

УДК 551.435.1(282.251.1)

МОРФОДИНАМИКА РУСЛА НИЖНЕГО ИРТЫША

© 2022 г. А. А. Куракова¹, Р. С. Чалов^{1,*}¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: rschalov@mail.ru

Поступила в редакцию 30.10.2021 г.

После доработки 04.12.2021 г.

Принята к публикации 15.07.2022 г.

Впервые для нижнего Иртыша (от слияния с р. Тобол до устья) дается характеристика морфологии русла, условий его формирования, которые до сих пор не были достаточно освещены, несмотря на важное хозяйственное значение реки. Геоморфологическое строение долины позволило разделить ее на три участка, различающихся по водности, распространению морфодинамических типов русла, изменением их параметров и особенностей переформирования, взаимодействию русла с коренными бортами долины. Верхний участок характеризуется относительно суженной поймой, распространением “больших” излучин с наибольшими величинами параметров, которые своими вершинами касаются противоположных бортов долины, и одиночных разветвлений; ширина пояса меандрирования соизмерима с шириной днища долины. На втором участке при постепенном расширении днища долины русло тяготеет к правому коренному берегу, преобладают вынужденные и вписанные излучины. На третьем участке с наибольшей шириной поймы пояс меандрирования занимает в основном центральную часть днища долины. Появляются пойменные протоки (ответвления), что приводит к снижению удельного руслоформирующего расхода воды, проходящего во время половодья (при затопленной пойме). В целом на нижнем Иртыше преимущественно распространены извилистые (меандрирующие) русла с преобладанием свободных излучин; многие излучины в привершинных частях и на крыльях осложнены разветвлениями, образующими формы второго порядка; реже, на относительно прямолинейных участках русла, встречаются русловые и прибрежные разветвления, на которые приходится почти четверть длины. Вместе с разветвлениями, связанными с образованием прорванных излучин, распространены одиночные, односторонние и параллельно-рукавные. Морфологические параметры свободных излучин и рукавов русловых разветвлений снижаются вниз по течению, что обусловлено расширением днища долины, отвлечением части стока в пойменные протоки (ответвления) и растеканием потока в половодье по пойме. На нижнем Иртыше наблюдаются высокие темпы размыва берегов, возрастающие вниз по течению (средние — с 1.3 до 5.5 м/год, среднемаксимальные — с 11.9 до 17.2 м/год) и приводящие к изменению параметров форм русла, продольному и поперечному их смещению. Развитие спрямляющих протоков и образование прорванных излучин, переформирования рукавов русловых разветвлений наиболее активны на свободных излучинах и излучинах рукавов одиночных разветвлений, для которых характерны наибольшие скорости и протяженность фронтов размыва берегов.

Ключевые слова: русловые процессы, излучины, разветвления, размывы берегов**DOI:** 10.31857/S0435428122040083

ВВЕДЕНИЕ

Иртыш в нижнем течении входит в ранг крупнейших рек; она имеет важнейшее транспортное и водохозяйственное значение для Западной Сибири и ее нефтегазодобывающего комплекса. Несмотря на это русловые процессы на Иртыше и в его нижнем течении остаются до сих пор практически неизученными или касаются лишь отдельных форм их проявлений. Одно из первых исследований было выполнено немецким естествоиспытателем И.Г. Гmeliным, который в первой половине XVIII в. описал разрушение берегов

Иртыша у г. Тобольск и предложил комплекс берегозащитных мер; их реализация привела к тому, что устье р. Тобол — крупнейшего левого притока — было перенесено на 6 км вверх по Иртышу (Земцов, 1976). И.Б. Петров (1979) дал общую характеристику геолого-геоморфологического строения долины нижнего Иртыша и его поймы. Размывы берегов реки были рассмотрены А.С. Герасимовой (1959); в 1980–1990-е гг. Тюменской комплексной геологоразведочной экспедицией (ТКГРЭ) были заложены стационары на Иртыше и реках его бассейна (Белов, 1995) для мониторинга размыва пойменных берегов и склоновых

процессов на коренных берегах. В этих работах дана обобщенная морфологическая характеристика русла без анализа условий формирования, динамики потока и русла, пространственно-временной его изменчивости. А.С. Завадский, соотнеся параметры излучин нижнего Иртыша с другими меандрирующими реками, но меньших размеров, в том числе средним Иртышом, пришел к выводу об отсутствии их связи с параметрами водности на крупнейших реках (нижний Иртыш, Обь, Хуанхэ) (Завадский, Чалов, 1997). В.В. Дегтярев (1987), оценивая условия судоходства на среднем и нижнем Иртыше, обосновал возможности искусственного спрямления излучин на особо затруднительных для водного пути участках и показал их эффективность. С.В. Боровков (2010) отметил неблагоприятные для прибрежной инфраструктуры последствия переформирования русла в районе г. Ханты-Мансийск и предложил решения проблемы также путем спрямления излучин. Результаты этих исследований показывают их выборочный, локальный характер, либо ограниченность общими сведениями, не дающими полного представления о морфодинамике русла реки. Таким образом, с точки зрения русловых процессов р. Иртыш остается “белым пятном” в региональном русловедении.

Задача настоящей статьи — впервые для нижнего Иртыша (от слияния с р. Тобол до устья) дать оценку условий формирования русла, распространения его морфодинамических типов, пространственно-временных изменений размывов берегов как наиболее яркого отражения русловых деформаций. В ее основу положены материалы натурных русловых исследований в июне 2021 г.¹, анализ имеющихся карт, космоснимков и планов русла, зафиксировавших его состояние на разные временные срезы.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Иртыш — крупнейший левый приток Оби, нижнее течение которого расположено в западной части центральной полосы Западно-Сибирской равнины. Равнинный рельеф территории сформировался в четвертичный период вследствие ледниковой, речной и озерной аккумуляции в приледниковых зонах, размеры и местоположение которых неоднократно менялись по мере развития оледенения; в дальнейшем ледниковые и речные отложения не раз перемывались (Воскресенский, 1968).

¹ В полевых исследованиях участвовали к.г.н. А.С. Завадский, аспирант А.А. Камышев. Авторы выражают благодарность руководству “Обь-Иртышводпути”, Ханты-Мансийскому управлению и Тобольскому району водных путей и судоходства за техническую поддержку натурных исследований.

На участке от Тобольска до Ханты-Мансийска русло Иртыша проходит вдоль правого борта долины — возвышенности Тобольский материк, сложенной среднечетвертичными суглинками, накопившимися в результате подпора в эпоху самаровского оледенения. По левобережью реки полосой в 30–50 км тянется песчаная равнина с абсолютными отметками 40–45 м, не имеющая, в отличие от поймы и надпойменных террас, наклона вниз по течению (Воскресенский, 1968). Уклон реки в нижнем течении составляет 0.025–0.035‰ (Чалов и др., 1994). В районе г. Тобольска река, подходя к правому коренному берегу и огибая Тобольский материк, поворачивает на север, сменяя свое направление с субширотного на субмеридиональное. Ширина днища долины B_d (пойма + русло) в нижнем течении реки изменяется от 5–10 до 15–20 км, ширина русла b_p колеблется от 0.5 до 1.5 км (рис. 1).

По изменениям ширины днища долины и взаимодействия русла реки с ее бортами нижний Иртыш можно разделить на три участка: I — самый протяженный (666.5–312 км) между устьями рек Тобол и Демьянка; B_d изменяется в пределах 10 км, русло тяготеет к правому коренному берегу, образуя большие излучины, которые вершинами последовательно касаются противоположных бортов долины; II — от впадения р. Демьянки до устья р. Конды (312–106 км); B_d возрастает до 12 км, русло проходит вдоль правого коренного берега, оставляя слева широкую пойму; III — нижний (106–0 км); B_d увеличивается до 20 км, русло расположено посередине днища долины, свободно меандрирует, и лишь в конце участка и у г. Ханты-Мансийска Иртыш подходит к правому коренному берегу; ниже г. Ханты-Мансийска Иртыш, пересекая пойму Оби, принимает рукава ее раздвоенного русла (протоки Бол. Неулевка и Тренькина) (Чалов и др., 2021).

Среднемноголетний расход 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 (Петров, 1979). Во время русловых исследований на нижнем Иртыше в июне 2021 г. изменение расходов воды составило в створе г. Тобольска — 2250 м³/с, в г. Ханты-Мансийске — 9580 м³/с. Вниз по течению водность Иртыша увеличивается за счет впадения в него притоков р. Демьянки — 150 м³/с и р. Конды — 610 м³/с, а в низовьях (ниже г. Ханты-Мансийска) на последних 9 км — из-за слияния с рукавами раздвоенного русла средней Оби — Бол. Неулевки (900 м³/с) и Тренькина (3820 м³/с).

Русловой анализ и оценка темпов размывов берегов проводились на основе космических снимков (“Sentinel-2” и “Landsat 5” за период 1987–2020 гг.) и карт русел (1971, 2006 и 2016 г.),

их сопоставления и по материалам натурных исследований. Последние включали измерения расходов воды и взвешенных наносов во всех рукавах и протоках, съемки скоростных полей, картирование размываемых берегов. Для определения темпов смещений русла за многолетний период был применен автоматизированный метод дешифрирования осевых линий русла реки в определенном спектре цветовых каналов спутниковых снимков и совмещения их за разные годы (Завадский и др., 2019). В результате по всей длине исследуемого участка Иртыша было установлено изменение скорости ($C_{\text{ср}}$, м/год) и протяженность фронтов ($L_{\text{фр}}$, км) размыва берегов (или их отсутствие при наличии ограничивающего фактора – коренного берега). Для каждого фронта размыва были получены среднегодовые и среднемаксимальные скорости смещения берегов как частное от деления величины отступления береговой линии на временной промежуток (33 года). Разрешение космических снимков (30 м) и точность методики определяют пороговое значение выявляемых скоростей размыва берегов – 1 м/год. По картам русла (ранее они назывались лоцманскими) и по наблюдениям в поле проводилось уточнение границ фронтов размыва.

Каждая форма русла (излучины, разветвления) характеризовалась следующими морфологическими параметрами: степенью развитости (l/L), радиусом кривизны (r , м), стрелой прогиба ($h_{\text{и}}$, м), шагом излучин ($L_{\text{изл}}$, м) и разветвлений ($L_{\text{разв}}$, м), шириной B_0 и длиной островов (L_0). Последний определялся только для одиночных разветвлений; изгибы рукавов, огибающих острова, образуют излучины, имеющие аналогичное излучинам русла расположение зон размыва и аккумуляции наносов (Чалов, 2017).

Сопоставление разновременных карт, космоснимков и планов русла позволило дать ретроспективный анализ переформирования русла. Результаты их обработки были откорректированы и дополнены в ходе экспедиционных исследований на нижнем Иртыше в июне 2021 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для Иртыша в нижнем течении характерно преимущественное распространение извилистого (меандрирующего) русла, составляющего 65.9% его длины (439.5 км из 666.5 км участка) (рис. 2 (в–и)); 24% русла приходится на прямолинейные отрезки (рис. 2 (а)), суммарная протяженность которых – 160 км; 10.1% длины реки образуют разветвления (67.5 км), среди которых абсолютно преобладают одиночные (9 из 11 участков, суммарная длина – 60 км) (рис. 2 (б)-2) и лишь одно является параллельно-рукавным (Тугаловское разветвление на 291–284.5 км по судовому

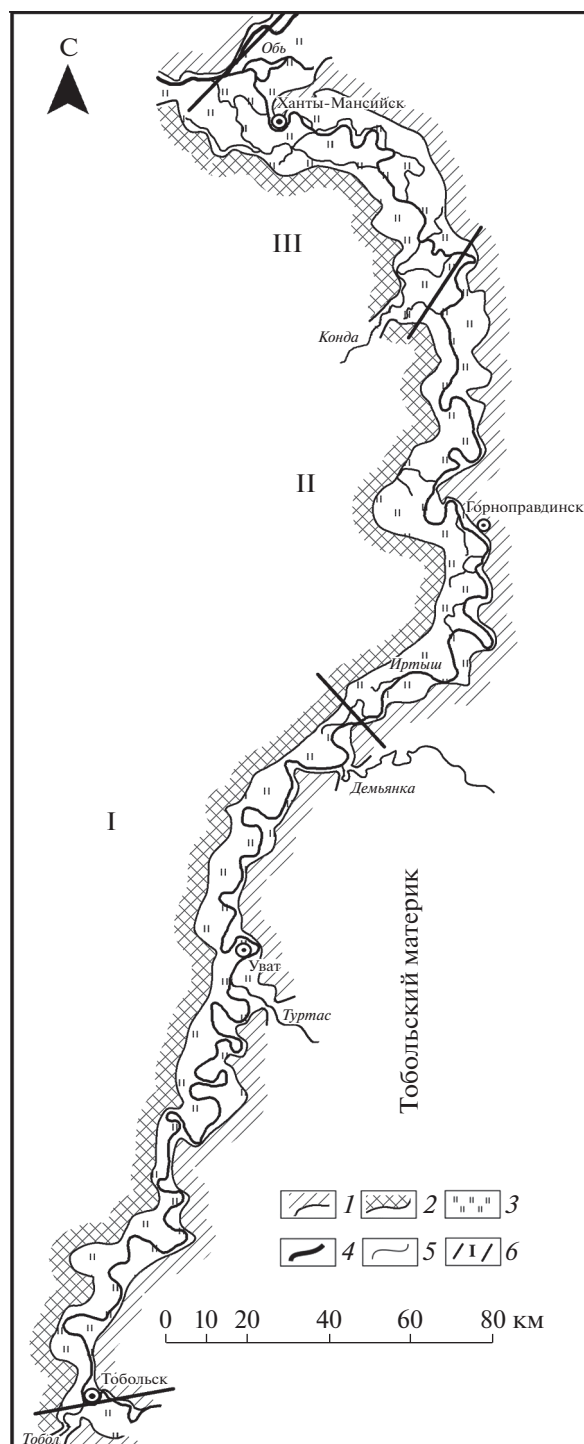


Рис. 1. Обзорная схема нижнего Иртыша. 1 – правый коренной борт; 2 – левобережная песчаная равнина; 3 – пойма; 4 – русло Оби и Иртыша; 5 – притоки Иртыша и крупные пойменные протоки (ответвления); 6 – границы и номера участков нижнего Иртыша.

Fig. 1. Overview diagram of the lower Irtysh. 1 – starboard root side; 2 – left-bank sandy plain; 3 – floodplain; 4 – the channel of the Ob and Irtysh; 5 – tributaries of the Irtysh and large floodplain channels (branches); 6 – boundaries and numbers of sections of the lower Irtysh.

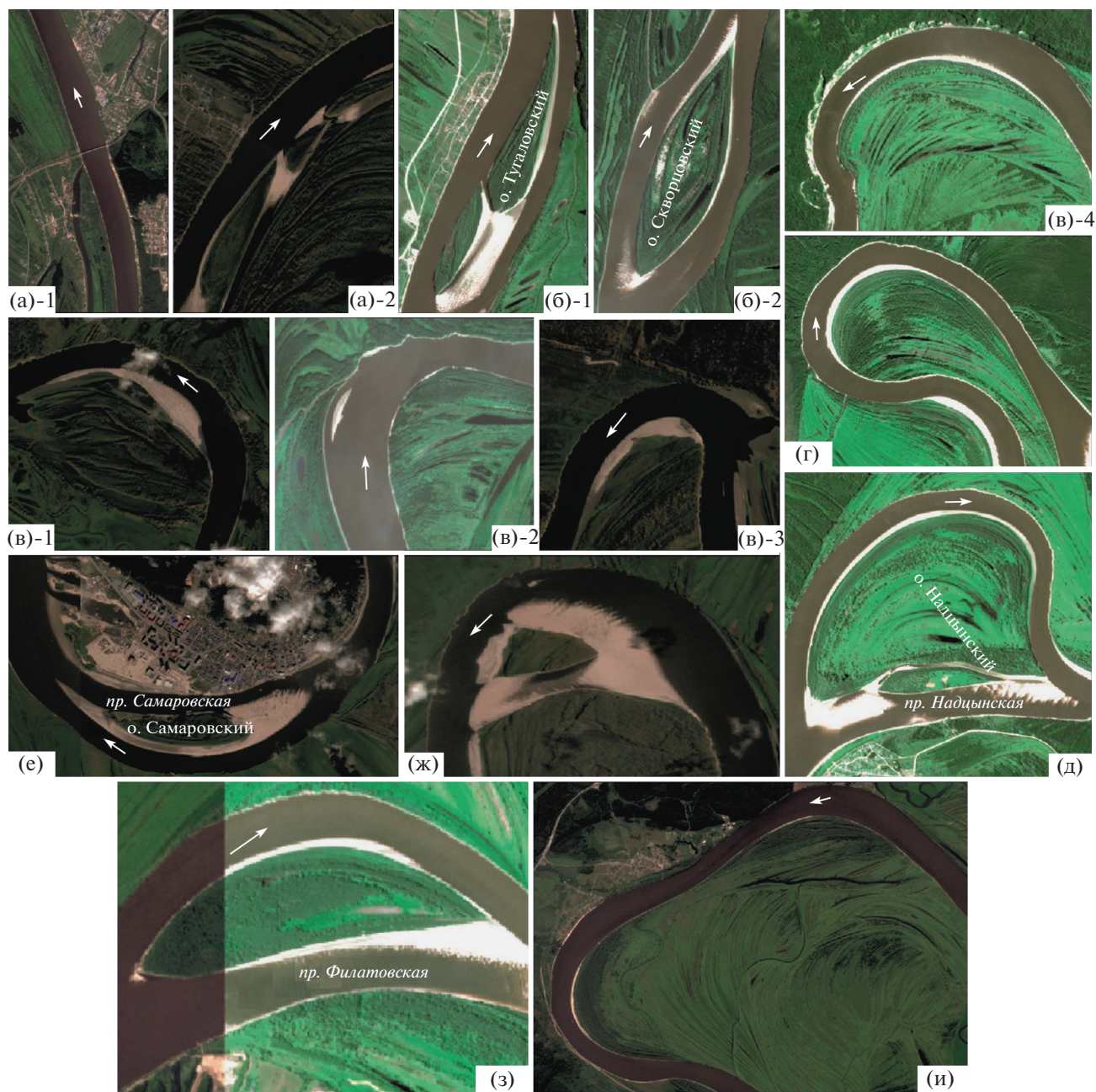


Рис. 2. Морфодинамические типы русла нижнего Иртыша. (а) — прямолинейное русло ((а)-1 — неразветвленное (657–651 км), (а)-2 — с односторонними прибрежными разветвлениями (117–110 км)); (б) — разветвления ((б)-1 — параллельно-рукавное (291–284.5 км), (б)-2 — одиночное (343–339 км)); (в) — излучины ((в)-1 — свободная сегментная (95–92 км), (в)-2 — свободная синусоидальная (349–344 км), (в)-3 — вынужденная (110–106 км), (в)-4 — вписанная (578–573 км)); (г) — петлеобразная (553–542 км); (д) — прорванная (573–564.5 км); (е) — обтекающая (26–18.5 км); (ж) — крутая излучина с островом в привершинной части (63–60 км), (з) — пологая излучина с островом в привершинной части (586–581 км); (и) — трапециевидная (сундучная) (600–587 км).

Fig. 2. Morphodynamic types of the lower Irtysh riverbed. (a) — rectilinear channel ((a)-1 — unbranched (657–651 km), (a)-2 — with one-way coastal branches (117–110 km)); (б) — branches ((б)-1 — parallel-sleeve (291–284.5 km), (б)-2 — single (343–339 km)); (в) — bends ((в)-1 — free segment (95–92 km), (в)-2 — free sinusoidal (349–344 km), (в)-3 — forced (110–106 km), (в)-4 — inscribed (578–573 km)); (г) — loop-shaped (553–542 km); (д) — broken (573–564.5 km); (е) — streamlined (26–18.5 km); (ж) — a steep bend with an island in the vertex part (63–60 km), (з) — a gentle bend with an island in the vertex part (586–581 km); (и) — trapezoidal (chest) (600–587 km).

ходу) (рис. 2 (б)-1). Кроме того, разветвлениями осложнены более трети всех излучин русла. Они связаны с островами, образовавшимися в привершинных частях излучин (рис. 2 (ж)) или с развитием спрямляющих протоков через шпору излучин (рис. 2 (д)). Прямолинейные участки русла иногда осложнены односторонними прибрежными разветвлениями (рис. 2 (а)-2), в которых основной рукав отделен от береговой поймы относительно маловодными (0.6–6.5%) протоками (такие разветвления имеются на 5 прямолинейных участках общей протяженности 20 км). В итоге общая протяженность разветвлений (собственно разветвления русла и разветвления, осложняющие излучины и прямолинейные участки) на нижнем Иртыше составляет 145.5 км, или 21.8% его длины.

Среди излучин русла наиболее часто встречаются сегментные свободные (32 ед.), общая длина которых 179.5 км (26.9% протяженности нижнего Иртыша, 40.8% его извилистого русла); синусоидальные (рис. 2 (в)-2) и пальцеобразные излучины (12 ед.) занимают по длине 71 км (10.7%). У большинства из них в их привершинных частях $r < 2.5b_p$. Это приводит к нарушению безотрывного обтекания берегов (правило Миловича), при этом динамическая ось потока прижимается к выпуклому берегу, тогда как у вогнутого образуется водоворотная зона, формирующая отмели. Особенно характерно это явление для вынужденных излучин, где изгиб русла в их вершине достигает 90° . Например, на самой крутой вынужденной излучине, получившей название Кировский “поворот” (она находится на границе II и III участков) $r = 1.4b_p$, $l/L = 2.02$ (рис. 2 (в)-3). Три излучины, имеющие сложную петлеобразную форму (рис. 2 (г)), представляют собой следующую комбинацию: сегментная излучина в верхнем или нижнем крыле, излучина в привершинной части и прямолинейный участок, образующий нижнее или верхнее крыло излучины. Эти излучины или касаются в привершинной части коренного берега, к которому они подходят, или изгиб русла в привершинной части имеет вогнутые очертания. Нижнее прямолинейное крыло таких петлеобразных излучин располагается вдоль коренного берега, поэтому вся излучина относится к категории вписанных или вынужденных. Вписанных (рис. 2 (в)-4) и вынужденных (рис. 2 (в)-3) излучин (не считая привершинных частей петлеобразных) на нижнем Иртыше 11. Их суммарная длина 58.5 км, что составляет 8.8% (вместе с элементами петлеобразных излучин – 73 км, 10.9% длины участка).

Особое место среди излучин занимают трапециевидные (сундучные) излучины (рис. 2 (и)), представляющие собой комбинацию форм русла: верхняя – вынужденная излучина, сформированная

на подходе реки к коренному берегу; центральная – короткий прямолинейный отрезок вдоль коренного берега, иногда имеющий слабо-вогнутую конфигурацию, напоминающую вписанную излучину; нижняя – адаптированная излучина с верхним крылом у коренного берега и нижним в пойменных берегах, либо вписанная излучина, вогнутость которой располагается вдоль коренного берега.

Распространение типов русла и их параметров по длине реки соответствует вышеприведенному разделению нижнего Иртыша на три участка. Верхний (I) – от слияния с р. Тоболом до устья р. Демьянки (666.5–312 км) характеризуется относительно суженным днищем долины, ширина которой не превышает 10 км, и отсутствием пойменных протоков (ответвлений). Здесь в основном распространены “большие” излучины (табл. 1), вершины которых последовательно касаются противоположных бортов долины, а пояс меандрирования занимает все днище долины. Одни излучины (2–4 ед.) разделяются довольно протяженными участками прямолинейного русла (от 10 до 17.5 км), приуроченными к сужениям долины (до 4.5 км) и проходящими вдоль или в непосредственной близости от правого коренного берега. Здесь находятся все петлеобразные, трапециевидные (сундучные) излучины и половина всех вписанных и вынужденных излучин. Кроме пяти одиночных русловых разветвлений, встречающихся на участке между сериями излучин, часто осложнены излучины разветвлениями второго порядка в их привершинных частях (рис. 2 (ж, з)) и их крыльях, и развитием спрямляющих протоков через их шпору (рис. 2 (д)). Большую роль в развитии форм русла играют направляющие потоки выступы (мысы) коренного берега и создающие выбоины (вогнутости) в конфигурации противоположных берегов, в которых формируются осередки, при зарастании превращающиеся в острова. В начале участка находится прорванная Надцынская излучина, здесь мыс правого коренного берега (гора Надцынская) направляет поток в левый изогнутый рукав. Правый спрямляющий рукав (протока Надцынская), заход в который находится за мысом, мелкий, хотя доля стока воды в нем – 34.7%, несмотря на то, что он более чем в 2 раза короче левого судоходного (3.25 км против 7 км). Очевидно, в него поступает значительная часть расхода взвешенных наносов (141 кг/с или 33.2%) из-за крутого, около 90° , угла ответвления.

На втором, среднем, участке (II) – от устья р. Демьянки до Кировского “поворота” (312–106 км) – днище долины несколько расширяется (до 10–12 км), русло реки в основном тяготеет к правому борту долины, образуя вынужденные и вписанные излучины, характеризующиеся меньшими, по сравнению с первым участком, параметрами (табл. 1). Увеличивается количество рус-

Таблица 1. Параметры форм русла нижнего Иртыша
Table 1. Parameters of the forms of the channel of the lower Irtysh

Параметр	r	L	$h_{\text{и}}$	l/L
Участок 1 (666.5–312 км)				
Среднее значение	2100	4000	2050	1.80
Мода	2600	3400	1000	1.30
Медиана	1950	3950	1850	1.45
Минимальное	1200	1300	800	1.10
Максимальное	3400	6400	4400	5.90
Участок 2 (312–106 км)				
Среднее значение	1900	3800	1750	1.65
Мода	1600	2600	2200	1.20
Медиана	1700	3700	1600	1.50
Минимальное	900	2400	700	1.10
Максимальное	3100	6100	3300	2.80
Участок 3 (106–0 км)				
Среднее значение	1550	3050	1450	1.50
Мода	1600	3200	1100	1.48
Медиана	1600	3200	1400	1.40
Минимальное	800	1400	600	1.10
Максимальное	2300	4200	2400	2.17

Параметры форм русла: r – радиус кривизны (м), L – шаг (м), $h_{\text{и}}$ – стрела прогиба (м), l/L – степень развитости.

ловых разветвлений (их здесь 6); практически все излучины и участки с прямолинейным руслом осложнены разветвлениями.

На нижнем (III) участке (106–0 км) днище долины, которая на последних 9 км соединяется с долиной р. Оби, расширяется до 15–20 км. Участок представлен двумя протяженными сериями (по 6 ед.) излучин с наименьшими значениями их параметров (табл. 1) и, в то же время, с большим осложнением их разветвлениями в привершинных частях. Серии излучин разделены протяженными участками (5.5–6 км) относительно прямолинейного, неразветвленного русла. Пояс меандрирования занимает преимущественно центральную часть днища долины, имея максимальную ширину до 5 км. Появляются пойменные протоки (ответвления). Бóльшая ширина поймы и пойменные протоки снижают величину удельного руслоформирующего расхода воды во время половодья и уменьшают (при затопленной пойме) водность основного русла Иртыша. Перед самым устьем Иртыш подходит к северной оконечности Тобольского материка – Самаровскому останцу, у которого образует сначала вынужденную излучину, а затем, огибая его выступ, – обтекающую. В привершинной части излучины по мере ее искривления за последние 50 лет сформировался о-в Самаровский, образовав разветвление русла (спрямля-

ющий рукав вдоль останца забирает 31.1% общего расхода воды).

Особенностью нижнего Иртыша, обнаруженной при анализе изменения морфологических параметров форм русла по длине русла, является уменьшение их значений вниз по течению (рис. 3 (а–г)). По-видимому, это связано с расширением днища долины, растеканием потока в половодье по пойме и отвлечением части расхода в пойменные протоки (ответвления). Радиус кривизны (r , м) свободных излучин и рукавов одиночных разветвлений (последние подобны излучинам русла) на первом участке находится чаще всего в диапазоне от 1500 до 2000 м (рис. 3 (а)); значительная их доля приходится на формы русла с $r > 2000$ м. Для второго участка также характерно преобладание форм русла с радиусом кривизны 1500–2000 м, но, в отличие от верхнего участка, появляются формы с $r < 1000$ м, а доля форм русла с $r > 2000$ м становится меньше. На третьем участке значения r излучин русла и рукавов – от 1500 до 2500 м, доля излучин с $r < 1500$ м выше по сравнению с остальными участками, а формы русла с $r > 2500$ м вообще отсутствуют.

Другой важный параметр, характеризующий размеры форм русла – шаг L , м. На первом участке встречаются излучины, имеющие все диапазоны L – от минимальных (1300 м) у петлеобразных до 6400 м у больших сегментных излучин (с пре-

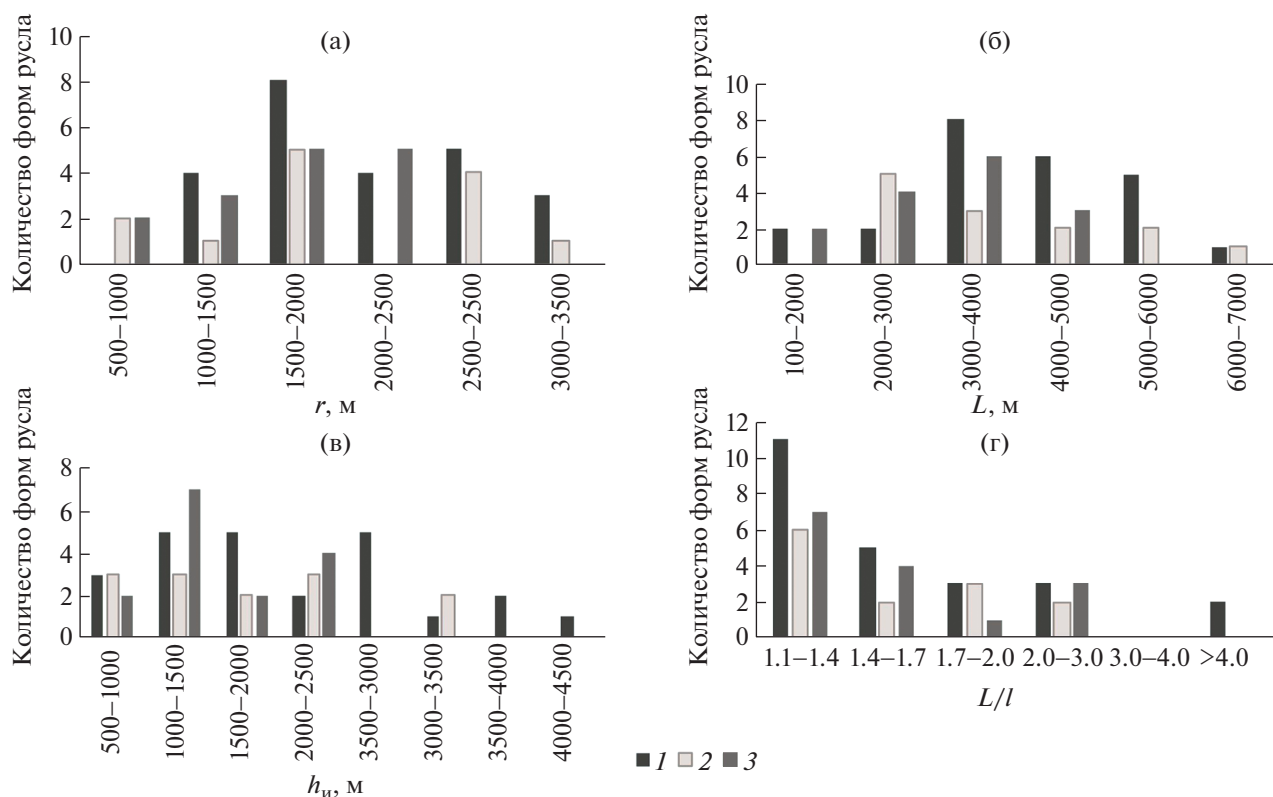


Рис. 3. Гистограммы распределения морфологических параметров свободных излучин и рукавов русловых разветвлений нижнего Иртыша: (а) – по радиусу кривизны (r , м), (б) – шагу (L , м), (в) – стреле прогиба (h_n , м), (г) – степени развитости (l/L). 1 – верхний участок (666.5–312 км), 2 – средний участок (312–106 км), 3 – нижний участок (106–0 км).

Fig. 3. Histograms of the distribution of morphological parameters of free bends and arms of the channel branches of the lower Irtysh: (a) – along the radius of curvature (r , m), (б) – step (L , m), (в) – deflection arrow (h_n , m), (г) – degree of development (l/L). 1 – upper section (666.5–312 km), 2 – middle section (312–106 km), 3 – lower section (106–0 km).

обладанием L 3000–4000 м, а также со значительной долей L = 4000–6000 м) (рис. 3 (б)). Ниже по течению, на втором участке, чаще всего распространены формы русла с L от 2000–3000 м, в остальных диапазонах доля излучин снижается по сравнению с первым участком, а с $L < 2000$ м отсутствуют. Для последнего, третьего, участка характерно преобладание излучин с шагом от 3000 до 4000 м, но исчезают с $L > 5000$ м.

Для первого участка характерно распространение форм русла со стрелой прогиба (h_n , м) во всех диапазонах (преобладают h_n – 1000–2000 и 2500–3000 м) ввиду большого разнообразия видов излучин (рис. 3 (в)). На втором участке значения h_n снижаются; преобладающими формами русла становятся с h_n от 500 до 1500 м, а также в диапазоне 2000–2500 м; излучины с $h_n > 2500$ м не встречаются. На последнем, третьем участке, преобладают излучины со стрелой прогиба от 1000–1500 м, тогда как $h_n > 2500$ м отсутствуют.

Для всего нижнего Иртыша характерно преобладание пологих излучин ($l/L = 1.1–1.4$) (рис. 3 (г)), доля которых несколько снижается вниз по тече-

нию. На первом участке при большом разнообразии типов излучин отмечается практически весь спектр степени развитости (кроме $l/L = 3.0–4.0$). Ниже по течению формы русла с $l/L > 3.0$ исчезают.

Нижний Иртыш характеризуется активным развитием горизонтальных русловых деформаций, ярким проявлением которых являются размывы берегов, приводящие к количественным изменениям параметров излучин русла и излучин рукавов разветвлений. От слияния с р. Тоболом до устья происходит в целом увеличение скоростей размыва берегов вниз по течению, что согласуется с постепенным увеличением водности реки вниз по течению (рис. 4).

Изменение скоростей размыва берегов по выделенным участкам нижнего Иртыша согласуется с изменением параметров форм русла вниз по течению. На первом участке (666.5–312 км) средняя скорость размыва берегов составляет 1.3 м/год, среднемаксимальная – 11.9 м/год; на втором участке (312–106 км) – 1.9 и 13.0 м/год соответственно; на третьем – 5.5 и 17.2 м/год. Для первых двух участков характерно наличие двух пиков

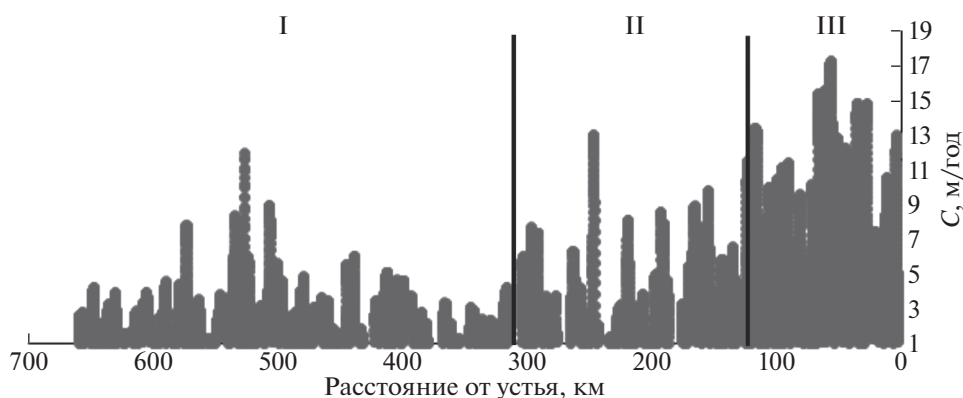


Рис. 4. Скорости размыва берегов по длине нижнего Иртыша (от слияния с Тоболом до устья). I — верхний участок (666.5–312 км), II — средний участок (312–106 км), III — нижний участок (106–0 км).

Fig. 4. The speed of erosion of the banks along the length of the lower Irtysh (from the confluence with the Tobol to the mouth). I — upper section (666.5–312 km), II — middle section (312–106 km), III — lower section (106–0 km).

скоростей размыва берегов, которые приурочены, в первом случае, к Укинской прорванной излучине (511.5–496 км) (размыв по всей длине излучины, а также оголовка острова, осложняющего ее верхнее крыло), во втором — к активно развивающейся излучине (спрямляющего рукава) в прорванной излучине Старый Иртыш (235–231 км).

Почти половина береговой линии (41.8% или 215.5 км) размывается на свободных излучинах. На них фронты размыва приурочены к выпуклым берегам на верхних крыльях и вогнутым берегам на нижних крыльях или их привершинным частям (Чалов др., 2004). У вынужденных излучин протяженность размыва берегов минимальна — 10.1 км (21.5% суммарной длины берегов), что обусловлено сложением их берегов трудно размываемыми отложениями. Прямолинейные участки русла характеризуются размывом 23.4% общей протяженности их берегов (295 км). Размывы берегов в прямолинейном русле происходят в тех местах, где стрежень потока, огибая побочни, прижимается к ним. В разветвлениях размывается от 25.4 до 28.3% протяженности береговой линии. В одиночных разветвлениях рукава представляют собой излучины русла с соответствующим распределением поля скоростей течения и положения зон размыва берегов и аккумуляции наносов. Причем основные размывы берегов сосредоточены в более многоводных рукавах; в параллельно-рукавном разветвлении, в котором оба рукава равнозначимы по водности (Чалов, 2017); размывы берегов (скорости и протяженность фронтов размыва) одинаковы в обоих рукавах.

Средние скорости размыва берегов в русле разного типа изменяются от 1.5–1.8 до 3.9–4.3 м/год. Самая высокая максимальная скорость размыва за 1987–2020 гг. была зафиксирована на свободной излучине (55–50 км) — 17.2 м/год, наимень-

шая (5.2 м/год) — в одностороннем разветвлении на 161.5–157 км.

Многочисленные переформирования русла нижнего Иртыша заключаются в преимущественно продольном смещении излучин, в ходе которого размывы вогнутых берегов в нижних их крыльях сопровождаются формированием побочней у противоположных выпуклых; одновременно происходит поперечное смещение вследствие размывов берегов в привершинной части излучины, частично захватывающей верхнее крыло. В результате со временем излучины искривляются и уменьшаются их r и L , растет степень развитости l/L . На излучинах, у которых $l/L > 1.4$ в привершинных частях формируются острова, отделенные от шпоры излучины протоками, спрямляющими излучины (рис. 2 (з)). Водность этих проток иногда достигает 10–15%. Еще более эффективны разветвления, возникающие в привершинных частях крутых синусоидальных излучин (рис. 2 (ж)), но спрямляющиеся обычно маловодными протоками.

Наиболее серьезные переформирования связаны со спрямленной Укинской петлеобразной излучиной (рис. 5), которая спрямилась в 2019 г., и обмелением правого и левого рукавов в Тугаловском параллельно-рукавном разветвлении русла из-за надвижения с вышележащего участка на узел разветвления лево- и правобережных побочней. Полный цикл таких изменений (при колебании водности рукавов в пределах 40–60%) соответствует 40–50 лет. Помимо Укинской излучины спрямления ожидаются через 40–50 лет на двух других петлеобразных излучинах (при встречном размыве берегов на крыльях в среднем 3.1 и 4.4 м/год и современной ширине перешейка между ними 550 м).

В XX веке на нижнем Иртыше образовались две прорванные излучины (Старый Иртыш и Со-

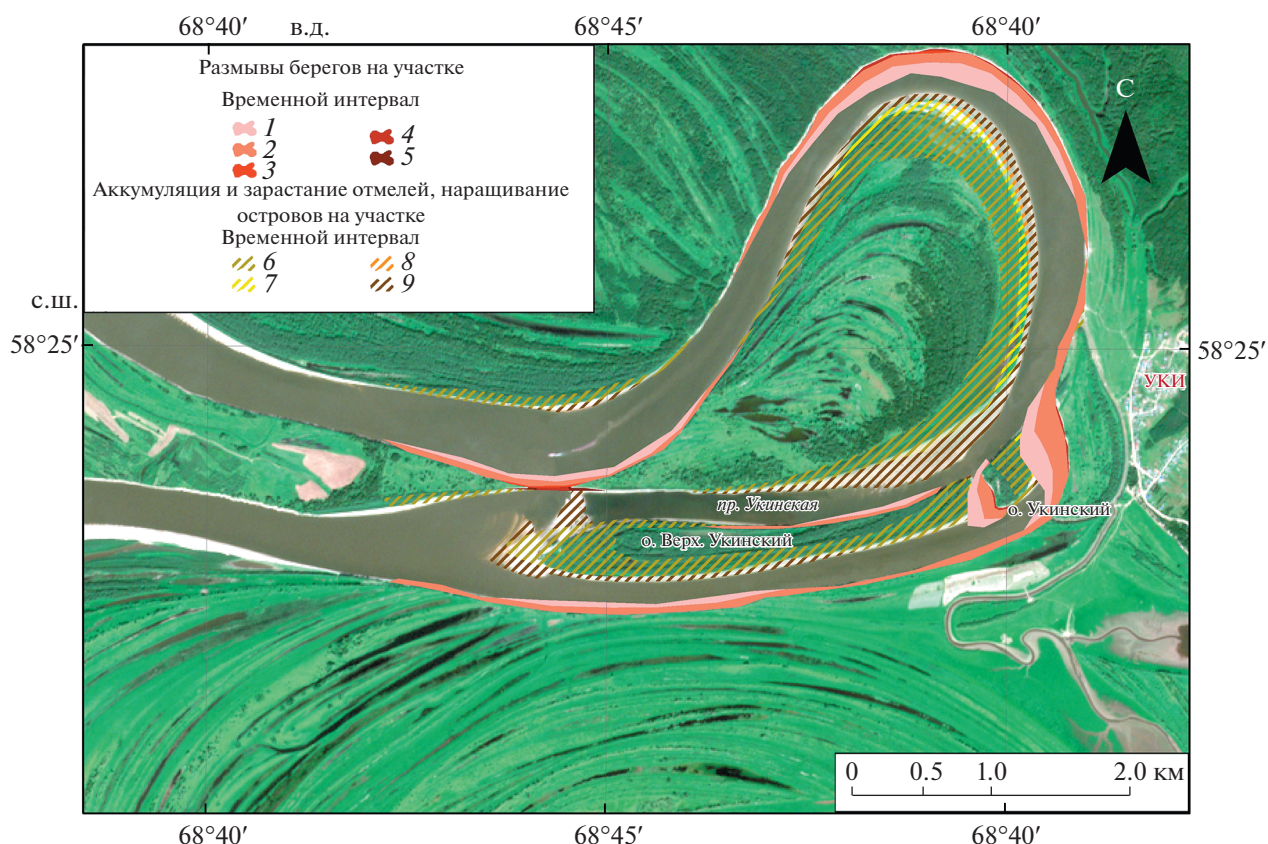


Рис. 5. Укинская излучина (510–498 км). Временные интервалы размыва берегов, годы: 1 – 1987–2001, 2 – 2001–2017, 3 – 2017–2018, 4 – 2018–2019, 5 – 2019–2020; аккумуляции: 6 – 1987–2001, 7 – 2001–2017, 8 – 2017–2018, 9 – 2019–2020.

Fig. 5. Ukinskaya bend (510–498 km). Time intervals of coastal erosion, years: 1 – 1987–2001, 2 – 2001–2017, 3 – 2017–2018, 4 – 2018–2019, 5 – 2019–2020; accumulations: 6 – 1987–2001, 7 – 2001–2017, 8 – 2017–2018, 9 – 2019–2020.

гом), в которых старые русла в настоящее время (2020-е годы) либо превратились в пойменные ложбины со старичными озерами (Согомская излучина), либо сохранились в виде маловодных рукавов (Старый Иртыш, 20% общего расхода воды). В спрямляющих излучины рукавах формируются новые излучины, причем в новом рукаве Староиртышской уже образовался остров, протока за которым забирает 12% расхода воды и активно развивается (l/L излучины – 1.25).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По условиям формирования русла нижний Иртыш (от слияния с р. Тобол до устья) разделяется на три участка, отличающиеся расширением поймы, взаимодействием русла с коренными бортами долины, ростом водности из-за впадения притоков, распространением морфодинамических типов русла и изменением их параметров. Верхний участок характеризуется относительно суженной поймой, распространением “больших” излучин с наибольшими величинами параметров излучин, которые своими вершинами касаются

противоположных бортов долины, и одиночных разветвлений; ширина пояса меандрирования соизмерима с шириной дна долины. На втором участке при постепенном расширении дна долины русло тяготеет к правому коренному берегу, преобладают вынужденные и вписанные излучины. На третьем участке с наибольшей шириной поймы пояс меандрирования занимает в основном центральную часть дна долины. Появляются пойменные протоки (ответвления), что приводит к снижению удельного руслоформирующего расхода воды, проходящего во время полового (при затопленной пойме).

При преобладании на нижнем Иртыше извилистого (меандрирующего) русла почти четверть длины приходится на относительно прямолинейные участки. Оба типа русла часто осложнены разветвлениями, образующимися в привершинных частях и на крыльях излучин, на прямолинейных участках – односторонние прибрежные разветвления. Вместе с разветвлениями, связанными с образованием прорванных излучин, распространены одиночные, односторонние и параллельно-рукавные.

Растекание потока в половодье по пойме и его отвлечение в пойменные протоки приводят к снижению вниз по течению значений параметров форм русла (излучин, островов).

В нижнем течении Иртыша горизонтальные русловые деформации характеризуются высокими темпами размыва берегов, возрастающими вниз по течению (средние — с 1.3 до 5.5 м/год, среднемаксимальные — с 11.9 до 17.2 м/год) и приводящими к изменению параметров излучин, продольному и поперечному их смещению. Развитие спрямляющих проток и образование провальных излучин, перестроения рукавов русловых разветвлений наиболее активны на свободных излучинах и излучинах одиночных разветвлений, для которых характерны наибольшие скорости и протяженность фронтов размыва берегов.

Полученные данные, по существу, впервые дают морфодинамическую характеристику русла нижнего Иртыша, которая является основой для разработки рекомендаций по управлению русловыми процессами при водохозяйственном и транспортном освоении реки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выполнено по планам НИР (госзадание) кафедры гидрологии суши (№ 121051400038-10) и НИЛаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051100166-А) (исходные материалы, классификация) при финансовой поддержке РНФ (проекты № 18-17-00086 и № 18-17-00086 П — натурные исследования, русловой анализ) и РФФИ (проект № 20-35-90003\20 — размывы берегов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов Н.В. Отчет по изучению экзогенных геологических процессов в районе городов Тюмени, Тоболь-

ска и Нижневартовска за 1994 год. Тюмень: ТКГРЭ, 1995. 138 с.

Боровков С.В. Инженерное регулирование русла реки Иртыш в районе г. Ханты-Мансийска // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2010. № 2 (6). С. 167–171.

Воскресенский С.С. Геоморфология СССР. М.: Высш. школа, 1968. 368 с.

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

Дегтярев В.В. Улучшение судоходных условий сибирских рек. М.: Транспорт, 1987. 176 с.

Завадский А.С., Чалов С.Р., Чернов А.В., Головлев П.П., Морейдо В.М., Беляков П.А. Морфодинамика русел и баланс наносов рек бассейна Селенги (Монголия–Россия) // Эрозия почв и русловых процессов. Вып. 21. М.: Географ. ф-т МГУ, 2019. С. 149–170.

Завадский А.С., Чалов Р.С. Региональный анализ свободного меандрирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1997. № 3. С. 32–36.

Земцов А.А. Геоморфология Западно-Сибирской равнины (северная и центральная части). Томск: Изд-во ТГУ, 1976. 344 с.

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

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.

Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М, 2017. 569 с.

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

Чалов Р.С., Зайцев А.А., Чернов А.В., Лодина Р.В., Беркович К.М., Алексеевский Н.И., Евстигнеев В.М. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР). М.: Геогр. ф-т МГУ, 1994. 336 с.

MORPHODYNAMIC TYPES OF THE LOWER IRTYSH

A. A. Kurakova^a and R. S. Chalov^{a, #}

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[#]E-mail: rschalov@mail.ru

Despite its economic importance, the Lower Irtysh has not yet been sufficiently investigation. The first analysis of the channel formation conditions and its morphology is completed for the Lower Irtysh valley (from the confluence with the Tobol River to the mouth). The Lower Irtysh is characterized as a meandering channel. The valley is divided into three sections based on its geomorphological structure, bedrock, and changes in water discharge due to the confluence with tributaries. The upper reach of the valley includes a narrow floodplain, and a meander belt at the bottom, with meanders touching opposite sides of the valley. The second section of the valley becomes wider, and the channel sifts to its right side. The type of meanders changes to controlled and incised meanders in this section of the valley. The thirds section includes wide floodplain with channels, and meander belt located in the middle part of valley bottom. Flood discharges in the main

stream decrease in the lower section of the valley due to diversion of the runoff to floodplain channels and dispersing of the flow to the floodplain during high water. Free meanders are branching at the head of bends and along the limbs forming the second-order streams. The morphological parameters of free bends and arms of branches decrease downstream, which is due to the expansion of the valley bottom, diversion of part of the water runoff to the floodplain channels. The Lower Irtysh has high rates of river banks erosion, increasing downstream and leading to a change in the morphological parameters of the channel shapes. The results are important for the water management and water transport development of the river.

Keywords: channel processes, river bends, branches, riverbank erosion

ACKNOWLEDGEMENTS

The paper is prepared according to the plan of scientific research of the Department of Land Hydrology (No. 121051400038-10) and the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes (No. 121051100166-A) with financial support of the Russian Science Foundation (No. 18-17-00086 and No. 18-17-00086 П) and Russian Foundation of Basic Research (No. 20-35-90003\20).

REFERENCES

- Belov N.V. *Otchet po izucheniyu ekzogennykh geologicheskikh protsessov v raione gorodov Tyumeni, Tobolska i Nizhnevartovska za 1994 god* (Report on the study of exogenous geological processes in the area of the cities of Tyumen, Tobolsk and Nizhnevartovsk for 1994). Tyumen: TKGRE (Publ.), 1995. 138 p.
- Borovkov S.V. Engineering regulation of the Irtysh river bed in the area of Khanty-Mansiysk. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2010. No. 2 (6). P. 167–171. (in Russ.)
- Chalov R.S., Kamyshev A.A., Zavadsky A.S., and Kurakova A.A. 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*. 2021. No. 2. P. 92–102. (in Russ.)
- Chalov R.S. *Ruslovyte protsessy (ruslovedenie)* (Channel processes (channel science)). M.: INFRA-M (Publ.), 2017. 569 p. (in Russ.)
- Chalov R.S., Zaitsev A.A., Chernov A.V., Lodina R.V., Berkovich K.M., Alekseevsky N.I., and Evstigneev V.M. *Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii (v predelakh byvshego SSSR)* (Channel regime of the rivers of Northern Eurasia (within the former USSR)). M.: Geogr. f-t MGU (Publ.), 1994. 336 p. (in Russ.)
- Chalov R.S., Zavadskii A.S., and Panin A.V. *Rechnye izluchiny* (River meanders). M.: MGU (Publ.), 2004. 371 p. (in Russ.)
- Degtyarev V.V. *Uluchshenie sudokhodnykh uslovii sibirskikh rek* (Improving the navigable conditions of Siberian rivers). M.: Transport (Publ.), 1987. 176 p. (in Russ.)
- Gerasimova A.S. Modern geological processes in the valleys of the lower reaches of the Ob and Irtysh rivers. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. Biologiya, pochvovedenie, geologiya, geografiya*. 1959. No. 2. P. 103–111. (in Russ.)
- Petrov I.B. *Ob'-Irtyshskaya poima (tipizatsiya i kachestvennaya otsenka zemel')* (Ob-Irtysh floodplain (typification and qualitative assessment of lands)). Novosibirsk: Nauka (Publ.), 1979. 136 p. (in Russ.)
- Voskresenskii S.S. *Geomorfologiya SSSR* (Geomorphology of the USSR). M.: Vyssh. Shkola (Publ.), 1968. 368 p. (in Russ.)
- Zavadskii A.S., Chalov S.R., Chernov A.V., Golovlev P.P., Moreido V.M., and Belyakov P.A. Morphodynamics of channels and sediment balance of rivers in the Selenga basin (Mongolia-Russia). *Eroziya pochv i ruslovyte protsessy*. Vol. 12. M.: MGU (Publ.), 2019. P. 149–170. (in Russ.)
- Zavadskii A.S. and Chalov R.S. Free meandering regional analysis. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 1997. No. 3. P. 32–36. (in Russ.)
- Zemtsov A.A. *Geomorfologiya Zapadno-Sibirskoi ravniny (severnaya i tsentral'naya chasti)* (Geomorphology of the West Siberian Plain (northern and central parts)). Tomsk: TGU (Publ.), 1976. 344 p. (in Russ.)