

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ МОРФОДИНАМИКИ РАЗВЕТВЛЕННОГО РУСЛА СРЕДНЕГО ИРТЫША

Р.С. Чалов¹, Г.Б. Голубцов², А.С. Завадский³, А.А. Куракова⁴

^{1–4}Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹Кафедра гидрологии суши, проф., д-р геогр. наук; e-mail: rschalov@mail.ru

²Лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, вед. инженер, канд. геогр. наук; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

³Лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: az200611@rambler.ru

⁴Лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

Впервые представлены результаты руслового анализа среднего Иртыша (от госграницы до г. Омска), который, несмотря на свое важное водохозяйственное и транспортное значение, до последнего времени оставался практически неизученной рекой в отношении русловых процессов. Особенностью русла Иртыша является несоответствие общепринятым представлениям о меандрировании средних и малых рек и преимущественном разветвлении на рукава больших и крупнейших рек. Было выявлено, что меандрирующее русло в пределах Казахстана сменяется разветвленным вплоть до г. Омска и ниже, а затем становясь уже крупнейшей рекой, Иртыш меандрирует, лишь осложняясь островами, возникающими на крыльях и в привершинных частях излучин. Определено, что на среднем Иртыше (госграница – г. Омск) смена геоморфологического типа русла по длине реки приводит к морфологическому усложнению разветвлений. Здесь широко распространены параллельно-рукавные разветвления, отличающиеся удлинённостью больших островов ($L_o/B_o \gg 3-4$) и прямолинейностью рукавов. Расположение русла вдоль правого ведущего коренного берега приводит к образованию разветвлений ниже его выступов и неровностей, отклоняющих поток к противоположенному пойменному. Высокая антропогенная нагрузка на реке (регулирование стока и перехват наносов водохранилищами, разработка карьеров, строительство дамб) привела к врезанию русла, трансформации разветвлений, а также в одних случаях к отмиранию и обмелению маловодных рукавов, в других – развитию рукавов и рассредоточению стока. Вызванные изменения русла Иртыша приводят к ухудшению и усложнению эксплуатации водного пути и водохозяйственного освоения реки.

Ключевые слова: русловые процессы, разветвления, излучины, размывы берегов, антропогенное воздействие, критерий Карасева

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.10

ВВЕДЕНИЕ

Общепринятым считается, что большие и крупнейшие реки, как правило, имеют разветвленное на рукава русло, средние и тем более малые – меандрируют. М.А. Великанов утверждал, что «чем больше река по своим размерам, тем больше вероятность возникновения в ней разветвления струй и образование не одной, а двух (а иногда и трех) динамических осей» [1958, с. 27], и «при возрастании ширины, поток имеет все большие и большие возможности для своего динамического раздвоения... в реках-гигантах... мы чаще встречаем разбитый, чем сосредоточенный поток» [1958, с. 29]. Эти представления подтверждаются критерием квазиоднородности потока И.Ф. Карасева [1975]:

$$\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\frac{2g}{C^2}},$$

где b_p и h – ширина и глубина реки, C – коэффициент Шези, зависящий от шероховатости русла, согласно которому при значениях $\Theta > 9,5$ поток разделяется на две и более ветвей течения. По существу это вытекает из анализа условия развития русел в трудах Н.И. Маккавеева [1955], Н.А. Ржаницына [1985] Д.Л. Росгена [Rosgen, 1994], Л.Б. Леопольда и М.Г. Вольмана [Leopold, Wolman, 1957], С.А. Шумма [Schumm, 1977], А.Д. Книгтона [Nanson, Knighton, 1996].

В действительности при сохранении в общих чертах этой тенденции (чем больше река, шире русло и больше соотношение b_p/h , тем больше вероятность разветвления на рукава) наблюдается слож-

ная картина чередования по длине рек от верхнего течения к низовьям меандрирования, разветвлений и относительно прямолинейного неразветвленного русла. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации по русловым процессам на больших и крупнейших реках [Водные пути..., 1995; Русловые процессы..., 2001, 2012]. К.М. Беркович [2004] показал, что критерий И.Ф. Карасева находится в обратной зависимости от устойчивости русла: чем больше число Лохтина – Л (более устойчиво русло), тем меньше величина Θ .

Пример подобного несоответствия дает р. Иртыш, русло которого меандрирует в пределах Казахстана [Бурлибаев и др., 2014], затем, не принимая притоков и не увеличивая водность, от госграницы и до г. Омска (в г. Омске первый небольшой приток – р. Омь) разветвляется на рукава, а от устья р. Тары до слияния с Обью вновь меандрирует, лишь осложняясь островами, возникающими на крыльях и в привершинных частях излучин. При этом Иртыш, несмотря на свое большое водохозяйственное и транспортное значение, в отношении русловых процессов до последнего времени оставался практически неизученным, а почти 300-километровый участок разветвленного русла лишь вскользь упоминается в общих описаниях реки [Давыдов, 1955]. В существующих публикациях содержатся сведения о размывах берегов [Герасимова, 1959; Петров, 1979] и выправительных работах на водных путях [Дегтярев, 1987]. Приводятся некоторые гидроморфологические зависимости для излучин русла [Гендельман, 1988; Завадский, 2001], но вне связи с русловым режимом реки и касаются лишь русла ниже г. Омска, где река меандрирует, а разветвления русла выше города упоминаются только в статье [Диденко, Орлович-Грудков, 1969] в связи с разработкой русловых карьеров стройматериалов и их влияния на уровенный режим. Лишь в последние годы появились первые публикации, в которых дается характеристика условий и форм проявления русловых процессов на среднем (ниже г. Омска) и нижнем Иртыше [Чалов и др., 2023а].

Средний Иртыш в районе г. Омска подвержен интенсивным антропогенным воздействиям – от массовой разработки карьеров песчано-гравийных стройматериалов, начавшейся в 1960-е гг., до мостовых переходов, дамб, полузапруд и других гидротехнических объектов, городских набережных и т. д. Ежегодно на участке с разветвленным руслом выполняются дноуглубительные работы для обеспечения судоходства (до 300–400 тыс. м³/год). Все это на фоне регулирования стока каскадом из трех гидроузлов в казахстанской части, функционирующих с советских времен. Такой антропогенный пресс сказывается в морфологии и динамике русла,

его трансформациях, нередко имеющих негативные последствия для экологического состояния реки и использования ее ресурсов.

Задача статьи, во-первых, впервые дать анализ условий формирования русла и руслового режима среднего течения Иртыша в условиях интенсивной хозяйственной деятельности на реке; во-вторых, провести гидролого-морфологический анализ разветвленного русла. Его сопоставление с разветвлениями на других больших реках позволит подойти к выявлению условий формирования разветвлений русла в среднем течении и сменой их меандрированием вниз по реке с увеличением водоносности и морфометрических характеристик. Решение этой задачи имеет значение при разработке проектов водохозяйственного и транспортного использования реки.

Объект исследования и его общая характеристика. В среднем течении Иртыш выходит из Тургайского плато в пределы Западно-Сибирской равнины, пересекая западную окраину Барабинской степи. Широкопойменное русло сменяется адаптированным ($B_n/b_p = 2-3$, здесь B_n – ширина поймы, b_p – ширина русла) и врезанным, занимающим нижнюю часть участка ($B_n < b_p$).

Среднегодовой расход воды по г. п. Омск – 893 м³/с, максимальный – 6340 м³/с, средняя величина максимальных расходов воды – 2770 м³/с. Минимальный наблюдаемый расход воды в безледный период – 344 м³/с, в зимний – 110 м³/с. Характерным для режима стока р. Иртыша являются высокое весеннее половодье (50–65% от годового стока), низкая летняя межень, прерываемая дождевыми паводками, и устойчивая продолжительная зимняя межень. Дождевые паводки кратковременны и невысоки. Ледоход проходит на подъеме уровней, максимальные уровни при ледоходе соответствуют максимально наблюдаемым.

В настоящее время естественный водный режим р. Иртыша искажен работой гидротехнических сооружений в верхнем течении (в Китае на р. Черный Иртыш – каскад из пяти водохранилищ, в Казахстане – три водохранилища, нижнее из которых – Шульбинское – было заполнено к 1988 г.). После сооружения гидроузлов осредненный за многолетие максимальный годовой уровень снизился в сравнении с естественным на 36% [Волковская, 2017]. В 2000-е гг. максимальный уровень воды в районе г. Омска не превышал 6,3 м над меженным, что недостаточно для полного затопления островов. Санитарные пуски Шульбинского гидроузла не обеспечивают затопление высокой поймы, которое при естественном гидрологическом режиме было регулярным (1 раз в 3–10 лет), уровни поднимались на 7,5–9 м, полностью затапливая пойму.

Ввод в эксплуатацию Иртышских гидроузлов привел к снижению годового стока воды и, главное, уровней. Причины последнего не только в отъеме части стока и изменении водности реки, но и во врезании реки в нижнем бьефе Шульбинского водохранилища. Анализ кривых связи расходов и уровней по г. п. Омск, казалось бы, подтверждает данное предположение – понижение кривых $Q = f(H)$ с 1964 по 1984 г. свидетельствует об этом (рис. 1). Однако ввод в эксплуатацию гидроузлов совпал с началом массовой разработки карьеров в районе г. Омска, что являлось основным фактором понижения уровней воды [Диденко, Орлович-Грудков, 1969; Дегтярев, 1968]. Большое же расстояние от нижнего гидроузла до российской части реки не позволило проявиться здесь процессам врезания. Более того, продукты размыва русла ниже гидроузла аккумулируются ниже по течению, и волна аккумуляции наносов распространяется вниз по реке [Транспортное..., 1973]. Поэтому в 1984–2008 гг. врезание сначала замедлилось, а затем сменилось аккумуляцией наносов, подтверждением чего является стабилизация минимальных уровней воды в этот период. После 2008 г. понижение уровней возобновилось и имеет темп до 7 см/год, но это связано с активной добычей аллювия в реке, дноуглубительными работами для обеспечения судоходства и врезанием русла при его стеснении дамбами в черте города, где находится гидрологический пост, и выше по течению.

Русло среднего Иртыша почти на всем участке от госграницы до г. Омска разветвленное, причем разветвления осложняют свободные излуины в его начале и врезанные в нижней части. Неразветвленное прямолинейное русло встречается в виде коротких отрезков вдоль коренных берегов.

Массовая разработка карьеров (она сопровождается врезанием реки) явилась основной причиной понижения уклонов (до 0,02–0,03‰) и относительно высокой крупности руслообразующих наносов. Последние в основных рукавах и относительно прямолинейном неразветвленном русле представлены средне- и средне-крупнозернистыми песками с примесью гравия, причем прослеживается прямая связь положения динамической оси потока и крупности наносов (увеличение ее в стрежневых зонах). Наносы с большей крупностью характерны для основных рукавов одиночных разветвлений, в то время как в рукавах параллельно-рукавных и прибрежных разветвлений наибольшая их крупность присуща стрежневым зонам потока в узлах разветвлений. Укрупнение наносов в несудоходных рукавах связано с разработкой в них карьеров, обеспечивающих их развитие и увеличение водности. По длине участка наблюдается увеличение средней крупности, отражая все большую антропогенную нагрузку (разработку карьеров и перекрытие несудоходных рукавов дамбами) и смену широкопойменного русла врезанным (вплоть до преобладания гравия в черте г. Омска).

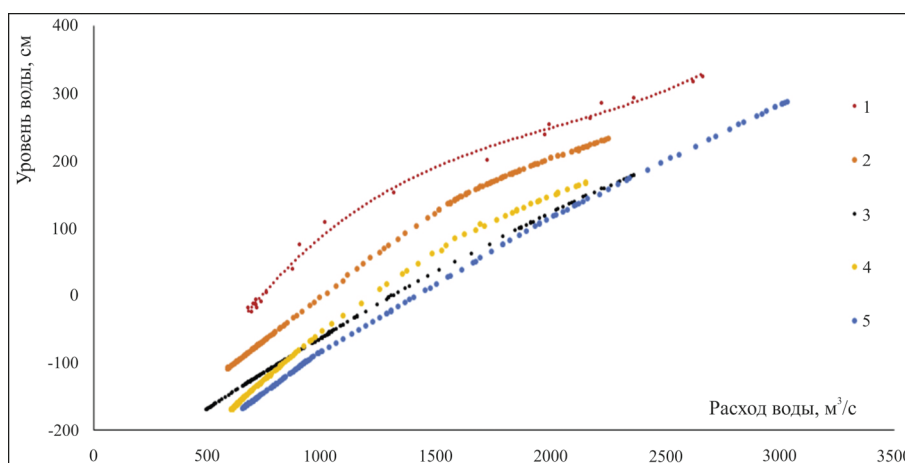


Рис. 1. Многолетние изменения уровней воды Иртыша по графикам $Q = f(H)$ для г. п. Омск: 1 – 1964 г.; 2 – 1975 г.; 3 – 1984 г.; 4 – 2008 г.; 5 – 2020 г.

Fig. 1. Long-term changes in water levels on the Irtysh River according to combined communication graphs $Q = f(H)$ for the Omsk urban settlement: 1 – 1964; 2 – 1975; 3 – 1984; 4 – 2008; 5 – 2020

Сравнительно небольшие уклоны при относительно высокой крупности песчаных с примесью гравия наносов обусловило высокие значения показателей устойчивости русла (числа Лохтина),

которое возрастает вниз по течению: 10,3–19,9 в верхней части участка (широкопойменное русло), 18,7–20,7 в средней (адаптированное русло) и 28,6–31,3 (врезанное), соответствуя в то же время

увеличению антропогенной нагрузки. Эти значения завышены относительно принятой классификации русел в 2,5–3 раза (по сопоставлению приведенных в ней данных об интенсивности русловых деформаций с полученными на Иртыше), т. к. основываются не на грунтовой съемке русла, а на единичных пробах донных отложений в стречневых зонах русла и основных рукавов. Учитывая это, русло среднего Иртыша относится к слабо- и относительно устойчивому.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основу анализа условий формирования русла и руслового режима среднего Иртыша составили данные обследования русла в июне 2023 г., карты русла (бывшие лоцманские), изданные в 1966, 1970, 1989, 2015 гг., зафиксировавшие состояние русла на соответствующие временные срезы, планы русла, составленные изыскательскими партиями Омского района водных путей в период 2018–2023 гг., а также космические снимки и другие картографические, литературные и фондовые материалы. Методика ретроспективного руслового анализа, методы натурных русловых исследований и прогнозных оценок русловых деформаций с учетом антропогенного вмешательства в жизнь рек детально изложены во многих публикациях [Русловые процессы..., 2001, 2012; Чалов и др., 2023а, 2023б].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По геолого-геоморфологическим условиям русло среднего Иртыша (от госграницы до г. Омска) делится на три части: верхнюю (97 км) – широкопойменное русло с преимущественно односторонней (левобережной) поймой и лишь на коротком участке с развитыми излучинами – двусторонней поймой при ее относительной ширине $B_{\Pi}/b_p = 3,1\text{--}7,0$; среднюю (64 км) – адаптированное русло с $B_{\Pi}/b_p = 1,7\text{--}2,0$ (пойма левобережная, кроме небольших правобережных фрагментов ниже изгибов правого коренного берега); нижнюю (57 км) – врезанное русло с узкой поймой ($B_{\Pi}/b_p = 0,5\text{--}1,0$) и только там, где в XX в. дамбы и полузапруды перекрыли рукава в односторонних разветвлениях, а острова причленились к береговой пойме, B_{Π}/b_p составляет 1,1–1,3.

По всей реке преобладают разветвления, образованные различными по размерам, но преимущественно средними и большими островами. Прямолinéйнное неразветвленное русло, располагаясь вдоль правого коренного берега, образует морфологически однородный участок только на нижних 36 км широкопойменного русла, осложненный двумя одиночными малыми разветвлениями – большим о. Рытовским и двумя односторонними разветв-

лениями общей длиной 6,4 км (во врезанном русле – 10 км). На последнем прямолинейность русла создана перекрытием дамбами рукавов у о-вов Падинских. Разветвление у о. Верх. Черемушкинского искусственно поддерживается разработкой подхода к водозабору на правом коренном берегу. В основном оно образует короткие «вставки» между разветвлениями и врезанными излучинами, составляя в сумме 31% от длины участка (из 234 км). Самые короткие из них – 1,5–2 км, самые длинные – 8,5 км, осложненные осередковыми разветвлениями, и 7,5 км, но образованное перекрытием дамбами рукавов в бывших чередующихся односторонних разветвлениях. Всего в настоящее время на среднем Иртыше (от госграницы до г. Омска) выделяется 11 морфологически однородных участков: семь участков характеризуется абсолютным преобладанием разветвлений – одиночных, односторонних и чередующихся односторонних, прибрежных второстепенных и параллельно-рукавных (рис. 2А); один длиной 13,5 км представлен тремя свободными излучинами (см. рис. 2Б), один – вписанной и обтекающей излучинами (см. рис. 2В) с правым коренным берегом (широкопойменное русло) и один длиной 51 км – тремя большими врезанными излучинами (см. рис. 2Г), разделенными прямолинейными «вставками» длиной 6,2 км, осложненными одиночными и прибрежными разветвлениями на крыльях, в привершинных частях и на «вставках», и два – относительно прямолинейным неразветвленным руслом (табл. 1).

Анализ приведенных данных показывает, что для широкопойменного русла свойственны одиночные, односторонние и чередующиеся односторонние разветвления, образующие морфологически однородные участки или встречающиеся в виде единичных форм в прямолинейном неразветвленном русле, в верхних крыльях и привершинной части одной из свободных (Малоатмасской), вписанной и обтекающей излучин; свободные излучины, образующие морфологически однородный участок – крутые, вписанная, обтекающая и следующая за ними свободная и вынужденная – пологие (табл. 2).

Расположенное ниже по течению адаптированное русло представлено параллельно-рукавными разветвлениями, занимающими почти половину длины участка (31 км). В середине XX в. его протяженность была на 9 км больше, но из-за перекрытия дамбой левого рукава у о. Содомного оно стало односторонним (ниже по течению – одиночным). Наоборот, Змеиные разветвления ранее были односторонними, но вследствие разработки в левом рукаве карьеров сейчас составляют верхнее звено параллельно-рукавных разветвлений в нижерасположенном врезанном русле, образованных

цепочкой о-вов Тамбовских, Молоканским и Безымянным (17,5 км). В 1960–1970-е гг. таковым было ныне одностороннее разветвление, образованное о-вами Безымянным и Усть-Заостровским (прекратило свое существование из-за перекрытия левого рукава дамбами).

Большую часть врезанного русла (46 из 73,5 км) составляют три врезанные большие излучины. Их параметры: верхняя (Карбышевская) – $r = 4200$ м, $L = 8550$ м, $l/L = 1,68$; средняя (Омская) – $r = 6100$ м,

$L = 12850$ м, $l/L = 1,49$; нижняя (Красногорская) – $r = 5600$ м, $L = 14300$ м, $l/L = 1,39$. Крылья смежных излучин разделены прямолинейными вставками по 5 и 3 км каждая. Все излучины на крыльях, в привершинных частях и на прямолинейных «вставках» осложнены односторонними и одиночными разветвлениями, многие из которых перекрыты дамбами и преобразованы в затоны, вследствие чего само русло, особенно на Омской излучине, утратило естественный облик.

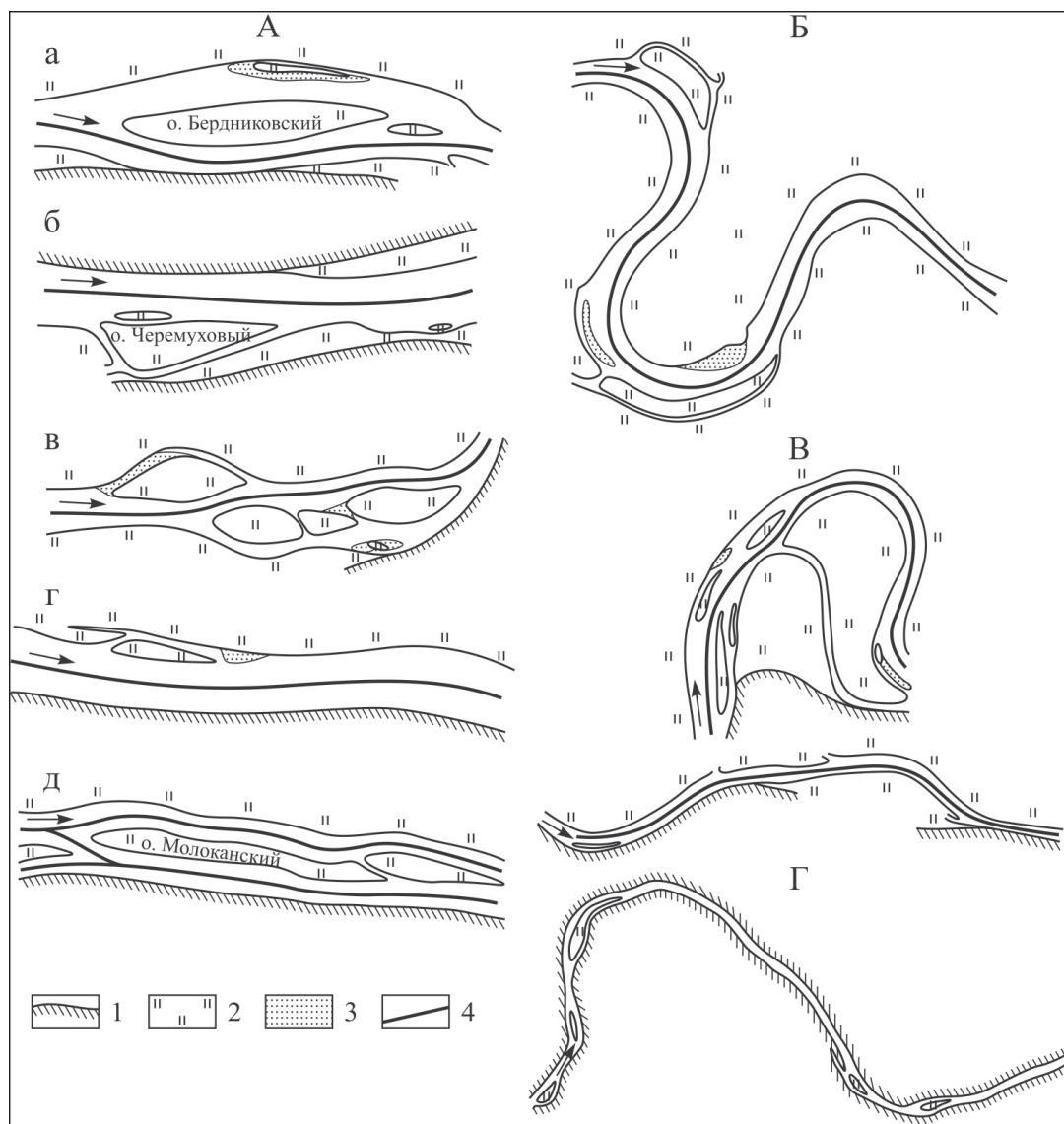


Рис. 2. Морфодинамические типы русла среднего Иртыша.

А – разветвления: а – одиночное (о. Бердниковский); б – одностороннее (о. Черемуховский); в – чередующиеся односторонние (Татарские – Булдыревские); г – прибрежное второстепенное (на 1977–1979 км); д – параллельно-рукавные (Тамбовские – Молоканское); Б – свободные излучины (Пальчуйевская, Щербекоевская); В – вписанная (Большеатмасская) и обтекающая (Черлакская) излучины; Г – врезанные (Карбышевская и Омская); 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – динамические оси потока

Fig. 2. Morphodynamic types of the middle Irtysh channel.

A – branches: a – single (Berdnikovskiy Island); б – one-sided (Cheremukhovskiy Island); в – alternating one-sided (Tatarsky-Buldyrevskiy); г – coastal secondary (at 1977–1979 km); д – parallel-branch (Tambov – Molokanskoye); Б – free meanders (Palchuevskaya, Scherbekovskaya); В – inscribed (Bolsheatmasskaya) and flowing around (Cherlaksкая) meanders; Г – embedded (Karbyshevskaya and Omskaya); 1 – valley bank; 2 – floodplain; 3 – riverbed shallows; 4 – dynamic flow axes

Таблица 1

Морфологически однородные участки русла среднего Иртыша (госграница – г. Омск)

№ п/п	Расстояние от устья, км	Тип русла	Кол-во форм русла (островов ¹ , излучин ²)	Устойчивость русла Л
<i>Широкопойменное русло (2048–1951 км)</i>				
1	2048–2019	Одиночные и чередующиеся односторонние разветвления	Острова – 11; прямолинейные «вставки» – 3	13,3–15,0
2	2019–2005,5	Свободные излучины (Малоатмасская – с прибрежными и одиночными разветвлениями, Пальчueвская, Щербековская)	Излучин – 3; островов – 4	14,0
3	2005,5–1987	Вписанная, обтекающая, пологие свободная и вынужденная излучины	Излучины – 4; острова – 4; прямолинейные «вставки» – 2	16,1
4	1987–1951	Прямолинейное неразветвленное с единичными односторонними и одиночными разветвлениями	Острова – 6	18,5–19,9
<i>Адаптированное русло (1951–1887 км)</i>				
5	1951–1935	Односторонние и одиночное разветвление (о. Бердниковский)	Острова – 6; прямолинейные «вставки» – 3	18,7
6	1935–1927	Параллельно-рукавные разветвления (Иртышское – Ильинское)	Острова – 2	24,5
7	1927–1909,5	Односторонние разветвления (о-ва Ниж. Покровский, Содомный и др.)	Острова – 5	18,5
8	1909,5–1887,5	Одностороннее (Бол. Содомное), одиночное и параллельно-рукавное (Бубновское – Змеиное) разветвления	Острова – 6; прямолинейные «вставки» – 2	17,8
<i>Врезанное русло (1887,5–1814 км)</i>				
9	1887,5–1870	Параллельно-рукавные (Тамбовские – Молоканские) и односторонние (Усть-Заостровские) разветвления	Острова – 8; прямолинейные «вставки» – 1	28,6–31,0
10	1870–1860	Прямолинейное неразветвленное русло с одиночным разветвлением (о. Верх. Черемушкинский)	Острова – 1	39
11	1860–1814	Пологие врезанные излучины, с одиночными и односторонними разветвлениями (антропогенно преобразованные)	Острова – 8; прямолинейные «вставки» – 2.	37,4–38

Примечания. ¹Указаны только острова, создающие разветвления русла без учета разветвлений второго порядка и прибрежных второстепенных разветвлений.

²Излучины только русла, определяющие его морфодинамический тип.

Таблица 2

Параметры излучин широкопойменного русла среднего Иртыша

№ п/п	Излучина	Расстояние от устья, км	Параметры			
			<i>r</i> , м	<i>L</i> , м	<i>h_н</i> , м	<i>l/L</i>
1	Малоатмасская	2019–2012	1600	2800	2350	1,87
2	Пальчueвская	2012–2007,5	770	1800	940	2,27
3	Щербековская	2007,5–2005,5	650	1490	700	1,89
4	Большеатмасская (вписанная)	1999,7–1996,7	1480	3400	1080	1,58
5	Верх. Черлакская (обтекающая)	1996,7–1994	860	2550	1000	1,1
6	Среднечерлакская	1991–1988,5	870	2600	980	1,19
7	Черлакская (вынужденная)	1988,5–1986,5	620	3150	780	1,16

Примечание: *r* – радиус кривизны, *L* – шаг, *h_н* – стрела прогиба, *l/L* – степень развитости.

Таким образом, переход от широкопойменного русла к адаптированному и врезанному сопровождается усложнением разветвлений, которые здесь становятся преимущественно параллельно-рукавными. В отличие от слабо- или неустойчивых широкопойменных русел верхней Оби, средней и нижней Лены, на которых русла этого типа образованы небольшими островами, составляющими вытянутые вдоль реки архипелаги [Водные пути..., 1995], параллельно-рукавные разветвления среднего Иртыша сформированы большими удлиненными островами с соотношением $L_0/B_0 = 6,2\text{--}13,6$ (L_0 и B_0 – длина и ширина островов). Аналогичные параллельно-рукавные разветвления характерны для врезанных русел средней Лены (выше г. Покровска) на участке длиной 160 км [Водные пути..., 1995], были (до создания водохранилищ) на Ангаре [Чалов, Чалов, 2009], встречаются на нижней Сухоне [Рулева и др., 2010]. По-видимому, для врезанных относительно устойчивых русел больших и крупнейших рек, у которых критерий Θ при большой ширине русла превышает критические значения ($\Theta > 9,5$), поток разделяется на две ветви течения, между которыми формируются осередки, зарастающие и превращающиеся со временем в острова. Действительно, по данным измерения поля скоростей в разветвлениях среднего Иртыша, разделение потока на две стрежневые зоны начинается в 0,5–1 км выше узла разветвления русла (рис. 3А) и завершается намного ниже узла слияния рукавов (ухвостье островов), где критерий Θ становится ниже критического $\Theta < 9,5$ (табл. 3, № 1). Лишь в одностороннем разветвлении о. Ниж. Покровским (водность левого рукава всего 3,5%, в основном рукаве поток имеет две динамические оси $\Theta < 17,6$, между которыми сформировался длинный (более 3,5 км) подводный осередок (глубина на нем 0,8–1,4 м в низкую межень) (см. рис. 3Б, табл. 3, № 8). Выше по течению в прямолинейном русле Θ остается выше критического (14,3), проявляясь в изменении глубин в поперечном сечении русла (в 2015–2023 гг. здесь возникло два осередка). Очевидно, это – свидетельство происходящего здесь формирования параллельно-рукавного разветвления вместо существующего одностороннего.

Экстраполируя эти данные на другие участки русла, используя планы русла по съемке 2023 г. и карту 2015 г., можно полагать, что в перспективе произойдет образование нескольких новых одиночных разветвлений широкопойменного русла или увеличение их размеров, а в адаптированном и в врезанном (выше врезанных излучин) – удлинение и объединение в единую систему существующих параллельно-рукавных разветвлений. В частности, это может произойти с Иртышско-Ильинскими раз-

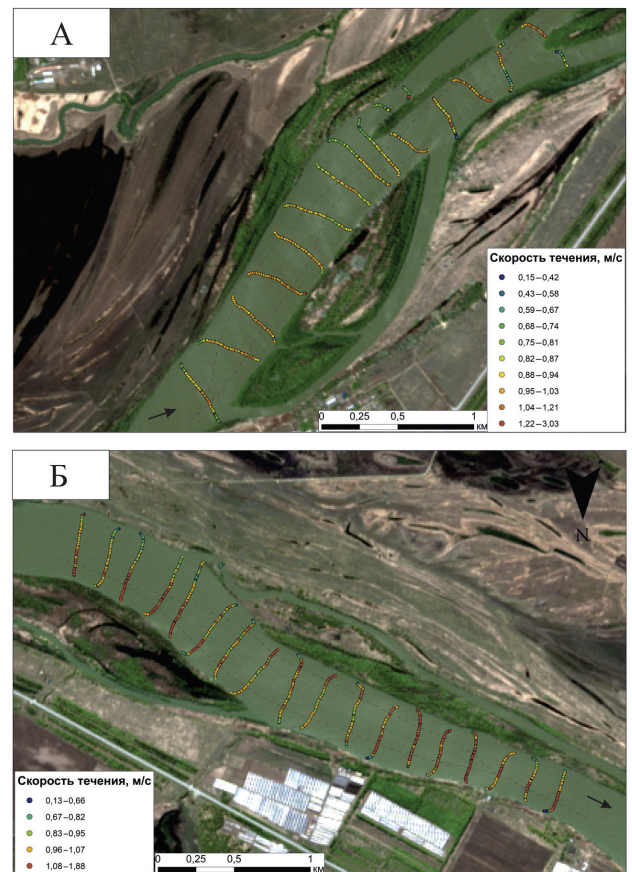


Рис. 3. Скоростные поля потока:

А – в Будырревском одностороннем разветвлении; Б – в правом рукаве Покровского одностороннего разветвления

Fig. 3. Velocity flow fields:

A – in the Buldyrevskoe one-sided branching; Б – in the right branch of the Pokrovsky one-sided branching

ветвлениями, звенья которых разделены 2-километровым прямолинейным неразветвленным руслом, в котором прослеживаются две ложбины вдоль левого и правого берегов с меньшими глубинами между ними (рис. 4). Новые параллельно-рукавные разветвления могут быть образованы в разделении потока на ветви течения в основном рукаве у о. Ниж. Покровского (см. рис. 3Б). Возможно объединение Змеинового и Тамбовского разветвлений, это, однако, длительный процесс, поскольку все отдели между ветвями течения – подводные даже в низкую межень.

Сопоставление разновременных карт реки 1966–1970 гг. и планов русла за последние пять лет показало, что в основном до 2015 г. (последняя карта реки) произошло существенное изменение морфологии русла, проявившееся в количестве островных и осередковых разветвлений. Число островов увеличилось почти в два раза к 2015 г. (с 56 до 101), но за последние годы уменьшилось более чем на 1/3 (до 74). Наоборот, количество обсыхающих в ме-

жень осередков уменьшилось почти в 2,5 раза (с 42 до 17), а на космоснимках и планах русла 2023 г. их вообще нет. Если 50 лет назад (1960–1970-е гг.) русло изобиловало обсыхающими в межень осередками и побочными, то сейчас таковых практически нет либо они остаются подводными даже при низких уровнях.

Происходящие изменения связаны с активным зарастанием осередков вследствие изменения режима стока гидроузлами и понижения («посадки») уровней из-за массовой разработки русловых карьеров. Только за 1975–1983 гг. оно составило 124 см [Беркович, 2005]. В.В. Дегтярев [1968] обратил внимание на этот процесс в первое десятилетие после заполнения водохранилищ, а к 2020-м гг. произошла повсеместная трансформации русла. На рис. 4 приведен типичный пример превращения цепочки осередков в прибрежные острова и осередковых разветвлений – в односторонние русловые. Этот же процесс способствовал развитию параллельно-рукавных разветвлений, определяющих морфологи-

ческий облик значительной части адаптированно-го и врезанного русла. Суммарная протяженность русла этого типа составляет в результате около 50 км. Но уже в 1980–2000-е гг. в Содомном и Усть-Заостровском разветвлениях левые рукава были частично перекрыты дамбами и превращены в односторонние (в 1970 г. эти разветвления имели длину 5,7 и 4,0 км и были единственными параллельно-рукавными разветвлениями на Иртыше).

Развитию параллельно-рукавных разветвлений способствовала разработка карьеров (в левых несудоходных рукавах, изначально бывших односторонними), благодаря чему их водность сравнялась или даже стала превышать таковую правых рукавов, проходящих вдоль коренного берега. Аналогичное воздействие карьеров привело к образованию ряда одиночных разветвлений с равнозначным распределением расходов воды вместо единичных односторонних (обычно водность левых, вдоль пойменного берега рукавов не превышает 10–15%).

Таблица 3

Критерий И.Ф. Карасева (Θ) для разветвлений среднего Иртыша с измерениями скоростных полей

№ п/п	Расстояние от устья, км	Разветвления	В разветвлении				Выше разветвления			
			B_p , м	h , м	V , м/с	Θ	B_p , м	h , м	V , м/с	Θ
1	2029–2024	Татарско-Булдыревское	200	5,9	0,9	2,8	467	3,1	0,7	13,8
2	2018–2016	Одиночные в верхнем крыле Малоатмасской излучины	–	–	–	–	391	3	0,8	12,0
3	1994,5–1991	Черлакское осередковое	369	3,7	0,8	8,9	404	3,1	0,7	11,9
4	1916–1912	Ниж. Покровское одностороннее	430	2,8	0,8	14,3	463	2,5	0,9	17,6
5	1889–1886,5	Прямолинейное русло между Змеиным и Тамбовским параллельно-рукавными разветвлениями	283	2,9	0,7	9,0	474	2,5	0,9	18,0
6	1876–1870	Усть-Заостровское одностороннее (судоходный рукав)	274	3,4	0,7	7,3	397	2,7	0,6	13,8

Одновременно понижение уровней вследствие разработки карьеров и вызванное ими врезание русла сопровождалось причленением к берегам не менее 15 крупных островов, ранее образующих односторонние разветвления (на рис. 4 таковым является о. Тархов, существовавший в 1970 г.), а о. Черлакский – одиночное разветвление, в котором левый рукав в 1970 г. был судоходным, а сейчас – это обсыхающая уже в начале спада половодья, зарастающая протока. Также произошло объединение многих малых и средних островов посередине русла, превратившиеся в удлиненные ($L_0/B_0 \gg 5–6$) острова, разделяющие рукава параллельно-рукавных и одиночных разветвлений. В Тамбовском разветвлении три отдельных острова длиной 460, 500 и 600 м со-

ставили единый остров длиной 1650 м и шириной 125 м ($L_0/B_0 = 13,2$). Этот процесс активизировался в последние годы, что привело к сокращению количества островов.

Перехват водохранилищами стока наносов – еще одна причина сокращения или исчезновения осередков и побочных. Их зарастание и превращение в острова не компенсируется формированием новых. Вместе с тем дефицит наносов (он – следствие также аккумуляции наносов в карьерах) – причина продолжающихся размывов (их скорости невелики – в среднем 1,6 м/год в широкопойменном русле, 1,3 м/год в адаптированном), причем отступление берегов не сопровождается намывами противоположных, в результате чего увеличивается ширина

русла и основных рукавов. За 50 лет она выросла на 40–60 м, местами до 150 м (например, в правом рукаве в верхней части Содомского разветвления) при неизменности глубины потока. Это способствует увеличению Θ и разделению потока на ветви течения (их динамические оси особенно отчетливо проявляются между звеньями параллельно-рукавных разветвлений, а также в основных рукавах односторонних, в которых произошло снижение водности прибрежных рукавов).

Образование удлиненных островов и параллельно-рукавных разветвлений на среднем Иртыше делает русло аналогичным врезанному с этим типом разветвлений на средней Лене. Это совпало по времени со снижением затопляемости поймы в адаптированном и врезанном русле и превращением его практически во врезанное беспойменное из-за регулирования стока водохранилищами и разработки карьеров, приведших к искусственному понижению отметок дна русла и его врезанию.

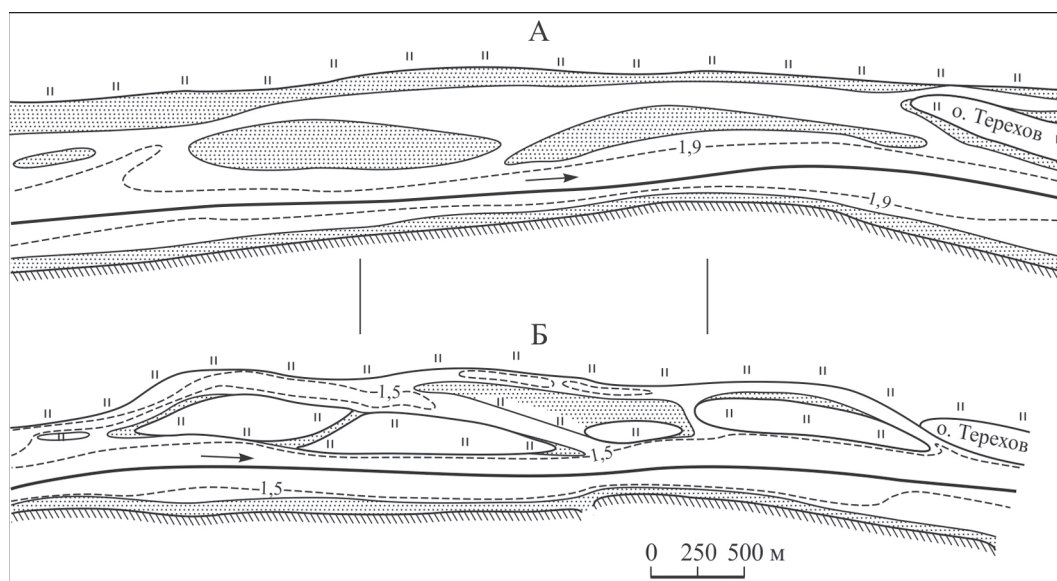


Рис. 4. Трансформация осередковых разветвлений (1970 г.) в односторонние островные (2015 г.) на 1951–1946 км

Fig. 4. Transformation of the midstream sandbank branches (channel plan 1970) into one-sided island branches (channel plans 2015) at 1951–1946 km

Особенностью рукавов разветвлений на среднем Иртыше является их относительная прямолинейность, что соответствует удлиненной форме островов, у которых соотношение $L_0/B_0 \gg 3-4$, очевидно превышающее гидравлически оптимальное [Baker, 1977; Комар, 1983]; лишь в отдельных одиночных разветвлениях один из рукавов образует пологую излучины ($l/L = 1,15-1,2$). Развитые излучины встречаются в некоторых прибрежных рукавах односторонних разветвлений (например, Содомном).

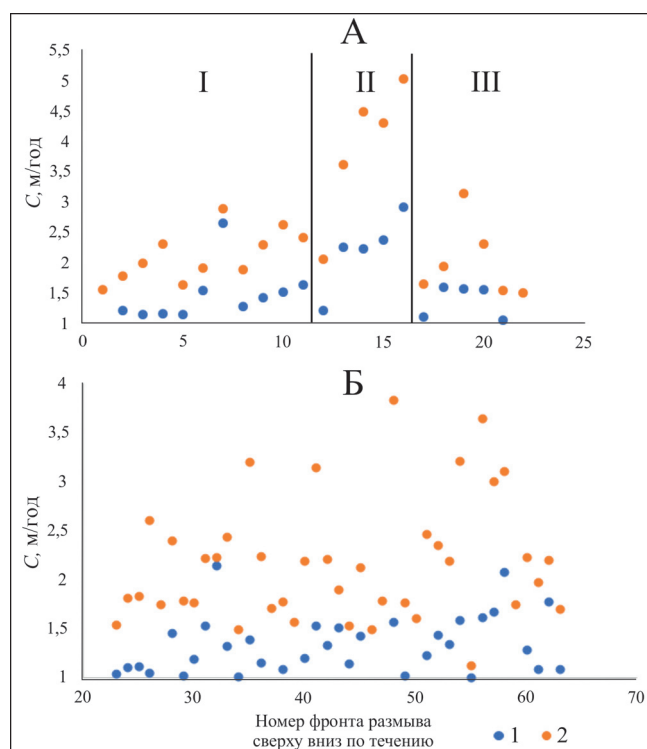
С относительной прямолинейностью рукавов разветвлений и расположением правых, как правило, основных по водности, вдоль коренного берега, связаны невысокие темпы размывов берегов и незначительная их общая протяженность – 70 км на 63 фронта размыва, длина каждого от 110 м до 2,6 км. По всему участку среднего Иртыша средняя скорость размыва пойменных берегов колеблется от 1,0 до 2,9 м/год, максимальная – до 5 м/год. На широкопойменном участке последовательная смена

типов русла находит свое отражение в изменении темпов отступления берегов по его длине (рис. 5А): в начале участка они не более 3 м/год, у свободных излучин – до 5 м/год; при подходе реки к коренному берегу интенсивность размыва пойменных берегов вновь снижается.

В адаптированном и врезанном русле расположение реки на неразветвленных участках и основных по водности рукавов вдоль правого коренного берега обуславливает снижение скоростей размыва берегов (не более 4 м/год) и отсутствие направленного тренда в их изменении (см. рис. 5Б); во врезанном русле фронты размыва берегов приурочены в основном к островам.

Прямолинейность неразветвленных участков русла и рукавов разветвлений, их положение возле ведущего правого коренного берега или под направляющим воздействием его неровностей обуславливают относительное постоянство форм русла и незначительность их изменений во времени. Про-

исходящие переформирования связаны с местными расширениями русла, образующимися из-за размыва пойменных берегов при отклонении потока неровностями правого коренного берега, формированием в расширениях двухстречневых систем потока, перераспределением стока между рукавами и, главное, в адаптированном и врезанном русле – разработкой карьеров в ранее маловодных рукавах и развитием параллельно-рукавных разветвлений. Наиболее существенные переформирования русла связаны с трансформациями осередковых разветвлений в островные (русловые) как следствие регулирования стока и разработки карьеров, естественным и антропогенно обусловленным объединением островов и их приращением к берегам, а на широкопойменном участке – с эволюцией излучин. Среди последних в первой половине XX в. дважды происходило спрямление сначала сложной петлеобразной излучины, а затем образование прорванной излучины, старые русла которых сейчас сохранились в виде старичной протоки (Щербековской) и ложбины на левобережной пойме. На средней крутой пальцеобразной Пальчьевской излучине в привершинной части из-за нарушения условия обтекания потоком берегов (правила Миловича – $r < 3b_p$) произошло смещение стрелы потока к выпуклому берегу, образование осередка, превратившегося в остров, и заполнение им вогнутости правого берега. Водность протоки вдоль него – 11,2%. Такое развитие крутых излучин типично для меандрирующего русла нижнего Иртыша [Чалов и др., 2023a].



Практически все разветвления сопровождаются расширениями русла разной протяженности (самые длинные – в параллельно-рукавных разветвлениях и некоторых односторонних, в 1,5–2 раза большие по сравнению со смежными неразветвленными участками). К расширениям русла и основным рукавам приурочены перекаты, которые занимают постоянное положение на реке, испытывая только местные деформации. Также относительно стабильными являются перекаты в узлах разветвления русла и слияния рукавов.

По длине реки от госграницы сначала постепенно, а затем по нарастающей, возрастает воздействие на русло антропогенного фактора. Сначала это единичные карьеры, а затем – их массовая разработка, приведшая к формированию параллельно-рукавных разветвлений и развитию рукавов за прибрежными островами (при естественном абсолютном преобладании рукавов вдоль правого коренного берега), что отразилось в состоянии водного пути и изменении положения судового хода. Антропогенно обусловленная трансформация разветвлений, особенно в урбанизированной части реки (в черте г. Омска), связаны с перекрытием дамбами большинства меньших по водности рукавов, причем Содомное и Усть-Заостровское разветвления изначально бывшие параллельно-рукавными стали из-за этого односторонними. Дноуглубительные работы на перекатах носят эксплуатационный характер и лишь в отдельных случаях были капитальными, обеспечивающими перевод судового хода в развивающиеся рукава. В одиночном разветвлении на врезанной излучине в г. Омске, благодаря им, искусственно поддерживается судоводительский ход в правом рукаве, хотя его водность меньше, чем левого (соответственно 39 и 51%), поскольку в нем расположен заход в акваторию речного порта.

ВЫВОДЫ

На среднем Иртыше от госграницы до г. Омска преобладают разветвления широкопойменного

Рис. 5. Изменение темпов размыва берегов C , м/год по фронтам размыва сверху вниз по течению среднего Иртыша: А – на широкопойменном участке 2048–1951 км;

I–III – чередование прямолинейного русла и русловых разветвлений; II – свободные излучины; Б – в адаптированном и врезанном русле. Темпы размыва: 1 – средние C_{cp} , м/год, 2 – максимальные C_{max} , м/год

Fig. 5. Change in the rate of bank erosion (C , m/year) on the middle Irtysh along erosion fronts from upstream to downstream: А – on a wide floodplain section of 2048–1951 km; I–III – alternation of a straight channel and channel branches; II – free meanders; Б – in an adapted and incised channel. Erosion rates: 1 – average C_{av} , m/year; 2 – maximum C_{max} , m/year

($B_n/b_p > 3$), адаптированного ($B_n/b_p < 3$) и врезанного русла ($B_n < b_p$), причем переход от одного типа к другому сопровождается усложнением морфологии и развитием параллельно-рукавных разветвлений. На нижнем Иртыше вплоть до слияния с Обью, где русло широкопойменное и водоносность возрастает более чем в два раза, река меандрирует. Излучины имеются также у широкопойменного русла в начале участка. Большие излучины врезанного русла осложнены односторонними и одиночными разветвлениями.

Основная причина разветвлений и формирования параллельно-рукавных разветвлений, отличающихся от широкопойменного русла с этим типом (средняя и нижняя Лена, верхняя Обь, Северная Двина) удлинённостью больших островов ($L_o/B_o \gg 3-4$) и прямолинейностью рукавов, превышением критерия Θ и разделением потока на две ветви течения, между которыми происходит аккумуляция наносов. Это связано с сосредоточением стока в русле (отсутствием или незначительностью разливов воды по пойме) и расширением последнего.

Важным условием формирования широкопойменного и адаптированного русла является его расположение вдоль правого ведущего коренного берега, вследствие чего излучины и разветвления образуются ниже его неровностей, отклоняющих поток к противоположному пойменному. Размыв последнего приводит к образованию местных расширений русла, которые заполняются островами.

В естественных условиях преобладали осередковые, единичные односторонние и одиночные разветвления и только во врезанном русле суще-

ствовало два коротких параллельно-рукавных разветвления. Регулирование стока и перехват наносов водохранилищами, массовая разработка русловых карьеров привели к зарастанию осередков, превращению их в острова и повсеместному развитию односторонних, параллельно-рукавных и одиночных разветвлений, а также прибрежных островов второго порядка в рукавах. Одновременно, несмотря на отсутствие обсыхающих в межень осередков, в прямолинейном русле и в широких рукавах проявляется разделение потока на две динамические оси с повышением отметок дна (подводными осередками) между ними – возможного в перспективе развития новых разветвлений.

Массовая разработка карьеров и сопровождающее их врезание реки привели к обмелению и отмиранию многих маловодных рукавов в односторонних разветвлениях, причленению к берегам и объединению островов, удлинению больших островов, развитию параллельно-рукавных разветвлений. Эти процессы, особенно в черте г. Омска, были усилены перекрытием рукавов дамбами для создания затонов, предотвращения размывов берегов и улучшения условий судоходства (сосредоточения стока в судоходном рукаве). В других разветвлениях разработка карьеров в несудоходных рукавах привела к их развитию, рассредоточению стока и, соответственно, осложнениям водного пути.

На основе проведенного руслового анализа и выявленных закономерностей развития русла были обоснованы рекомендации по учету русловых процессов при водохозяйственном и транспортном использовании реки.

Благодарности. Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева (№ 121051400038-1, 121051200166-4 – исходные данные, русловой анализ) при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-17-00065 – натурные исследования, типизация разветвлений; № 23-77-01006 – анализ размывов берегов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беркович К.М. Русловые процессы и русловые карьеры. М.: Изд-во МГУ, 2005. 109 с.
- Беркович К.М. Устойчивость и деформации русел равнинных рек // Геоморфология. 2004. № 1. С. 13–19.
- Бурибаев М.Ж., Куц С.И., Фацевский Б.В. и др. Затопление поймы Ертиса – главный фактор устойчивого развития речной экосистемы. Алматы: Каганат, 2014. 395 с.
- Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Госфизматиздат, 1958. 395 с.
- Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
- Гендельман М.М. Исследование свободного меандрирования речных русел // Геоморфология. 1988. № 3. С. 38–45.
- Герасимова А.С. Характеристика современных геологических процессов, развитых в долинах нижнего течения рек Оби и Иртыша // Вест. Моск. ун-та. Сер. Биология, почвоведение, геология, география. 1959. № 2. С. 103–111.
- Давыдов Л.К. Гидрография СССР. Т. II. Л.: Изд-во ЛГУ, 1955. 600 с.
- Дегтярев В.В. Изменение гидрологического режима Иртыша. М.: Речной транспорт, 1968. № 12. С. 39–40.
- Дегтярев В.В. Улучшение судоходных условий сибирских рек. М.: Транспорт, 1987. 176 с.
- Диденко Б., Орлович-Грудков К. Влияние разработки русловых карьеров на режим свободной реки // Речной транспорт. 1969. № 9. С. 38–39.
- Завадский А.С. Гидролого-морфологический анализ свободного меандрирования русел равнинных рек: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2001. 27 с.

- Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Петров И.Б. Обь-Иртышская пойма. Типизация и качественная оценка земель. Новосибирск: Наука, 1979. 136 с.
- Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.
- Рулева С.Н., Завадский А.С., Кичигин А.Н. и др. Условия формирования и морфология русла реки Сухоны // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 5. М.: МАКС-пресс, 2010. С. 421–439.
- Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. М.: Журнал «РТ», 2012. 492 с.
- Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛплюс, 2001. 300 с.
- Транспортное использование водохранилищ. М.: Транспорт, 1972. 224 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Куракова А.А. и др. Морфология русла среднего и нижнего Иртыша (российский участок) // Тридцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Пермь: ПГНИУ, 2023а. С. 51–63.
- Чалов Р.С., Голубцов Г.Б., Завадский А.С. и др. Морфология русла и рассредоточение стока среди островов сложных параллельно-рукавных разветвлений нижней Лены и их многолетняя изменчивость // Водные ресурсы. 2023б. Т. 50. № 3. С. 274–285.
- Чалов Р.С., Чалов С.Р. Морфология скального русла реки Ангара на участках Богучанского и Мотыгинского водохранилищ // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 103–110.
- Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1071.
- Komar P.D. Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Nanson A., Knighton D. Anabranching rivers: their cause, character and classification, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, vol. 21(3), p. 217–239.
- Rosgen D.L. A classification of natural rivers, *Catena*, 1994, no. 22, p. 168–199.
- Schumm S.A. *The fluvial system*, 1977, 338 p.
- Электронный ресурс
- Волковская Н.Л. Наводнения на реках Омской области // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2017. № 1. С. 1–7. URL: <http://e-journal.omgau.ru/index.php/2017/1/35-statya-2017-1/741-00271> (дата обращения 10.02.2023).

Поступила в редакцию 15.02.2024

После доработки 16.03.2024

Принята к публикации 24.04.2024

CONDITIONS RESPONSIBLE FOR THE FORMATION AND MORPHODYNAMICS FEATURES OF THE MIDDLE IRTYSH BRANCHED CHANNEL

R.S. Chalov¹, G.B. Golubtsov², A.S. Zavadskiy³, A.A. Kurakova⁴

¹⁻⁴ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹ *Department of Land Hydrology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rachalov@mail.ru*

² *Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru*

³ *Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: az200611@rambler.ru*

⁴ *Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

The results of channel analysis of the Middle Irtysh River (from the state border to the city of Omsk) are for the first time presented. Despite its water management and transport importance, until recently it remained a practically unstudied river in relation to channel processes. The Irtysh River channel doesn't comply with generally accepted ideas about the meandering of medium and small rivers and the predominant branching of large and largest rivers. It was revealed that the meandering channel within Kazakhstan is replaced by a branched one to the city of Omsk and downstream, and then, becoming a largest river, it meanders, only being complicated by islands that appear on the wings and in the top parts of the bends. It has been determined that the changing geomorphologic type of the channel along the length of the Middle Irtysh River (state border – Omsk) leads to the morphological complication of branches. Parallel-arm branches are widespread there, characterized by the elongation of large islands ($L_0/B_0 \gg 3-4$) and the straightness of the arms. The location of the channel along the right leading bedrock bank leads to the formation of branches below its ledges and irregularities that deflect the flow to the opposite floodplain bank. High anthropogenic load on the river (regulation

of flow and interception of sediment by reservoirs, quarrying, and construction of dams) led to the incision of the riverbed, transformation of branches, as well as to the regression and shallowing of low-water branches, and, in other cases, to the emergence of branches and dispersal of runoff. The resulting changes in the Irtysh River bed lead to deterioration and complication of the waterway operation and water management of the river.

Keywords: channel processes, branching channels, meanders, bank erosion, anthropogenic impact, Karasev criterion

Acknowledgments. The paper is prepared according to the scientific research plans of the Department of Land Hydrology and the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the Lomonosov Moscow State University (No. 121051400038-1, 121051200166-4 – initial data, channel analysis) and financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00065 – field research, typification of branching forms; No. 23-77-01006 – analysis of bank erosion).

REFERENCES

- Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1071.
- Berkovich K.M. *Rusloviye protsessy i rysloviye karyery* [Riverbed processes and riverbed quarries], Moscow, MSU Publ., 2005, 109 p. (In Russian)
- Berkovich K.M. *Ustoychivost i deformatsii rusel ravninnykh rek* [Sustainability and deformations of widefloodplain riverbeds], *Geomorfologiya*, 2004, no. 1, p. 13–19. (In Russian)
- Burlibayev M.Zh., Kuts S.I., Fashceevsky B.V. et al. *Zatoplenie poymy Ertisa – glavnyy faktor ustoychivoogo razvitiya rechnoy ekosistemy* [Flooding of the Irtysh floodplain is the main factor in the sustainable development of the river ecosystem], Almaty, Kaganat Publ., 2014, 395 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Chalov S.R. *Morfologiya skalnogo rusla reki Angary na uchastkakh Boguchanskogo i Motyginskogo vodokhranilysch* [Morphology of the rocky bed of the Angara River in sections of the Boguchansky and Motyginsky water reservoirs], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2009, no. 1, p. 103–110. (In Russian)
- Chalov R.S., Golubtsov G.B., Zavadskiy A.S. et al. Channel Morphology and Flow Distribution between Islands in Complex Parallel-Branch Bifurcation in the Lower Lena and Their Long-Term Variations, *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 3, p. 368–378.
- Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Kurakova A.A., Kamyshev A.A. [Morphology of the middle and lower Irtysh channel (Russian section)], *Tritsatsat vosmoye plenar. mezhvuz. koordinats. sov. po probleme erozionnykh, ruslovykh i ustjevykh protsessov* [38th plenary inter-school coordination meeting on the problem of erosion, channel and river mouth processes], Perm, PGNIU Publ., 2023, p. 51–63. (In Russian)
- Davydov L.K. *Gidrografiya SSSR* [Hydrography of the USSR], Leningrad, LSU Publ., 1955, vol. 2, 600 p. (In Russian)
- Degtyaryov V.V. *Izmeneniye gidrologicheskogo rezhyma Irtysha* [Changes in the hydrological regime of the Irtysh River], Moscow, Rechnoy Transport Publ., 1968, no. 12, p. 39–40. (In Russian)
- Degtyaryov V.V. *Uluchsheniye sudokhodnykh uslovii sibirskikh rek* [Improving navigable conditions of Siberian rivers], Moscow, Transport Publ., 1987, 176 p. (In Russian)
- Didenko B., Orlovich-Grudkov K. *Vliyaniye razrabotki ruslovykh karyerov na rezhym svobodnoy reki* [The influence of river-bed quarry development on the regime of a free river], *Rechnoy Transport*, 1969, no. 9, p. 38–39. (In Russian)
- Gendelman M.M. *Issledovaniye svobodnogo meandrirovaniya rechnykh rusel* [Study of free meandering of river channels], *Geomorfologiya*, 1988, no. 3, p. 38–45. (In Russian)
- Gerasimova A.S. *Kharakteristika sovremennykh geologicheskikh protsessov, razvitykh v dolinakh nizhnego techeniya rek Obi i Irtysha* [Characteristics of modern geological processes developed in the valleys of the lower reaches of the Ob and Irtysh rivers], *Vest. Mosk. un-ta. Ser. biologiya, pochvoveneniye, geologiya, geografiya*, 1959, no. 2, p. 103–111. (In Russian)
- Karasev I.F. *Rusloviye protsessy pri perebroske stoka*, [Channel processes during runoff diversion], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (In Russian)
- Komar P.D. Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River channel and erosion in its basin], Moscow, AS USSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)
- Nanson A., Knighton D. Anabranching rivers: their cause, character and classification, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, no. 21(3), p. 217–239.
- 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 Russian)
- Rosgen D.L. A classification of natural rivers, *Catena*, 1994, no. 22, p. 168–199.
- Rulyova S.N., Zavadskiy A.S., Kichigin A.N. et al. [Formation conditions and morphology of the Sukhona riverbed], *Eroзионные и русловые процессы* [Erosion and channel processes], iss. 5, Moscow, MAKS-press Publ., 2010, p. 421–439.
- Rusloviye protsessy i vodniye puti na rekakh basseina Severnoi Dviny* [Channel processes and waterways on the rivers of the Northern Dvina River basin], Moscow, Zhurnal RT Publ., 2012, 492 p. (In Russian)
- Rusloviye protsessy i vodniye puti na rekakh Ob'skogo Basseina* [Channel processes and waterways on the rivers of the Ob River basin], Novosibirsk, RIPEL Plus Publ., 2001, 300 p. (In Russian)

- Rzhanitsyn N.A. *Rusloformiruyushchie protsessy rek* [Processes of riverbed formation], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 264 p. (In Russian)
- Schumm S.A. *The fluvial system*, 1977, 338 p.
- Transportnoye ispolzovaniye vodokhranilyshch* [Transport use of water reservoirs], Moscow, Transport Publ., 1972, 224 p. (In Russian)
- Velykanov M.A. *Ruslovoy protsess* [Channel process], Moscow, Gosfizmatizdat Publ., 1958, 395 p. (In Russian)
- Vodniye puti basseina Leny* [Waterways of the Lena River basin], Moscow, MIKIS Publ., 1995, 600 p. (In Russian)
- Volkovskaya N.L. Navodneniya na rekakh Omskoi oblasti [Floods on the rivers of the Omsk region], *Elektronny Nauchno-metodicheskiy Zhurnal Omskogo GAU*, 2017, no. 1, p. 1–7. (In Russian)
- Zavadskiy A.S. *Gidrologo-morfologicheskiy analiz svobodnogo meandrirovaniya rusel ravninnykh rek* [Hydro-morphological analysis of free meandering of lowland river channels], Extended abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, MSU Publ., 2001, 27 p. (In Russian)

Received 15.02.2024

Revised 16.03.2024

Accepted 24.04.2024