Большой Юган, Северная Сосьва, Демьянка, Тобол, Тура, Тавда и Конда. Рассматриваемые участки русел рек находятся в пределах лесной зоны в сходных и относительно однородных геолого-геоморфологических условиях, на равнине с небольшими уклонами, относительно однородным литологическим составом аллювиальных отложений (пески, супеси и легкие суглинки), слагающих пойму и надпойменные террасы [7], что обу-

словливает активные горизонтальные русловые деформации.

Размывы берегов были получены на основе сопоставления разновременных космических снимков серий “CORONA KH-4A, B”, “Landsat 1, 2 MSS”, “Landsat 4, 5 TM”, “Landsat 7”, “Sentinel-2” за два временных интервала: 1960–1980-е гг.; 2016–2021 гг., которые обрабатывались полуавтоматизированным методом [6] с помощью инструментов в программе ГИС ArcGIS Desktop. В результате были получены характеристики размываемых берегов: средние ($C_{ср}$, м/год) и среднемасимальные ($C_{ср\max}$, м/год) скорости размыва берегов и протяженность размываемого берега ($L_{фр}$, км). Разрешение космических снимков, временные интервалы и точность методики определяют значение определяемых скоростей размыва берегов – от 0.5 м/год для Оби и 1 м/год для остальных рек.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средняя и нижняя Обь

Средняя и нижняя Обь характеризуется развитием излучин русла и излучин рукавов разветвлений, направленным изменением их параметров в результате размывов одних берегов и “намывов” других. Примером этого служит русло Малой Оби – левого рукава раздвоенного русла нижней Оби, меандрирование которого преимущественно сопровождается продольным, продольно-поперечным и поперечным смещением излучин, что приводит в свою очередь к искривлению и изменению их параметров (увеличение степени развитости излучин l/L и уменьшение их радиусов кривизны r). Многие крутые излучины характеризуются нару-

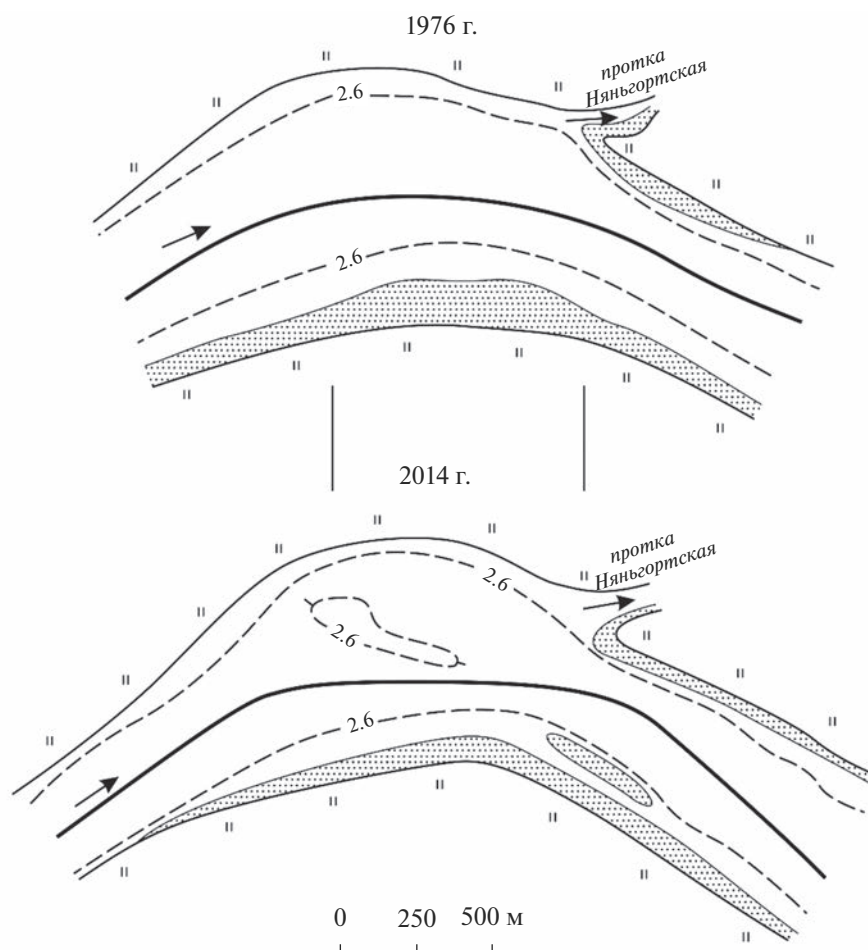


Рис. 2. Деформации на Войкарской излучине Малой Оби на 438–435 км при нарушении на ней правила Миловича (линией показано положение судового хода) [9].

шением условия безотрывного обтекания потоком берегов — правило Миловича ($r < 2.5 - 3b_p$). В этом случае динамическая ось потока смещается к выпуклому берегу, вызывая его размыв, тогда как у вогнутых берегов формируется водоворотная зона, где происходит аккумуляция наносов (рис. 2). Это может, с одной стороны, создать неблагоприятные условия для судоходства, с другой — затруднить работу водозабора, если таковые располагаются в зоне обмеления акватории [9].

В результате размыва берегов и смещения излучин реальная угроза на Малой Оби наблюдается для двух населенных пунктов в ХМАО–Югре — Устрема и Теги (рис. 3). На них фиксируется средняя скорость размыва берегов от 3.6 до 5.3 м/год, что приводит к утрате значительной части их территорий (в пределах них размывается соответственно 200 и 1000 м береговой линии).

В другом случае при достижении критических значений l/L (~ 1.6) образуются прорванные излу-

чины. Это связано с формированием во время половодья в пониженной тыловой части пойменной шпоры спрямляющей протоки, забирающей значительную часть общего стока воды и расширяющейся за счет активных размывов берегов в ней. Одновременно с этим старое русло постепенно мелеет, а русловые деформации затухают. В случае отсутствия благоприятных условий для сохранения обводненности старого русла оно со временем вовсе может отмереть, превратившись в пойменное озеро или залив — “курью”. В XX в. на средней Оби образовались две порванные излучины, характеризующиеся достаточно высокими темпами русловых деформаций (до 3.6 м/год) в спрямляющих рукавах. Это повлекло за собой перестройку русла и поступление большого количества наносов в поток. Последнее в свою очередь приводит к обмелению нижерасположенного переката, что неблагоприятно сказывается на условиях для судоходства, снижая гарантированные

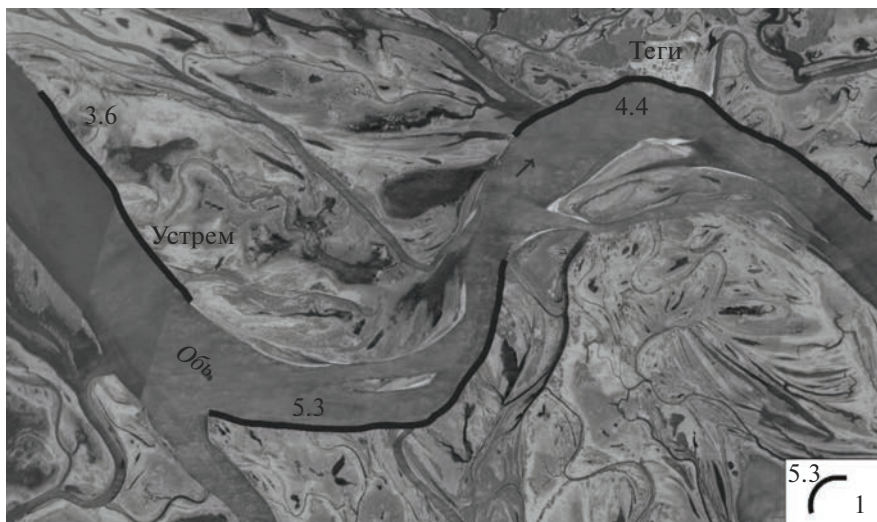


Рис. 3. Деформации на излучинах Малой Оби на 640–622 км: 1 – фронт и скорость размыва берегов [9].

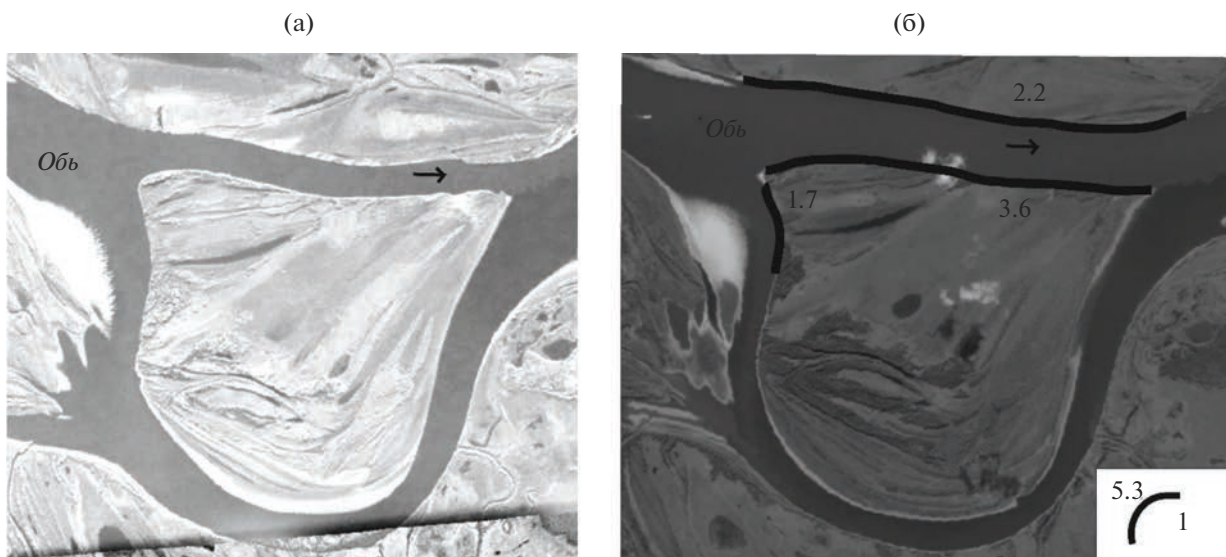


Рис. 4. Сахалинская прорванная излучина на 1318–1313 км: а – 1970 г., б – 2020 г. 1 – см. рис. 3 в [9].

глубины. В то же время спрямление излучины (рис. 4) обеспечивает сокращение длины судового хода и уменьшение времени, которое тратится на перевозку грузов и пассажиров [9].

В другом (правом) рукаве раздвоенного русла нижней Оби – Горной Оби отмечаются активные русловые деформации при отступании от реки коренного берега, появлении правобережной поймы и общем расширении дна долины (пойма + + русло). На Горной Оби встречаются прорванные излучины, старые русла которых получают большую часть стока за счет направляющего воздействия на поток крупных мысов коренного берега, а скорость размыва в них – до 2.6 м/год,

тогда как спрямляющие рукава, имеющие заход почти под прямым углом и относительно прямолинейное русло, характеризуются незначительными по интенсивности размывами берегов (рис. 5а). В прорванной Чуэльской излучине на 689–686.5 км спрямляющий рукав забирает ~40% суммарного стока, а средняя скорость размыва в нем составляют 1.9 м/год, тогда как в другом рукаве (старом русле – крутая сегментная излучина), куда идет значительная часть стока, скорость больше – до 4 м/год (рис. 5б). В данном случае опасность – потенциальная для прибрежных территорий и реальная для судоходства из-за поступления

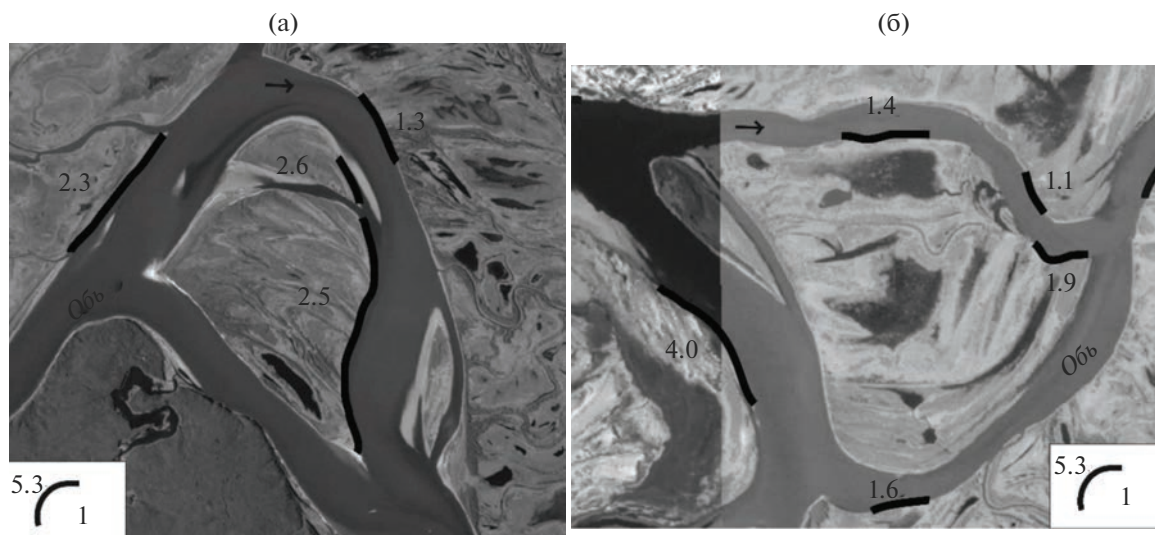


Рис. 5. Прорванные излучины Горной Оби: а – Пугорская на 775–762 км, б – А – Чуэльская на 689–685.5 км. 1 – см. рис. 3 в [9].

большого количества наносов и формирования перекатов ниже по течению [9].

Развитие излучин в результате размыва берегов – основная форма переформирования рукавов пойменно-руслowych разветвлений. В Кривошеевском пойменно-руслowym разветвлении (1049–1074 км) основной сток проходит по правому более кроткому рукаву с тремя пологими излучинами (l/L с 1980-х гг. по 2011 г. изменилась с 1.14–1.39 до 1.17–1.48), на которых средние скорости размыва берегов ≤ 2.3 м/год. Левый рукав, имеющий меньшие расходы воды, сильно искривлен и образует пять преимущественно крутых излучин (l/L изменилась с 1.54–1.98 до 1.57–2.04 с 1980-х гг. по 2011 г.), смещающихся со скоростью от 2.2 до 3.8 м/год на больших по протяженности размываемых берегах (рис. 6а). Но на данном участке размывы берегов представляют только потенциальную угрозу, они могут повлиять на условия судоходства, в то время как населенным пунктам на левом коренном берегу ничего не угрожает [9].

На широтном участке средней Оби встречаются сложные трехрукавные пойменно-руслowych разветвления. В них в основном получает развитие центральный рукав, тогда как остальные два продолжают свое развитие или имеют тенденцию к обмелению. Этому способствуют пойменные протоки между рукавами, обеспечивающие перераспределение расходов воды между ними, определяя в них интенсивность русловых деформаций [15]. В Сытоминско-Салымском разветвлении до 1960-х гг. в основном интенсивно развивались правый и левый рукава, каждый из которых образовывал по несколько излучин. В 1980 г. активи-

зировался центральный спрямляющий рукав (его ширина возросла более чем в 2 раза – с 200 до 500 м), тогда как заход в левый рукав сузился ввиду застарения крупного побочня и превращения его в молодую пойму. Это нашло отражение в русловых деформациях: средние скорости размыва берегов в бывшем левом судоходном рукаве ≤ 2.3 м/год, а их протяженность одна из минимальных (рис. 6б). При этом и правый рукав характеризуется довольно низкими темпами отступления берегов – от 1.2 до 4.8 м/год. В центральном рукаве в связи с его активным развитием наблюдаются наибольшие средние скорости размыва – до 6.5 м/год, а относительная протяженность фронта размыва составляет $\sim 50\%$ длины рукава. Если в целом для узла опасность потенциальная, то на участке реки у с. Сытомино она становится реальной в связи с размывом берега со скоростью 3.5 м/год (26% длины береговой линии в пределах населенного пункта).

Значительные русловые переформирования могут быть характерны и для относительно прямолинейного, неразветвленного русла средней Оби с последующей его трансформацией в другой морфодинамический тип – разветвление. Происходит аккумуляция наносов и образование осередков, приводящих к формированию элементарных островов, в том числе за счет отчленения прибрежных отмелей побочными протоками. Это приводит к изгибу потока, возникающего при обтекании отмелей, и затем – к подходу потока к берегам под большим углом, что вызывает размыв берегов и образование местного расширения русла. Это прослеживается на участке от 1713 до 1737 км, где сформировалась система сопряжен-

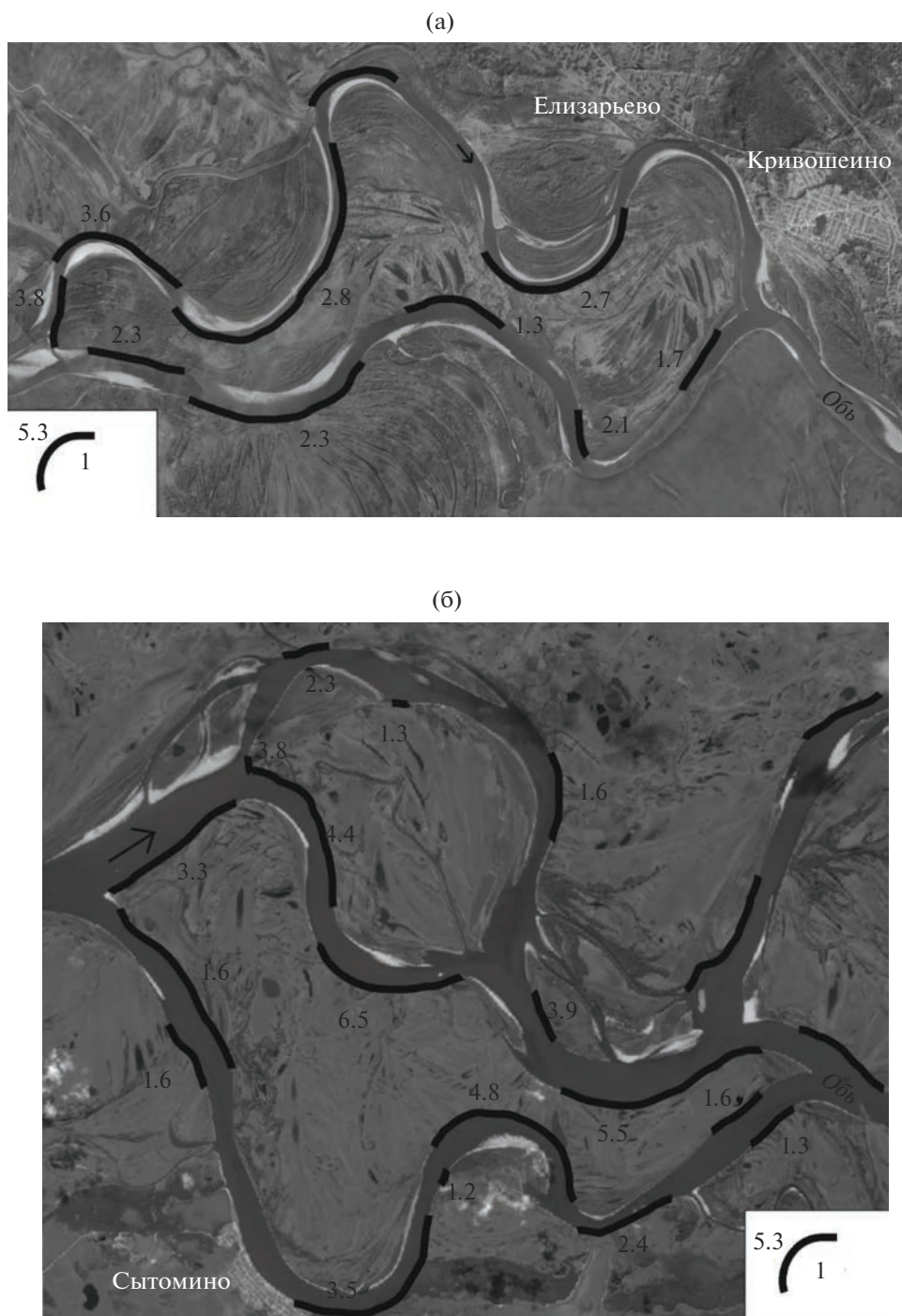


Рис. 6. Размывы берегов в пойменно-русловых разветвлениях: а – Кривошеевское пойменно-русловое разветвление на 1049–1074 км, б – Сытоминское-Салманское сложное трехрукавное пойменно-русловое разветвление на 1348–1322 км. 1 – см. рис. 3 в [9].

ных разветвлений (рис. 7). В данном случае для участка наблюдается потенциальная опасность из-за осложнения условий судоходства: необходимость корректировки судового хода, обмеление перекатов ниже зон размыва, на которых темпы размыва колеблются от 2.6 до 4 м/год [9].

Нижний Иртыш

Нижний Иртыш характеризуется активными русловыми переформированиями, которые, как и на средней и нижней Оби, проявляются в развитии и смещении излучин в продольном, про-



Рис. 7. Сопряженное разветвление от 1713 до 1737 км (рис. 3 в [9]).



Рис. 8. Оползень на нижнем Иртыше (ниже устья р. Ишим). Фото автора.

дольно-поперечном и поперечном направлениях, сопровождающимися изменениями их параметров. Важные факторы их морфологических изменений — ширина днища долины и влияние коренных берегов: первая обуславливает свободное их развитие, второе — ограничивает деформации. При подходе к коренному берегу формируются вынужденные и адаптированные излучины, в которых русловые деформации небольшие (≤ 1 м/год), а на склонах часто встречаются оползни (рис. 8). В то же время оползни могут перекрывать часть

русла, отклонять поток и приводить к размыву противоположного пойменного берега, способствуя формированию потенциальной опасности на участке.

На Иртыше переформирование прорванных излучин происходит по-разному. В одном случае русловые деформации сосредотачиваются только в активно развивающемся спрямляющем рукаве, где формируются новые излучины русла (средние скорости размыва берегов — 6 м/год), а старое русло отмирает (Староиртышская излучина на

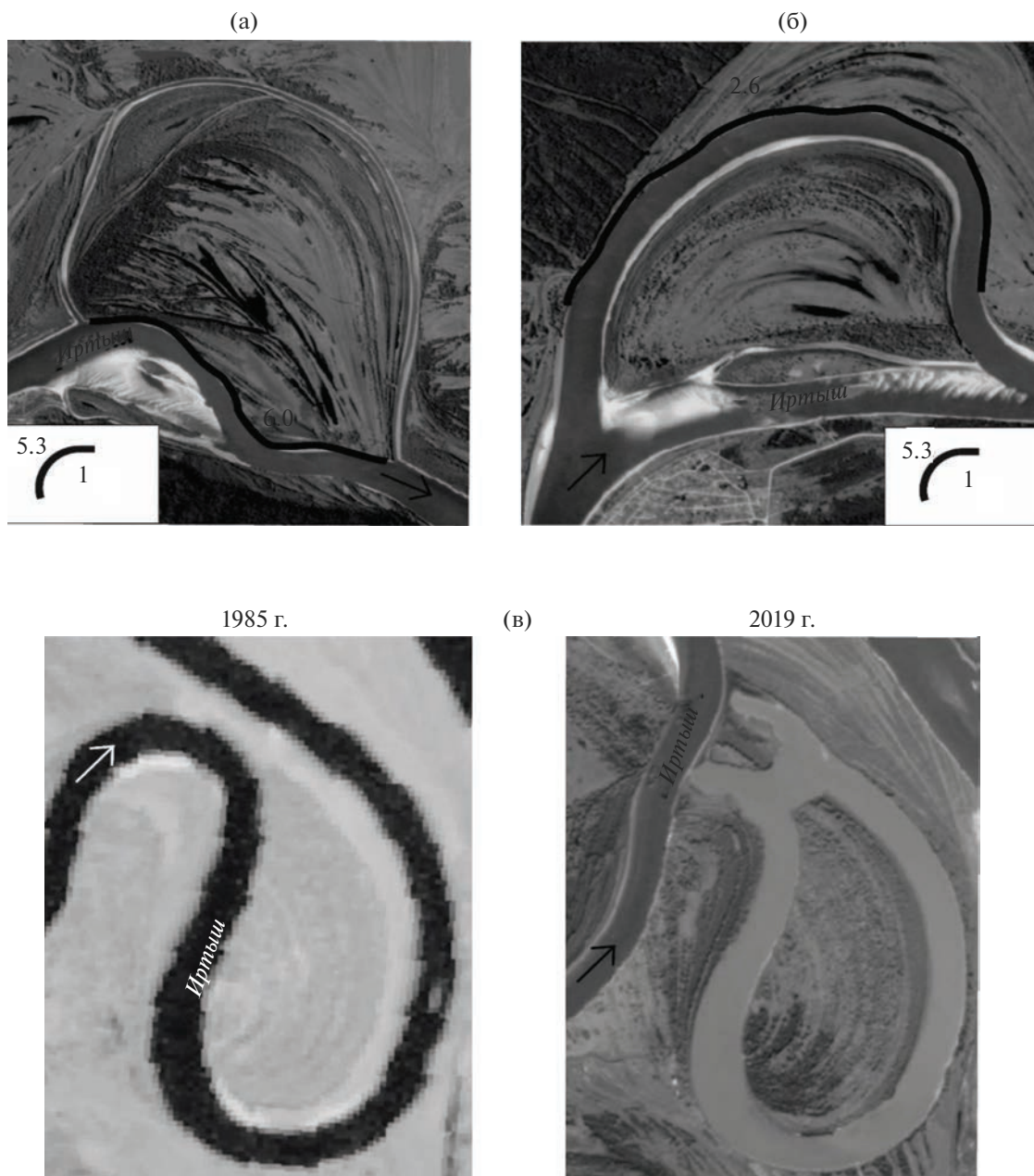


Рис. 9. Прорванные (а, б) и спрямленная (в) излучины нижнего Иртыша. 1 – см. рис. 3 в [9].

235–231 км) (рис. 9а). В другом – функционируют и переформируются оба рукава (Надцынская излучина на 573–564.5 км) (рис. 9б), в которых скорости размыва могут достигать 2.6 м/год – в одном и встречаться локально – в другом. Петлеобразные излучины Иртыша спрямляются за счет встречного размыва берегов на их крыльях, а в образовавшиеся и расширяющиеся прораны уходит большая часть стока воды и наносов; одновременно происходит постепенное обмеление и отмирание старого русла, как это произошло в

1988 г. на Артукской излучине (1191–1190 км) (рис. 9в) [9].

Прорванные или спрямленные излучины и размывы берегов на них в данных случаях несут в основном угрозу потенциальную ввиду отсутствия угрозы разрушения объектов жилой и хозяйственной инфраструктуры, но для условий судоходства они вполне благоприятны ввиду сокращения длины водного пути. Поэтому на Иртыше во второй половине XX в. проведено искусственное спрямление нескольких излучин [5]. При естественном спрямлении на некоторое время

(несколько лет) создаются серьезные затруднения для водного пути из-за возникающего разворота судового хода на 180° и местного размыва берега (это произошло на Укинской излучине в 2019 г.) [11]. Но при спрямлениях населенные пункты нередко лишаются водного подхода к ним.

Развитие многих излучин сопровождается формированием на их крыльях и в привершинных частях островов, протоки за которыми обычно маловодны, а русловые деформации в них локальны и не несут никакой угрозы [11, 16].

Средние и крупные реки Обь-Иртышского бассейна

Для всех средних и крупных рек, как и для Оби и Иртыша, главной формой переформирования русла являются развитие и смещение излучин русла и размывы берегов, темпы которых зависят от I/L . Сегментные излучины (пологие, развитые или крутые) характеризуются направленным смещением русла, и по мере их развития и искривления (увеличения I/L и уменьшения r) происходит активизация циркуляционных течений; по форме они становятся со временем омеговидными (петлеобразными) с преобладанием поперечного смещения.

На более крупных реках, преимущественно в их нижнем течении, при прохождении Q_ϕ при затопленной пойме могут образовываться прорванные излучины, иногда с сохранением и переформированием как старого русла, так и спрямляющей протоки. Но чаще всего происходит спрямление излучин за счет встречных размывов берегов на крыльях излучин с дальнейшим образованием стариц. При этом ввиду небольшой плотности населения на территориях бассейнов протоков Оби и Иртыша такого рода трансформации излучин несут только потенциальные угрозы, изменяя условия судоходства в худшую сторону (формирование перекатов и уменьшение на них гарантированных глубин), но иногда они способствуют сокращению длины водного пути, уменьшая время, затрачиваемое на редкие перевозки пассажиров и грузов.

На немногочисленных русловых (островных) и пойменно-русловых разветвлениях отмечены периодическое отмирание и развитие рукавов, огибающих острова. Отмирание или развитие рукавов разветвлений может быть вызвано последовательным продвижением на узел разветвления лево- и правобережных побочней, сформированных в том числе за счет поступления наносов от размыва берегов выше по течению, развитием и смещением излучин меандрирующих рукавов. Чаще всего эти переформирования несут только потенциальную угрозу для прибрежных территорий, отражающуюся только на условиях судоходства. Это же касается и маловодных протоков за ост-

ровами на излучинах, в которых русловые деформации локальны, а темпы размыва берегов в них невелики [9].

Для интегральной оценки опасных проявлений русловых процессов на реках Обь-Иртышского бассейна были использованы разные подходы. На крупнейших реках бассейна — Оби и Иртыше применялся показатель устойчивости русла — число Лохтина L и его изменения по длине реки. Это обусловлено тем, что имеются необходимые данные о диаметре частиц руслообразующих наносов по длине этих рек. Для остальных рек бассейна ввиду отсутствия данной информации рассчитывались баллы опасности русловых процессов. Эти подходы позволяют получить представление прежде всего о потенциальной опасности на реках Обь-Иртышского бассейна, ее изменении по длине их русел, но в то же время такие показатели, как устойчивость русла или балльная оценка, — реальные характеристики опасности, так как основываются на данных о размывах берегов.

Устойчивость русла и степень опасности русловых процессов тесно связаны: опасность закономерно увеличивается от нуля (отсутствие опасности) до 5 баллов (очень высокая) с уменьшением показателя устойчивости русла, например числа L [20]. Для каждой степени опасности русловых процессов и, соответственно, устойчивости русла характерны те или иные темпы русловых деформаций, прежде всего средние и максимальные скорости размыва берегов, а также протяженность зон размыва.

Показатель устойчивости русла средней Оби определялся ниже устья Кети, для Иртыша — ниже впадения Тобола, так как для данных участков рек имелись данные по крупности частиц руслообразующих наносов (донных отложений). Результаты расчета несколько завышены, поскольку данные о среднем диаметре частиц руслообразующих наносов d_{cp} получены на основе отбора проб преимущественно в стрежневой зоне потока на характерных участках русла. Тем не менее полученные величины устойчивости русла хорошо согласуются с уже рассчитанными значениями для Оби выше по течению (по результатам грунтовой съемки [13]), а также укладываются в теоретические представления об ее изменении по длине реки [14].

Согласно [12], устойчивость русла средней Оби непосредственно ниже устья р. Томи (20–30 км) составляет $L = 6.7$, т. е. русло относительно устойчивое (табл. 1).

Ниже по течению русло остается относительно устойчивым, а число Лохтина постепенно возрастает с 7.8 ниже впадения р. Кети до 8.2 перед устьем р. Вах. На широтном участке Оби рост показателя L сохраняется и в среднем составляет 9.1

Таблица 1. Устойчивость русла средней и нижней Оби (от слияния с р. Томью до г. Салехарда)

Участок Оби		Л		Характеристика (по классификации Р.С. Чалова [14])		С _{ср} , м/год	С _{макс} , м/год	L _{фр} , %
Между устьями Томи и Чулыма		6.7 [12]		Относительно устойчивое		3.1	26.6	48.5
Между устьями Чулыма и Кети		7.8						
Между устьями Кети и Васюгана		8.2						
Между устьями Васюгана и Тымы								
Между устьями Тымы и Ваха								
От устья Вах		9.6	9.1	Относительно устойчивое		2.1	17.6	37.3
до захода в Юганскую Обь								
От захода в Юганскую Обь		9.7						
до захода в Большую								
Салымскую протоку								
От захода в Большую		9.3						
Салымскую протоку до захода								
в протоку Неулева								
От захода в протоку Неулева		7.9						
до слияния с Иртышом								
От слияния	1162—1010 км	10.9	9.7	Устойчивое	Относительно устойчивое	2.3	16.6	35.4
	1010—950 км	8.2		Относительно устойчивое				
до разделения				устойчивое				
Малой и Горной	950—830 км	10		Устойчивое				
Оби								
Малая Обь	830—798 км	7.4	6.6	Относительно устойчивое		1.5	10.7	42.1
(от захода	798—740 км	6.8						
до ответвления	740—685 км	7.2						
протоки Большой	685—636 км	5						
Нюрик)								
Горная Обь	835—817 км	6.2	8.4	Относительно устойчивое	Относительно устойчивое			
	817—773 км	8.7		Относительно устойчивое				
	773—717 км	11.1		Устойчивое				
Малая Обь (от ответвления протоки Большой Нюрик до устья)		6.6		Относительно устойчивое				
Большая Обь	602—488 км	5.6		Относительно устойчивое				
	488—350 км	38.6		Устойчивое				
от слияния Малой Оби и Большой Оби до г. Салехарда		7.1		Относительно устойчивое		1.8	7.4	33.3

при диапазоне от 7.9 до 9.7. Нижняя Обь после слияния с р. Иртыш вдоль правого коренного берега характеризуется дальнейшим ростом устойчивости русла. На этом участке Л колеблется от 8.2 до 10.9 (в среднем 9.7), т. е. русло изменяется от относительно устойчивого до устойчивого (по классификации Р.С. Чалова [14]). В раздвоенном русле нижней Оби число Лохтина в среднем несколько меньше, но это может быть обусловлено масштабным искажением показателя, так как размер каждого рукава зависит от степени рассредоточения стока (в отличие от раздвоенного русла

в среднем течении, где правый рукав – собственно Обь – по водности в половодье практически не изменяется из-за растекания потока по пойме и отвлечения части стока в пойменные протоки). На Малой Оби (до ответвления протоки Большой Нюрик) русло относительно устойчивое, число Л изменяется в диапазоне 5.0–7.4 (среднее значение 6.6). Ниже по течению из-за отсутствия данных о руслообразующих наносах адекватных значений Л получить не удалось, но исходя из данных руслового анализа можно предположить, что устойчивость русла там сохраняется примерно та-

Таблица 2. Устойчивость русла среднего и нижнего Иртыша (от устья р. Тары до слияния с р. Обь)

Участок	Л	Характеристика (по Р.С. Чалову [14])	$C_{ср}$, м/год	$C_{макс}$, м/год	$L_{фр}$, %
Устье р. Тары – устье р. Тобола	11–12 [12]	Устойчивое	1.8	9.2	40.0
Устье р. Тобола – устье р. Демьянки	8.6	Относительно устойчивое	1.3	11.9	22.2
Устье р. Демьянки – устье р. Конды	9.7	Относительно устойчивое	1.9	13.0	28.3
Устье р. Конды – устье	10.1	Устойчивое	5.5	17.2	38.3

кая же, что и на участке Малой Оби от ее истока до протоки Большой Нюрик ($L \sim 6.6$). Устойчивость русла Горной Оби, правый берег которой – коренной, в основном больше ($L = 6.2–11.1$, в среднем 8.4, местами устойчивое). На Большой Оби степень устойчивости русла определяют в припойменной части распространенные там илистые грунты, в правой – гравий и мелкая галька, источником которых служит правый коренной берег. В начале Большой Оби, где коренной берег отходит от русла, устойчивость русла снижается до 5.6 (относительно устойчивое), но на большем ее протяжении вдоль правого коренного берега $L = 38.6$ (русло устойчивое). Ниже слияния Малой Оби и Большой Оби, где русло также сложено илистыми наносами, русло устойчивое ($L = 7.1$) [9].

Другая крупнейшая река бассейна – Иртыш в среднем и нижнем течении также имеет относительно устойчивое и устойчивое русло (табл. 2). По данным [12], от устья Тары до устья Тобола L составляет 11–12 (русло устойчивое). Проведенные расчеты L на основе отбора проб донных отложений в нижнем течении Иртыша показали, что оно меняется от 8.6 до 10.1 (в среднем 9.7), возрастая к устью [9].

Таким образом, на средней и нижней Оби и нижнем Иртыше чередуются относительно устойчивые ($L = 5.6–9.7$) и устойчивые русла ($L = 10–38.6$), для которых, согласно классификации Р.С. Чалова [20], степень опасности русловых процессов умеренная и слабая соответственно. Полученные в ходе исследования скорости раз-

мыва берегов и их протяженность на различных участках этих крупнейших рек хорошо укладываются в диапазоны темпов русловых деформаций, присущих для данных характеристик устойчивости и опасности [20]: скорости размыва – в основном от 2 до 5 м/год (средние) и >10 м/год (максимальные) на относительно устойчивых руслах и <2 м/год (средние) и 5 м/год (максимальные) – на устойчивых, не исключая экстремальных проявлений размыва берегов ввиду местных условий. Протяженность размыва берегов варьирует от нескольких десятков на реках с устойчивым руслом и от 30 до 60% на относительно устойчивых [9].

Для средних и больших рек Обь-Иртышского бассейна имеются только общие данные об устойчивости русла: L меняется от 5 до 7.5, т. е. русла притоков Оби и Иртыша относительно устойчивые; причем устойчивость возрастает к устью [12], т. е. для рассматриваемых рек наблюдается умеренная опасность, согласно классификации Р.С. Чалова [20]. Поэтому средние и большие реки бассейна оценивались баллами опасности русловых процессов по трем критериям, характеризующим размывы берегов: средняя скорость ($C_{ср}$, м/год), максимальная скорость ($C_{макс}$, м/год) и относительная протяженность фронта размыва ($L_{фр}$, %). Каждый из критериев имеет свою градацию в зависимости от степени опасности, которую он характеризует. Каждой градации присваивается свой балл – от 0 (отсутствие размывов) до 5 (наиболее неблагоприятное влияние – интенсивные размывы) (табл. 3). Полученные по каждому критерию баллы складываются, в зависимости от их итоговой суммы присваивается балл суммарной опасности: до 4 – балл опасности 1, от 4 до 8 – балл опасности 2, от 8 до 12 – балл опасности 3, от 12 до 16 – балл опасности 4, от 16 – балл опасности 5.

Каждая из рассматриваемых средних и больших рек Обь-Иртышского бассейна разбивалась на равные по длине участки, чтобы можно было сравнивать их между собой, на них была проведена оценка критериев (табл. 4).

В целом для всех рек либо выдерживается один или близкий уровень опасности, либо наблюдается некоторое ее увеличение вниз по течению.

Таблица 3. Критерии опасности русловых процессов по проявлению в размывах берегов на средних и больших реках Обь-Иртышского бассейна

Балл	Критерий		
	$C_{ср}$, м/год	$C_{макс}$, м/год	$L_{фр}$, %
0	<1	<1	0
1	1–2	1–4	0–10
2	2–3	4–7	10–20
3	3–4	7–10	20–30
4	4–5	10–13	30–40
5	>5	>13	>40

Таблица 4. Оценка опасности на средних и больших реках Обь-Иртышского бассейна

Река	Номер участка	Границы, км	$C_{\text{ср}}$, м/год	$C_{\text{макс}}$, м/год	$L_{\text{фр}}$, км	X , км	$L_{\text{фр}}$, %	Сумма баллов	Итоговый балл опасности
Тым	1	311–208	2.3	4.6	11.3	206	5.5	5	2
	2	208–104	2.1	4.2	6.1	208	2.9	5	2
	3	104–0	2.6	5.2	9.8	208	4.7	5	2
Тромъеган	1	389–260	1.2	2.4	9.6	258	3.7	3	1
	2	260–130	1.4	4.5	15	260	5.8	4	1
	3	130–0	1.8	5.8	16.7	260	6.4	4	1
Полуй	1	397–264	1.4	3	27.1	266	10.2	4	1
	2	264–132	1.3	2.7	27.4	264	10.4	4	1
	3	132–0	1.3	2.6	5.9	264	2.2	3	1
Казым	1	444–296	1.4	2.1	9.9	296	3.3	3	1
	2	296–148	1.4	2.1	1.5	296	0.5	3	1
	3	148–0	1.8	4.9	29.1	296	9.8	4	1
Аган	1	373–248	1.4	3.5	43.8	250	17.5	4	1
	2	248–124	1.8	8.9	39.9	248	16.1	6	2
	3	124–0	1.8	4.4	28.8	248	11.6	5	2
Кеть	1	556–417	1.7	3.9	35.2	278	12.7	4	1
	2	417–278	1.7	3.6	37.2	278	13.4	4	1
	3	278–139	1.8	4.5	50.4	278	18.1	5	2
	4	139–0	2.1	6.1	46.8	278	16.8	6	2
Вах	1	771–579	1.7	3.4	21	384	5.5	3	1
	2	579–386	1.4	9.5	28.5	386	7.4	5	2
	3	386–193	1.5	9.2	42	386	10.9	6	2
	4	193–0	1.8	3.8	35	386	9.1	3	1
Чулым	1	400–266	3.3	12.7	66.1	268	24.7	10	3
	2	266–133	3.5	11.8	74.6	266	28.0	10	3
	3	133–0	3.2	10	96.9	266	36.4	10	3
Большой Юган	1	294–147	1.4	2.8	17.9	294	6.1	3	1
	2	147–0	1.5	3.3	41.8	294	14.2	4	1
Васюган	1	470–235	2.1	4.2	5.3	470	1.1	5	2
	2	235–0	2	3.2	9.2	470	2.0	3	1
Тобол	1	434–290	1.3	2.2	18.4	288	6.4	3	1
	2	290–145	2.3	6.8	84.5	290	29.1	7	2
	3	145–0	2.3	6.8	63.3	290	21.8	7	2
Лямин	1	289–145	1.2	2.3	11.4	288	4.0	3	1
	2	145–0	1.3	2.3	16.9	290	5.8	3	1
Парабель	1	246–123	1.2	2	8.4	246	3.4	3	1
	2	123–0	1.2	1.9	16	246	6.5	3	1
Тура	1	659–330	1.2	1.8	2.3	658	0.3	3	1
	2	330–0	2	5.9	72.1	660	10.9	5	2
Тавда	1	730–365	0	0	0	730	0.0	0	1
	2	365–0	1.9	7	95.7	730	13.1	5	2
Конда	1	735–490	1.6	4.4	53.8	490	11.0	5	2
	2	490–245	1.5	2.7	21.2	490	4.3	3	1
	3	245–0	1.8	5.1	27.1	490	5.5	4	1
Томь	1	120–0	2.4	6.5	8.0	240	3.3	5	2
Северная Сосьва	1	153–0	2.3	6.8	23	306	7.5	5	2
Демьянка	1	311–155	1.3	2.3	3.4	312	1.1	3	1
	2	155–0	1.4	3.2	9.3	310	3.0	3	1

Исключение составляют реки Вах и Конда, на которых интенсивность горизонтальных русловых деформаций несколько снижается вниз по течению. Возможно, это связано, с одной стороны, с тем, что они имеют в нижнем течении общую и широкую пойму с Обью и Иртышом и, соответственно, происходит растекание потока по ней; с другой стороны — с прохождением руслоформирующего расхода воды при затопленной пойме.

Наибольшая опасность (2–3 балла) характерна для правобережных и одних из самых крупных притоков Оби в юго-восточной части бассейна — Томи и Чулыма. При продвижении на С и З она снижается с 2 до 1 балла. Также балл опасности выше в западной части бассейна, где он приурочен к рекам бассейна р. Тобол, а также для рек Конды и Северной Сосьвы. Это, скорее всего, связано с изменениями внутригодового распределения стока (снеговое питание весной в Зауралье и в южной части и грунтовое питание летом в северной) ввиду изменения температуры воздуха и режима осадков, степени заболоченности и заозеренности бассейнов и т. д.

В целом для средних и больших рек Обь-Иртышского бассейна опасность русловых процессов слабая (1–2 балла), тогда как на крупнейших — Оби и Иртыше — она повышается и, согласно классификации устойчивости [20], становится умеренной (относительно устойчивые русла — 2 балла опасности — умеренная степень). При этом как на Оби и Иртыше, так и на их притоках наблюдаются экстремальные размывы, обусловленные местными условиями (легко размываемые аллювиальные отложения, слагающие пойменные берега или речные террасы; направляющее воздействие выступов (мысов) коренного берега; слив осветленных вод выклинивающейся поймы и т. д.), и, наоборот, участки русла, где при подходе к коренному берегу устойчивость русла возрастает, а темпы горизонтальных русловых деформаций резко снижаются или вообще отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Русла рек Обь-Иртышского бассейна формируются в свободных и относительно однородных условиях — широко распространены размывы берегов, характеризующиеся высокими темпами. Протяженность и положение фронтов размыва отражают характер смещения форм русла (излучин или рукавов), а скорости — интенсивность горизонтальных русловых деформаций. Размывы берегов не только создают опасность для освоения приречных территорий и водных ресурсов, но и являются источником поступления наносов в русло, которые, аккумулируясь ниже по течению и приводя к обмелению перекатов, затрудняют судоходство.

Средняя и нижняя Обь и нижний Иртыш имеют преимущественно относительно устойчивые русла и, соответственно, умеренную опасность. На их притоках опасность русловых процессов относительно невысокая (1–2 балла), увеличивается вниз по течению и достигает 3 баллов в низовьях крупных рек (Томь и Чулым). При этом в целом для рек Обь-Иртышского бассейна интенсивность размыва берегов и, соответственно, степень опасности горизонтальных русловых деформаций снижаются в направлении к С и к Обь-Иртышскому междуречью.

Полученные результаты можно использовать для разработки рекомендаций по безопасному использованию водных ресурсов территории и по эффективному управлению русловыми процессами, в том числе их опасными проявлениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович К.М., Злотина Л.В., Турыкин Л.А. Размыв речных берегов: факторы, механизм, деятельность человека // Геоморфология. 2019. № 2. С. 3–17.
2. Беркович К.М., Кирик О.М., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Чернов А.В. Опасные проявления русловых процессов (на примере рек России) // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 1996. № 3. С. 35–41.
3. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Оценка влияния русловых процессов на геоэкологическую ситуацию в речных долинах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1998. № 2. С. 59–67.
4. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение. М.: ГЕОС, 2000. 332 с.
5. Дегтярев В.В. Улучшение судоходных условий сибирских рек. М.: Транспорт, 1987. 176 с.
6. Завадский А.С., Чалов Р.С., Чернов А.В., Головлев П.П., Морейдо В.М., Белякова П.А. Морфодинамика русел и баланс наносов рек бассейна Селенги (Монголия–Россия) // Эрозия почв и русловых процессов. М.: Географ. фак. МГУ, 2019. Вып. 21. С. 149–170.
7. Западная Сибирь. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 488 с.
8. Куракова А.А. Районирование Обь-Иртышского бассейна по условиям размыва берегов рек // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. № 2. С. 1–15.
9. Куракова А.А. Гидролого-морфодинамический анализ русел и опасные проявления русловых процессов на равнинных реках Обь-Иртышского бассейна (лесная зона). Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2022. М.: 28 с.
10. Куракова А.А. Размывы пойменных берегов Оби и Иртыша и их связь с морфологией русла // Геогр. вестн. 2022. № 1 (60). С. 40–59.
11. Куракова А.А., Чалов Р.С. Морфодинамика русла нижнего Иртыша // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 99–109.
12. Русловый режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР). М.: Географ. фак. МГУ, 1994. 336 с.

13. Русловые процессы и водные пути на реках Обско-го бассейна / Под ред. *Р.С. Чалова, Е.М. Плескевич, В.А. Баула*. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
14. *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.
15. *Чалов Р.С., Камышев А.А., Завадский А.С., Куракова А.А.* Морфодинамика и гидролого-морфологическая характеристика Оби на широтном участке // География и природ. ресурсы. 2021. № 2. С. 92–102.
16. *Чалов Р.С., Куракова А.А., Завадский А.С., Камышев А.А.* Меандрирование русла и формирование разветвлений на нижнем Иртыше (от г. Омска до слияния с р. Тобол) // Геогр. вестн. 2023. № 1 (64). С. 100–115.
17. *Чалов Р.С., Чернов А.В.* Районирование территории России по экологическому состоянию русел и пойм // Проблемы оценки экологической напряженности территории России: факторы, районирование. М.: Изд-во МГУ, 1993. С. 66–72.
18. *Чалов Р.С., Чернов А.В., Беркович К.М., Михайлова Н.М.* География опасных проявлений русловых процессов на реках России // Изв. РГО. 2017. Т. 149. № 4. С. 13–32.
19. *Чалов Р.С.* Параметризация русловых процессов для прогнозных оценок и диагностики опасных проявлений // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 551–562.
20. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: КРАСАНД, 2019. 640 с.
21. *Чернов А.В.* География и геоэкология русел и пойм рек Северной Евразии. М.: Крона, 2010. 684 с.
22. *Rosgen D.L.* A Practical Method of Computing Stream-bank Erosion Rate. Proc. Seventh Federal Interagency Sedimentation Conf. 2001. V. 2. P. 9–15.
23. *Sapkota S., Tamrakar N. K.* Bank erosion and lateral instability hazard status of Kodku Khola, southeast Kathmandu, central Nepal // J. Nepal Geol. Soc. 2016. № 50 (1). P. 95–103.