

УДК 551.482.212;556.3

ТРАНСФОРМАЦИЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ В ПРОЦЕССЕ ИХ САМОРАЗВИТИЯ И ВЛИЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ФАКТОРОВ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ¹

© 2023 г. Р. С. Чалов^{a, *}, А. А. Куракова^{a, **}, Г. Б. Голубцов^{a, ***}, А. С. Завадский^{a, ****}

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

*E-mail: rschalov@mail.ru

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

***E-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

****E-mail: az200611@rambler.ru

Поступила в редакцию 28.05.2022 г.

После доработки 09.06.2023 г.

Принята к публикации 02.07.2023 г.

Рассмотрены основные пути трансформации речных русел, т.е. их морфодинамического типа, его усложнения или перехода с одного структурного уровня проявлений русловых процессов на более высокий, в ходе саморазвития русловых форм. На реках с меандрирующим руслом излучины в процессе развития превращаются в большие излучины с прямолинейными “вставками” между смежными формами, в петлеобразные излучины, представляющие собой комбинацию исходной в привершинной части и сегментных на их крыльях, в сундучные излучины при подходе реки к коренному берегу (вынужденная излучина), удлинения нижнего крыла вдоль него и формирования адаптированной излучины при отклонении русла в сторону поймы. На прямолинейных “вставках” между смежными большими излучинами и на их верхних крыльях формируются одиночные разветвления. В привершинных частях крутых излучин с нарушением условия обтекания потоком берегов ($r < 2.5b_p$) образуются острова в местных расширениях русла из-за размыва выпуклого берега или благодаря отторжению части шпоры излучины. Для разветвленных русел характерна при определенных условиях трансформация в процессе саморазвития одиночных и сопряженных разветвлений в односторонние или чередующиеся и внутريدолинная перестройка русловой сети из-за размывов пойменных перешейков между рукавами и пойменными протоками. На эти переформирования, приводящие к морфодинамической трансформации русел, накладываются естественные и антропогенно обусловленные изменения водности и стока наносов и техногенные воздействия на русла, при которых происходит закрепление и стабилизация русел в оптимальном при хозяйственном освоении рек положении. Учет саморазвития речных русел необходим при эксплуатации рек и использовании водных ресурсов, при палеорусловом и палеогидрологическом анализе, а также при разработке прогнозов русловых переформирований.

Ключевые слова: саморазвитие русел, разветвления, излучины, русловые переформирования, сток воды и наносов, рассредоточение стока, антропогенные воздействия

DOI: 10.31857/S0869607123020039, EDN: HDQSIC

¹ Выполнено по плану НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (исходные материалы и их анализ) при поддержке РНФ – проект 23-17-00065 (обобщение материалов по имеющемуся заделу, их анализ и интерпретация для дальнейших исследований по проекту).

ВВЕДЕНИЕ

Русловые процессы – совокупность явлений, связанных с взаимодействием речных потоков и грунтов, слагающих русла рек, обуславливают постоянные их переформирования. Изменения русел, происходящие с течением времени вследствие этих переформирований, определяют русловой режим рек. Уже сами переформирования (развитие излучин и разветвлений, смещение прямолинейных неразветвленных русел, размывы берегов и образование прирусловых отмелей, их зарастание и превращение в фрагменты поймы) приводят к постоянным изменениям конфигурации и параметров форм русел, сопровождаются активизацией или замедлением темпов деформаций, но не меняют при этом морфодинамического типа русла. Но при определенных условиях и при достижении некоторых критических значений параметров форм русел может происходить или смена типа русла или его усложнение, т.е. осуществляться трансформация русла уже как результат его саморазвития. Такие изменения, как и текущие в процессе саморазвития форм русел выявляются на основе ретроспективного анализа по документальным источникам за 200–250 лет, а по картографическим и плановым материалам, по-существу, данным мониторинговых наблюдений – не более столетия, а с использованием космических снимков – 30–50 лет. Эти материалы отражают саморазвитие русловых форм и те их изменения, которые происходят в связи с кратковременными колебаниями факторов русловых процессов (в первую очередь, их водности) или фиксируют начальные этапы направленных изменений при глобальных изменениях природной среды и климата.

Более существенные преобразования русел происходят при направленных глобальных гидроклиматических изменениях, но они сказываются в течение продолжительного времени, и их проявления и причины выявляются уже с применением палеогидрологических и палеогеографических методов.

Начиная с конца XIX века, а иногда намного раньше, и с возрастающими со временем масштабами, интенсивностью и разнообразием происходят антропогенно обусловленные изменения русел рек. Они заключаются как в непосредственном техногенном воздействии (разработка дноуглубительных прорезей на водных путях, карьеров стройматериалов, строительстве гидротехнических сооружений – дамб, полузапруд, мостовых переходов, водохозяйственных, противопаводковых и берегозащитных объектов), так и в изменении факторов русловых процессов при освоении территории речных бассейнов, возведении гидроузлов, регулирующих сток воды и наносов.

В настоящее время наметилось два направления в изучении происходящих трансформаций речных русел. Во-первых, это палеорусловой анализ, позволяющий оценивать их в течение, как минимум, голоцена, как следствия гидроклиматических изменений, происходящих на этом геологическом этапе. Опираясь на “следы” древних русел, запечатленных в рельефе пойм, и гидролого-морфологические зависимости, восстанавливается история развития речных русел и даются прогнозные предположения о возможных преобразованиях современных русел (в основном, меандрирующих) в будущем при прогнозируемых сценариях изменений природной среды и климата [13, 14, 20].

Во-вторых, это традиционный русловой анализ, применение которого дает возможность оценивать русловые деформации вследствие саморазвития речных русел (русловой режим рек), происходящие их трансформации в связи с разнообразными антропогенными воздействиями на реки и факторы русловых процессов. В результате определены основные пути трансформации русел разных морфодинамических типов при естественных и антропогенных изменениях факторов русловых процессов и техногенных воздействиях на реки [1, 2, 31], причем основное внимание было уделено большим и крупнейшим рекам с разветвленным руслом [10, 28, 30], где эти изменения, особенно антропогенно обусловленные, имеют наиболее яркие проявления.

Повышенный интерес к исследованиям естественных и антропогенных трансформаций речных русел вполне закономерен, т.к. от их направленности и темпов преобразований зависит решение многих водохозяйственных проблем, возникающих при освоении водных и других речных ресурсов. При этом главное внимание при оценке трансформации речных русел обращается на антропогенные изменения как следствие массового использования речных ресурсов, создания гидроузлов, строительства различных инженерных сооружений на берегах, мостовых и подводных переходов, часто с оценкой гидроэкологических последствий этих воздействий. В то же время происходящие изменения в морфодинамике русел в процессе саморазвития, сопровождающиеся трансформацией типа русла, усложнением морфологии и переформирований (т.е. замещением простых форм русел более сложными: например, одиночных или сопряженных разветвлений параллельно-рукавными, сегментных излучин прорванными и т.д.), остаются вне сферы исследований и, в лучшем случае, констатируется лишь сам факт таких трансформаций для каждого конкретного случая. На них накладываются периодические, разной продолжительности колебания водности рек, создавая дополнительные условия для закрепления происходящих изменений или трансформации форм русел. Еще большее воздействие на происходящие в процессе саморазвития изменения оказывают различные гидротехнические мероприятия, особенно значимые при регулировании русел (управлении русловыми процессами) при совершенствовании водных путей и обеспечении оптимальных при данном русловом режиме условий судоходства, на урбанизированных территориях, охватывающие участки рек протяженностью в десятки километров, в бьефах крупных гидроузлов (последнее выходит за рамки настоящей статьи, поскольку создаются совершенно новые условия формирования русел, достаточно широко освещенные в научной литературе [2, 4, 38–40]).

Задача настоящей статьи: 1) дать характеристику и выявить закономерности естественных трансформаций речных русел в процессе их саморазвития с учетом кратковременных периодических колебаний водности; 2) определить признаки и причины их направленных изменений, приводящих к смене морфодинамического типа в процессе саморазвития русел; 3) оценить степень и формы закрепления изменений морфологии русел при их саморазвитии антропогенными воздействиями на русловые процессы (в т.ч. при управлении ими при решении воднотранспортных и водохозяйственных проблем); 4) показать роль периодических колебаний водности и направленных гидроклиматических изменений в трансформации русел при их саморазвитии.

ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу статьи положены результаты натурных исследований русловых процессов на многих реках России — от больших и крупнейших до малых в разных природных условиях и протекающих в регионах неодинакового экономического развития и, соответственно, различной степенью антропогенных воздействий. Для всех рек выполнен ретроспективный русловой анализ на основе сопоставления (совмещения) карт русел (лоцманских), составляемых на судоходных реках, начиная с начала XX века, космических снимков, крупномасштабных планов перекатных (мелководных) участков и перекаатов, регулярно получаемых изыскательскими партиями службы водных путей, другие архивные (фондовые) материалы, зафиксировавшие состояние русел на определенных временные срезы. Для малых и средних (несудоходных) рек использовались межевые планы, схемы и планы мелиоративных работ и другие архивные источники. Материалы гидрологической информации и данные об антропогенной нагрузке на реки дали возможность установить связи переформирования русел с колебаниями и изменениями водности рек и антропогенных воздействий на них.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Саморазвитие речных русел. В большинстве случаев это – естественное развитие форм русел, их деформации, определяющие изменения во времени параметров, конфигурации форм и т.д. Излучины русла эволюционируют вследствие размыва одних берегов и аккумуляции наносов у других, из пологих превращаются в развитые и крутые, спрямляются, после чего процесс образования и развитие излучины возобновляется [25]. То же происходит в разветвленном русле при периодическом перераспределении стока и развитии то одно, то другого рукава. Это – закономерные формы проявления горизонтальных (в литературе часто говорят – плановых) русловых деформаций, при сохранении неизменными их морфодинамического типа и направленности развития.

Но образование в процессе меандрирования прорванных, петлеобразных или больших излучин вносит существование коррективы в сам процесс, приводит к образованию принципиально новых форм проявления самого меандрирования, возникновению несвойственных ему форм, изменению темпов и направленности деформации. Образование прорванной излучины, т.е. спрямление излучины на стадии развитой или крутой, при которой соотношении длины l и шага излучины $L - l/L = 1.4-1.7$, по существу, это уже возникновение разветвления русла, которое в дальнейшем продолжает функционировать, характеризуясь существованием и развитием двух рукавов. Это происходит на реках, руслоформирующий расход воды $Q_{\text{ф}}$, на которых соответствует полному затоплению поймы. Если такое спрямление произошло при экстремальном, несвойственном реке половодье (паводке), старое русло быстро отмирает, превращаясь в форму рельефа поймы, старичное озеро или залив (курью) на месте нижнего крыла бывшей излучины. Формирование прорванных излучин – это еще и рассредоточение стока между вновь образовавшимися рукавами, формы русла которых, их параметры со временем изменяются, адаптируясь в соответствии с их водностью. Обычно большая часть расхода воды концентрируется в спрямляющем рукаве, в котором формируется две-три смежных пологих излучины в зависимости от его длины и водности. Такого перераспределения стока не происходит, если спрямляющий рукав находится ниже плеча коренного берега, направляющего поток по старому руслу. Однако, рассредоточение снова вызывает меандрирование рукава – как старого русла, образующего крутую излучину, так и нового спрямляющего рукава [26].

Если спрямление излучины и ее превращение в прорванную (по терминологии ГГИ [6] это – незавершенное меандрирование) не происходит, то она в зависимости от местных условий превращается в большую сегментную или петлеобразную, вершины которых по мере их поперечного смещения достигают и касаются противоположных бортов днища долины. Стрела прогиба таких излучин увеличивается, составляя 0.5 ширины днища, а пояс меандрирования оказывается равным всей его ширине. По существу, происходит образование излучины следующего более высокого структурного уровня. Образование больших излучин связано с остаточной поперечной циркуляцией, благодаря которой удлиняется область сопряжения излучин, и на переходе от одной к другой формируется прямолинейный участок. При этом удлиненные крылья таких больших излучин превращаются в прямолинейные “вставки” между излучинами, ориентированными по диагонали к оси днища долины, пересекая его. Вследствие этого во время половодья течения в русле и на затопленной пойме не совпадают по направлению, происходит слив воды с поймы со стороны верхней излучины и перелив воды на пойменный сегмент нижней излучины. Это, в свою очередь обуславливает активизацию размыва берегов, чему способствуют возникающие возле них вихрей с горизонтальной осью [8, 12], и местное расширение русла, в котором формируется осередок, со временем превращающийся в остров (рис. 1). Извилистое (меандрирующее) русло как морфодинамический тип осложняется разветвлениями между смежными большими излучинами.

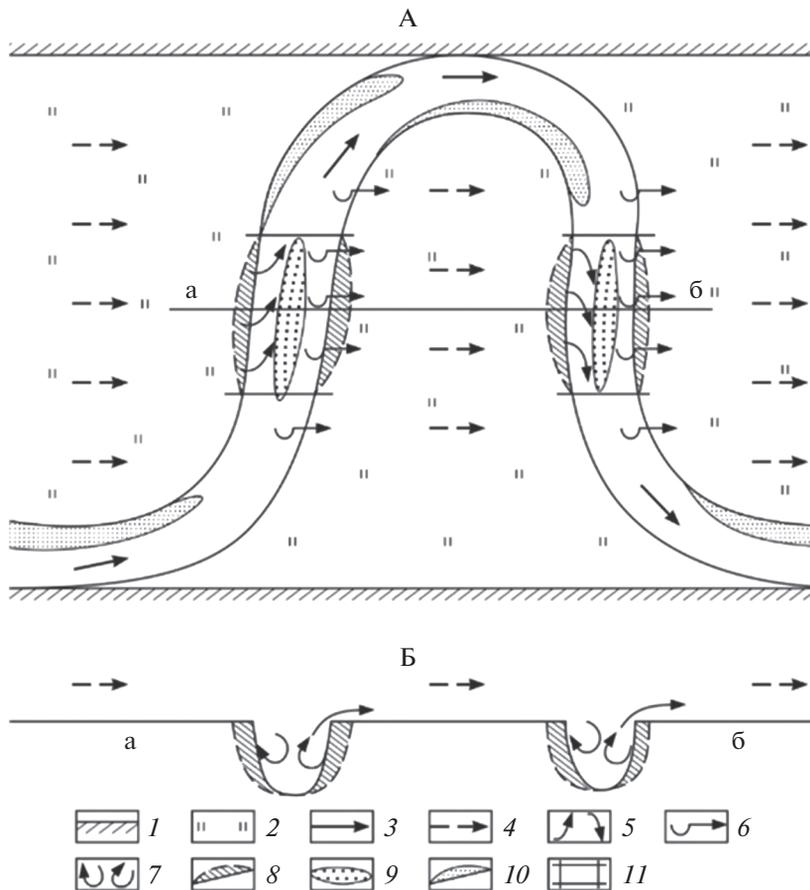


Рис. 1. Формирование одиночных разветвлений между смежными большими излучинами: А – план русла, Б – профиль по оси днища долины. 1 – борта днища долины; 2 – пойма; 3 – направление течения руслового потока; 4 – течения на затопленной пойме; 5 – слив воды с поймы в русло; 6 – перелив воды из русла в пойму; 7 – вихревые течения в русле при пересечении руслового и пойменного потоков; 8 – размывы берегов при пересечении руслового и пойменного потоков; 9 – осередки в местных расширениях русла; 10 – прирусловые отмели у берегов излучин; 11 – прямолинейные вставки между излучинами.

Fig. 1. Formation of single branches between adjacent large bends: А – channel plan, Б – profile along the axis of the valley bottom. 1 – sides of the bottom of the valley; 2 – floodplain; 3 – direction of the channel flow; 4 – currents on the flooded floodplain; 5 – draining water from the floodplain into the channel; 6 – overflow of water from the channel to the floodplain; 7 – eddy currents in the channel at the intersection of the channel and floodplain flows; 8 – erosion of the banks at the intersection of the channel and floodplain streams; 9 – midpoints in the local widenings of the channel; 10 – near-channel shallows near the banks of meanders; 11 – rectilinear inserts between bends.

Во втором случае на стадии крутой сегментной излучины, когда $l/L > 1.7$ и происходит потеря гидравлической выгоды извилистой формы [12, 22], восстановление последней и поля скоростей, присущего пологим и развитым излучинам, осуществляется благодаря развитию вторичных излучин на крыльях исходной при сохранении ее поперечного смещения. Благодаря им происходит встречный размыв берегов на крыльях петлеобразной излучины, приводящий к ее спрямлению. Этот процесс обычно

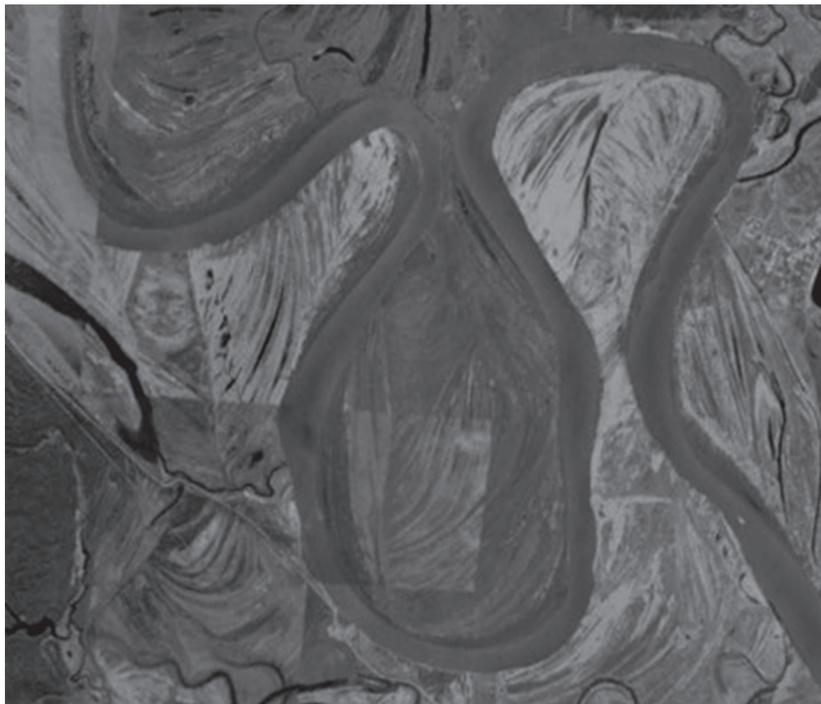


Рис. 2. Петлеобразные излучины в нижнем течении р. Иртыша.

Fig. 2. Loop-shaped bends in the lower reaches of the Irtys river.

рассматривается часто как завершающий развитие излучины [6, 15, 36], но при этом игнорируется происходящее формирование трех излучин вместо одной, увеличение потерь энергии потока в ходе искривления излучины и вновь ее восстановления при разделении единой, но увеличившейся в размерах излучины на три (рис. 2). Иногда одно из крыльев сохраняет относительно прямолинейные очертания, и тогда в его пределах формируется одиночное разветвление. Но разветвление сопровождается изгибами огибающего остров потока и, как следствие, ростом кинетической энергии и транспортирующей способности потока [31].

Одиночные разветвления нередко присущи верхним крыльям очень крутых изгибов русла в вершинах излучин, чаще всего вынужденных, у которых привершинная часть и нижнее крыло располагаются вдоль коренного берега. В процессе развития таких излучин при набегании потока на коренной берег возникает подпор, в зоне которого аккумулируются наносы, расширяется русло и формируются осередки, со временем также превращающиеся в острова.

Формирование разветвлений возможно также и в рукавах прорванных излучин, особенно если они играют наносоотсасывающую роль (для влекомых наносов) из-за большого угла их ответвления.

Таким образом, эволюция излучин в процессе их саморазвития может приводить к трансформации самих форм излучин, переходу их на более высокие структурные уровни русловых процессов или преобразованию в более сложный морфодинамический тип. Подобные изменения характерны и для разветвленных русел, преобразовании в ходе развития одного их типа в другой, как в сторону усложнения, так и упрощения морфологии. Например, односторонние прибрежные разветвления благодаря

развитию и увеличению водности второстепенного рукава превращаются в одиночные; сопряженные разветвления со сдвинутыми узлами сопряжения рукавов при перераспределении стока в одном из звеньев становятся параллельно-рукавными при сохранении водности вторых рукавов или односторонними прибрежными разветвлениями, если уменьшение их водности и обмеление приобретает необратимый характер.

Изменения морфодинамического типа русла или разновидностей того или иного типа происходит, если в процессе развития начинает сказываться воздействие внешних по отношению к реке и ее руслу условий. В меандрирующем русле последовательное спрямление крутых ($l/L > 1.7$) излучин вдоль относительно выровненного в плане коренного берега приводит к закреплению спрямления и постепенной замене меандрирующего русла относительно прямолинейным неразветвленным (с односторонней поймой) или односторонними разветвлениями с островами вдоль поймы. Пример такого саморазвития в прошлом меандрирующего русла дает верхняя Обь ниже устья р. Чарыша, выше г. Барнаула и между г. Барнаулом и с. Шелаболиха, где рельеф поймы, в том числе ее прирусловой части, сегментно-гривистый, созданный меандрирующим руслом, тогда как современное русло либо прямолинейное, либо представлено односторонними разветвлениями.

На ниже Иртыше широко распространены сундучные излучины, представляющие собой комбинацию вынужденной при подходе реки к правому коренному берегу, короткого прямолинейного отрезка вдоль него и адаптированной излучины, верхнее крыло которой им контролируется, а нижнее располагается уже в пойменных берегах. Механизм образования таких излучин в процессе их саморазвития связан с влиянием коренного берега и выклиниванием поймы выше по течению [22], вследствие чего излучина на подходе к нему приобретает гипертрофированную форму, верхнее крыло ее стабилизируется, тогда как нижнее, смещаясь, создает прямолинейный участок, переходящий затем в верхнее крыло адаптированной излучины. Образование сундучных (их еще называют трапециевидными) излучин – пример трансформации меандрирующего русла в процессе саморазвития при расположении нижнего крыла излучины вдоль коренного ведущего берега (рис. 3).

В развитии разветвлений влияние коренных берегов также может оказывать решающее воздействие на их эволюцию и морфодинамическое преобразование. Расположение одного из рукавов вдоль коренного берега и специфика гидравлики потока при затопленной пойме (перекос водной поверхности и циркуляционные течения, с ним связанные) приводят к закреплению преимущественного его развития и, в конечной пойме, превращению одиночного разветвления в одностороннее, а при полном обмелении ставшего второстепенным рукава – в прямолинейные неразветвленные. На р. Оби в районе п. Кожевниково (выше устья р. Томи) еще в XIX веке существовали сопряженные разветвления из трех звеньев, из которых лишь в среднем основном по водности было русло возле левого коренного берега, в верхнем и нижнем – рукава проходили в пойменных берегах (между островами и правобережной поймой) (рис. 4). К середине XX основными по водности стали левый рукав у коренного берега в верхнем звене, правый в пойменных берегах в среднем звене и снова левый у коренного берега в нижнем. Выровненность ведущего левого берега в верхней части разветвлений способствовала тому, что правый бывший основной рукав в верхнем звене превратился во второстепенный маловодный к концу XX века, а к 2020-м годам – в пойменную протоку, функционирующую только в половодье. То есть, верхнее звено сопряженной системы последовательно превращалось в течение столетия в одностороннее разветвление, а затем в прямолинейное неразветвленное русло.

Стабилизация бывшего левого рукава, теперь прямолинейного русла, вдоль коренного берега и наличие мыса (плеча) последнего в узле сопряжения рукавов обусловило постоянство расположения основной доли расхода воды в правом рукаве бывшего среднего, теперь верхнего (при сокращении сопряженных разветвлений) и

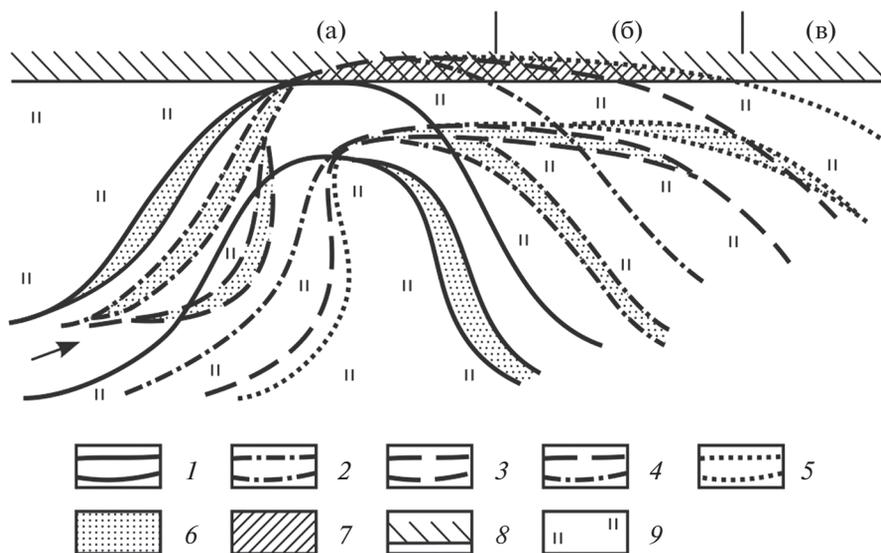


Рис. 3. Трансформация вынужденной излучины в сундучную. 1–5 – контуры русла при последовательном его смещении; 6 – прирусловые отмели; 7 – размыв коренного берега; 8 – коренной берег; 9 – пойма. Составные части сегментной излучины: (а) – вынужденная излучина; (б) – прямолинейная “вставка”; (в) – верхнее крыло сегментной адаптированной излучины.

Fig. 3. Transformation of a forced bend into a chest bend. 1–5 – contours of the channel with its successive displacement; 6 – near-channel shallows; 7 – erosion of the bedrock bank; 8 – root bank; 9 – floodplain. Components of a segmental bend: (a) – forced bend; (б) – rectilinear “insert”; (в) – the upper wing of the segment adapted bend.

левом рукаве нижнего звена. Таким образом, налицо, с одной стороны, полная трансформация в процессе саморазвития верхней части сопряженной системы рукавов, а с другой, при сохранении морфологии и рассредоточения стока по рукавам следующих звеньев системы – закрепление большей части стока и преимущественное развитие (ликвидация периодичности переформирований) последовательно правого и левого рукавов благодаря направляющему влиянию выступа (мыса) коренного берега в его начале.

Развитие форм русел сопровождается размывами берегов и смещением самих форм русла. В частности, для излучин русла и излучин рукавов характерны поперечное (по отношению к оси русла) смещение, приводящее к увеличению их кривизны (уменьшению радиуса r и увеличению степени развитости l/L). Эти изменения форм сопровождаются активизацией размывов вогнутых берегов [3, 7, 12, 22] и, как следствие, расширением пояса меандрирования или разветвления русла. Если пойма реки расчленяется пойменными протоками (пойменная многоорукавность), вдоль нее располагаются русла притоков главной реки (такова, например, р. Кеть, правый рукав которой при выходе реки в долину Оби проходит в тыловой части обской поймы, имея длину несколько десятков километров) или формируется раздвоенное русло, поперечное смещение излучин может привести к размыву перешейка между ними и руслами пойменной протоки, рукава раздвоенного русла или притока. В образующийся проран направляется часть стока, иногда значительная, вследствие чего происходит полная перестройка русловой сети. На средней Оби таким образом нижняя часть правого рукава р. Кети – Кети Копыловской превратилась в один из рукавов сложного пойменно-рукавного разветвления Оби; на широтном участке средней Оби размывы пе-

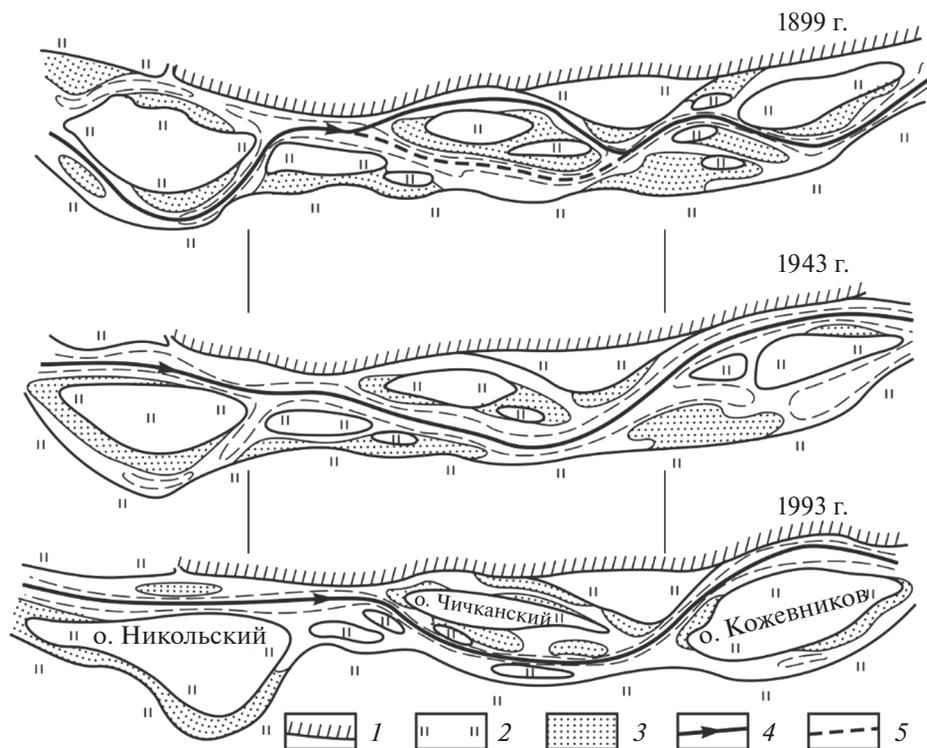


Рис. 4. Естественная трансформация сопряженных разветлений р. Оби в районе п. Кожевниково. 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – положения основного по водности потока; 4 – прирусловые отмели; 5 – начало перераспределения стока во второй рукав.

Fig. 4. Natural transformation of conjugated branches of the Ob river in the area p. Kozhevnikovo. 1 – root bank; 2 – floodplain; 3 – positions of the main stream in terms of water content; 4 – near-channel shallows; 5 – the beginning of the redistribution of runoff into the second branch.

решейка между основным рукавом, левым рукавом раздвоенного русла и пойменными протоками (при встречном размыве берегов на излучинах рукавов и проток) привело к расчленению второго рукава Оби на три части (Юганскую Обь, Бол. Салымскую и протоку Неулеву) и образованию нескольких сложных трехрукавных пойменно-русловых разветлений; на верхней Оби произошло превращение русла малой реки Уени в крупный рукав Симан (до 30% стока реки), образовавший вместе с основной рекой раздвоенное русло. Образование проранов между руслом Малой Оби (левый рукав раздвоенного русла нижней Оби) и пойменными протоками привело к образованию двух пойменно-русловых разветлений, в которых сток Малой Оби распределен практически поровну между обоими рукавами [26].

Еще более многочисленны примеры расчленения островов русловых разветлений благодаря встречному размыву берегов излучин рукавов, следствием чего является увеличение разветленности русла (морфологический эффект) и рассредоточенности стока. Это, естественно, сопровождается изменением параметров русла и рукавов и их форм, приходящих со временем в соответствие с изменившейся их водностью. Такие преобразования разветвленных русел отмечены на Лене, Енисее, Мезени, Северной Двине, Печоре.

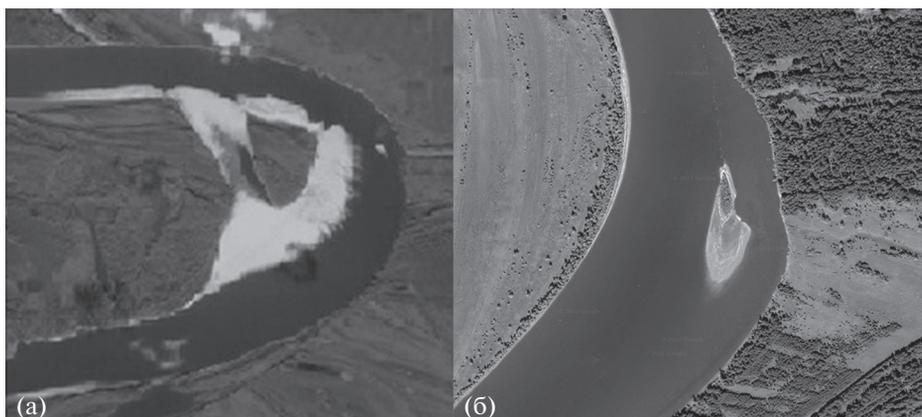


Рис. 5. Разветвления в привершинных частях крутых излучин р. Иртыша, образовавшиеся: (а) – вследствие отторжения крайней части шпоры; (б) – в расширении русла при зарастании осередка.

Fig. 5. Branches in the near-top parts of the steep bends of the Irtysh river, formed: (a) – due to the rejection of the extreme part of the spur; (b) – in the expansion of the channel during the overgrowth of the middle.

На больших меандрирующих реках достаточно распространенным является образование островов в привершинной части излучин, преимущественно вынужденных (или излучин, вершины которых располагаются вдоль яров высокой, редко затопляемой поймы), у которых $r < 2.5b_p$ (т.е. нарушено правило Миловича). При этом возможно два варианта формирования разветвлений. Один из них – отчленение крайней части шпоры излучины (наподобие формированию прорванной излучины с образованием острова (рис. 5а), разделяющего русло в вершине излучины на два рукава. Второй вариант связан с местным расширением русла вследствие размыва выпуклого берега при смещении к нему динамической оси потока (рис. 5б). Во вновь возникшем расширении формируется осередок, который по мере дальнейшего расширения русла и аккумуляции наносов посередине русла превращается в элементарный остров. В обоих вариантах разветвления в привершинной части излучин большая часть стока воды (60–70%) сосредотачивается в спрямляющем рукаве (протоке) у выпуклого берега излучины, но водность изогнутого рукава возле вогнутого берега сохраняется достаточно высокой (30–40%). Она поддерживается благодаря большей глубине h в этой части русла как следствие ее зависимости от кривизны русла $h = f\left(\frac{1}{r}\right)$ и расположения рукава вдоль ведущего вогнутого берега [3, 25]. Если спрямляющий рукав, образовавшийся отчленением вершины пойменной шпоры, отходит от русла под большим, близким к прямому, углом, то в этом случае он выполняет наносотсасывающие функции и остается относительно мелким, забирающим меньшую долю расхода воды. В других случаях в спрямляющем рукаве формируются вторичные разветвления, и сток воды рассредотачивается квазиравномерно по трем рукавам, причем проходящий вдоль вогнутого берега более многоводный из-за больших глубин в нем.

Описанные трансформации излучин вследствие формирования островов в их привершинных частях, на верхних крыльях вынужденных излучин или развитие сундучных излучин происходит при условии, что коренные берега сложены трудно размываемыми или неразмываемыми горными породами. Если же коренной берег песчаный, представляет собой уступ высокой аккумулятивной террасы, то подход реки к нему в процессе саморазвития излучины означает появление местного достаточно мощного

поступления наносов. На малой реке (как это было показано А.Б. Клавеном и др. [5] на примере р. Полонети) это приводит только к обмелению русла ниже по течению.

Значение критерия И.Ф. Карасева [22] $\theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda}$ (здесь λ – коэффициент гидравлических сопротивлений), величина которого показывает вероятность разделения потока на ветви течения и разделения русла на рукава, невелика, соответствуя формированию компактной струи потока, что и обуславливает неразветвленность русла, несмотря на увеличение стока наносов. На больших реках ниже таких размываемых песчаных вогнутых берегов излучин формируются сложные разветвления. А.Б. Клавен это обнаружил на р. Зее, где река, подойдя к песчаной Белой горе и интенсивно размывая ее уступ, непосредственно ниже по течению сформировала осередки и острова. На Северной Двине произошло преобразование прямолинейного неразветвленного русла и одиночного разветвления перед сужением днища долины и сменой широкопойменного русла врезанным у с. Ягрыш в сложное параллельно-рукавное протяженностью свыше 20 км. Это явилось следствием того, что выше по течению река стала подмывать уступ высокой песчаной террасы – Толоконную гору, ставшую мощным местным источником поступления наносов [17].

Подобные трансформации русла могут не происходить при наличии ограничивающих условия для развития островов. На р. Яне на крутой пальцеобразной излучине изгиб русла с $r < 2.5b_p$ в привершинной ее части возле коренного берега в основании последнего по мере его отступления в русле образовалась скальная плита с малыми глубинами над ней – возникла шивера (порог занимающий больше половины ширины русла), сузившая стрежневую зону потока возле выпуклого берега излучины [37]. Большие скорости течения (до 3.5 м/с) как над скальной плитой, так и по стрежню потока препятствуют аккумуляции наносов; соответственно разветвление в расширении русла на скальном основании не происходит. На средней Лене выше г. Олекминска в Кыллахском “разбое” (местное название разветвлений) интенсивно размывается правый песчаный берег, правого рукава высотой до 60 м, но ниже по течению русло подстилается по всей ширине скальной плитой. Поступающие от размыва берега наносы в половодье аккумулируются, чему способствует подпор, возникающий от слияния с р. Олекмой. Однако, при спаде уровней и в межень на этой плите уклоны и скорости течения возрастают, и все отложившиеся наносы смываются.

Сложные перестройки русел иногда происходят при слиянии рек [34]. Развитие излучин рек Чулыма и Яи перед их слиянием привело к образованию прорана между ними и перемещению Чулыма в нижнюю излучину Яи, а устье последней сместилось вверх по течению главной реки (рис. 6а). Еще более серьезные изменения русловой сети произошли в узле слияния Вычегды и Сысолы, где вследствие спрямления, смещения и искривления излучин Вычегды и перераспределения стока во второстепенный ее рукав Шарда-полой устье притока с конца XVIII века оказалось на 25 км ниже исходного положения, а г. Сыктывкар (бывш. Усть-Сысольск) теперь находится не на главной реке, а на ее притоке. Последние переформирования (развитие Шарда-полой) произошли уже в 2000-е годы и еще окончательно не закончились (рис. 6б).

Влияние на саморазвитие речных русел *естественных факторов*, главным образом, колебаний стока воды и наносов, обусловлено, в первую очередь, изменениями гидроклиматических условий. Эти изменения проявляются в наблюдающихся значимых изменениях годовых и максимальных расходов воды на реках России. Годовые расходы воды увеличились на большинстве рек ЕТР, Сибири и Дальнего Востока от 10 до 50% относительно базисного периода. Снижение Q_{cp} проявилось в верховьях Лены и Амура, бассейне Селенги, на северо-востоке России, в т.ч. на Камчатке. Максимальные расходы воды наиболее интенсивно снижаются в бассейнах Дона и Оки, в высокогорной части бассейнов Терека и Кубани [21].

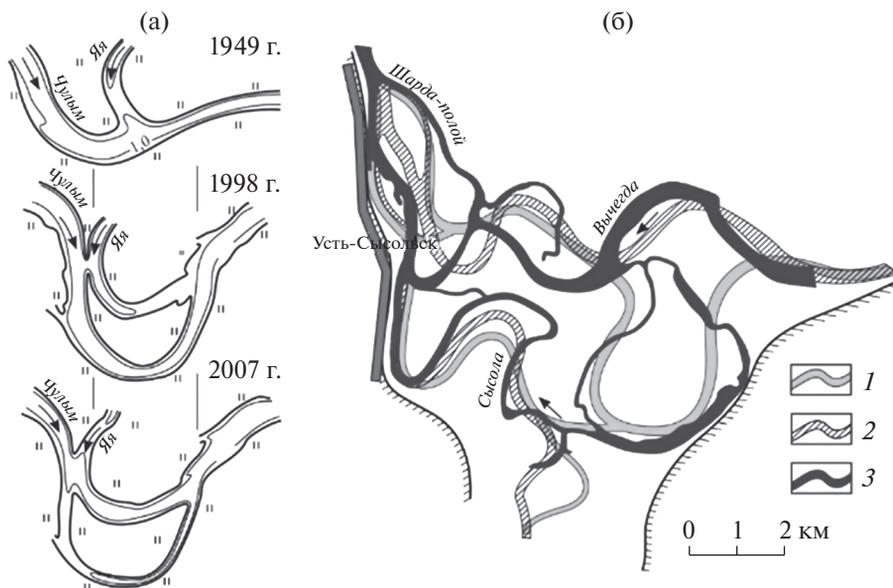


Рис. 6. Переформирования русел в узлах слияния рек: (а) – Чулыма и Яя; (б) – Вычеды и Сысолы (по Р.С. Чалову и С.Н. Рулевой, 2014): положения русел в 1780 г. (1), 1909 г. (2) и 2010 г. (3).

Fig. 6. Reformation of channels at the confluence nodes of the rivers: (a) – Chulyma and Yaya; (b) – Extractions and Sysola (according to R.S. Chalov and S.N. Rulevoy, 2014): channel positions in 1780 (1), 1909 (2) and 2010 (3).

Результаты влияния гидроклиматических изменений при происходящих одновременно трансформациях их морфодинамического типа или его разновидностей вследствие саморазвития речных русел разделить бывает довольно сложно. Это обусловлено, с одной стороны, сравнительно малыми значениями гидроклиматических изменений за срок наблюдений за состоянием русла и необходимым определенным временем для релаксации русла и его изменений применительно к новым условиям стока. С другой стороны, саморазвитие русла и изменения факторов могут иметь общую направленность во влиянии на русла, и в этом случае очевидно можно говорить о некоторой активизации (или замедлении) процесса трансформации. Масштабы и скорость изменения речных русел зависит от его устойчивости, размеров и водоносности реки, морфодинамического типа и его сложности (особенно для рек с разветвленным руслом). Значительно быстрее трансформация форм русла наблюдается на реках со слабо- и неустойчивым руслом; при росте устойчивости время релаксации увеличивается, и практически не проявляется на реках с врезанным галечно-валунным руслом. Но и морфологические изменения как следствие саморазвития форм русла на таких реках очень замедлены и зачастую не проявляются за время проведения промерно-съёмочных работ. Для крупнейших рек изменения стока воды и наносов не всегда однозначны из-за сложной морфологии русла, рассредоточения и постоянного перераспределения стока и изменений устойчивости русла по длине [31]. Так, в среднем и нижнем течении р. Лены, где русло широкопойменное (в пределах Центрально-Якутской низменности) с последней четверти XX века наблюдается увеличение стока воды как в целом за год (на $39 \text{ км}^3/\text{год}$), так и во все сезоны года; одновременно увеличился тепловой сток (на $0.8 \times 10^{15} \text{ кДж/год}$) и сток взвешенных наносов (5.85 млн т/год). По прогнозным оценкам увеличение стока на р. Лене будет продол-

жаться и может превзойти аналогичные изменения на многих других реках России [11]. Повышение водности и теплового стока с одновременным ростом средней температуры вечной мерзлоты (она исчезла на многих участках русла [41, 29]) привело к тому, что от г. Покровска до с. Жиганска, где русло было представлено в основном сопряженными разветвлениями (ниже устья Вилюя – сложно сопряженными), произошло в начале XX века перераспределение стока между основными рукавами [20], но трансформация сопряженных разветвлений в параллельно-рукавные началась лишь в конце века, когда было обнаружено повышение водности и исчезновение мерзлоты в русле. То же произошло с менее распространенными чередующимися прибрежными разветвлениями, в которых бывшие второстепенные рукава превратились во вторые основные, и при зарастании в прямолинейном неразветвленном русле вновь образовавшихся (в том числе благодаря отторжению побочной от берегов) осередков, ставших островами посередине реки [30, 28]. Слабое повышение водности р. Печоры также благоприятствовало преобразованию сопряженного разветвления в параллельно-рукавное [10, 31].

Верхняя Обь за счет увеличения стока наносов из Катуня на фоне роста в течение всего последнего столетия водности реки характеризуется тем, что односторонние разветвления постепенно трансформировались также в параллельно-рукавные, причем этот процесс со временем распространялся вниз по течению и к концу XX века почти достиг устья р. Чарыша [18, 32].

На реках Европейской части России и Сибири, на которых отмечено снижение водности и уровней, происходящее на фоне повышения температуры воздуха, наблюдается увеличение длительности обсыхания осередков и побочной, их зарастание и превращение, соответственно, в острова или молодую пойму, т.е. происходит закрепление нового морфодинамического типа – русловых (островных) разветвлений на месте прямолинейных русел с побочными, располагающимися в шахматном порядке или осередковыми разветвлениями [10, 17, 29, 31], что соответствует переходу русла на более высокий структурный уровень развития русловых процессов [35].

На фоне направленного тренда климатических изменений и, как следствие, водности рек сохраняется чередование многоводных и маловодных периодов продолжительностью 10–15 лет. На меандрирующих реках это проявляется в том, что спрямляющие рукава, образовавшиеся в тыловой части шпор излучин при направленном росте водности реки, могут существовать в годы с повышенной водностью, а при снижении стока мелеют и зарастают. Разветвленные русла при этом характеризуются вслед за колебаниями водности периодичной сменой типов разветвлений (например, Омуганское разветвление на средней Лене является звеном то параллельно-рукавного, то сопряженного разветвления в зависимости от водности временного периода [32]). Кроме того, колебания водности отражаются в образовании островов, закрепляя тот или иной тип разветвления: в годы повышенного стока образуются новые пойменные протоки, активизируются старые, образуются пойменно-русловые разветвления или разветленно-извилистые русла, которые в последующий маловодный период закрепляются как тап русла; в годы с более низкими уровнями осередки реке затапливаются, быстрее зарастают, превращаясь в новые острова, способствуя дальнейшему увеличению степени разветвленности речных русел.

Антропогенные воздействия на русла рек и факторы русловых процессов. На фоне саморазвития речных русел и их трансформации под влиянием естественных изменений факторов русловых процессов антропогенные воздействия на реки вносят существенные коррективы в русловую режим и морфологию русел рек. Использование рек в качестве водных путей сообщения и их постоянное совершенствование, требующее выполнения дноуглубительных (разработка прорезей) и выправительных (строительство дамб, полузапруд и т.д.) работ, является в полной мере отражением управления русловыми процессами, при котором гидротехнические мероприятия опираются на зако-

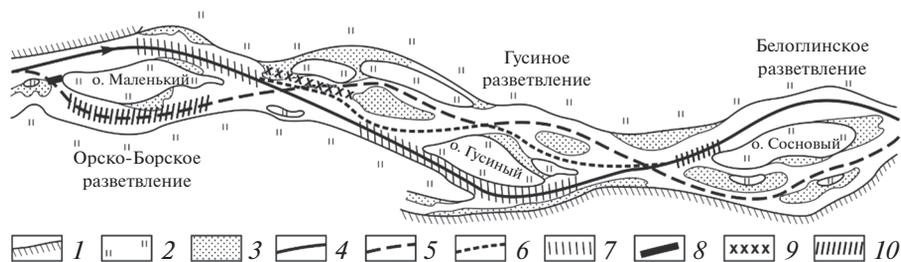


Рис. 7. Регулирование русла с использованием закономерностей развития сопряженных разветвлений и разработка карьеров, приведшая к его нарушению 1 – коренные берега; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; положение основного потока вследствие саморазвития русла и выполнения дноуглубительных работ; 5, 6 – прошлые положения основного потока; 7 – прорезы по трассе судового хода; 8 – дамба; 9 – отвалы грунта при разработке прорезей; 10 – карьеры.

Fig. 7. Regulation of the channel using the patterns of development of conjugated branches and quarrying, which led to its violation 1 – primary banks; 2 – floodplain; 3 – near-channel shallows; the position of the main stream due to the self-development of the channel and the performance of dredging; 5, 6 – past positions of the main stream; 7 – slots along the route of the ship’s passage; 8 – dam; 9 – soil dumps during the development of slots; 10 – careers.

номерности естественного развития речных русел, современные тенденции и прогнозные оценки их переформирований и либо, следуя им, выполняется превентивное изменение трассы судового хода с минимальными затратами, либо она закрепляется в оптимальном (с точки зрения условий судоходства и естественных процессов) положении, выполняя лишь мероприятия заблаговременно предотвращающие возможные неблагоприятные деформации русла. Таким, ставшим практически хрестоматийным, примером регулирования русла стало выполнение комплекса работ по управлению русловыми процессами с применением так называемого правила “восьмерки” (развития сопряженных разветвлений) на Орско-Борском–Гусином–Белоглинском участке р. Оби (100 км ниже г. Новосибирска), проходящем вдоль коренного берега [32]. Здесь еще в 1970-е годы были проведены капитальные работы, приведшие к закреплению трассы судового хода и стабилизации русла в наиболее благоприятном для судоходства естественном состоянии русла (рис. 7).

Это произошло бы и при саморазвитии русла и со временем привело бы к трансформации верхнего звена в одностороннее разветвление, а в последующем к трансформации всего участка в чередующиеся односторонние разветвления. Этого, однако, не произошло из-за вмешательства карьерных разработок в несудоходном рукаве, произведенных с полным нарушением всех установленных правил и согласований. Карьеры в нижней части рукава с полузапрудами на заходе в него обеспечили бы сохранение сопряженных разветвлений, т.к. водность несудоходных рукавов оставалась в пределах около 30%. Но карьеры были выкопаны по всей длине рукава на глубину, превышающую глубину плесовых ложин, в результате чего произошло перераспределение в него стока, обмеление левого судоходного рукава и начались соответствующие правилу “восьмерки” изменения в остальных звеньях, приводящие к общему ухудшению водного пути; участок вернулся в состояние одного из самых сложных на верхней Оби (рис. 8). Это – пример создания неблагоприятной гидроэкологической обстановки на реке из-за хищнической эксплуатации реки частной фирмой, отсутствия контроля за ее состоянием и использованием речных ресурсов [27].

Разработка капитальных прорезей в рукавах одиночных и сопряженных разветвлений, проходящих вдоль коренных берегов (в соответствии с правилом “ведущего берега” [16], стимулирует обмеление рукавов в пойменных берегах (за островами), и

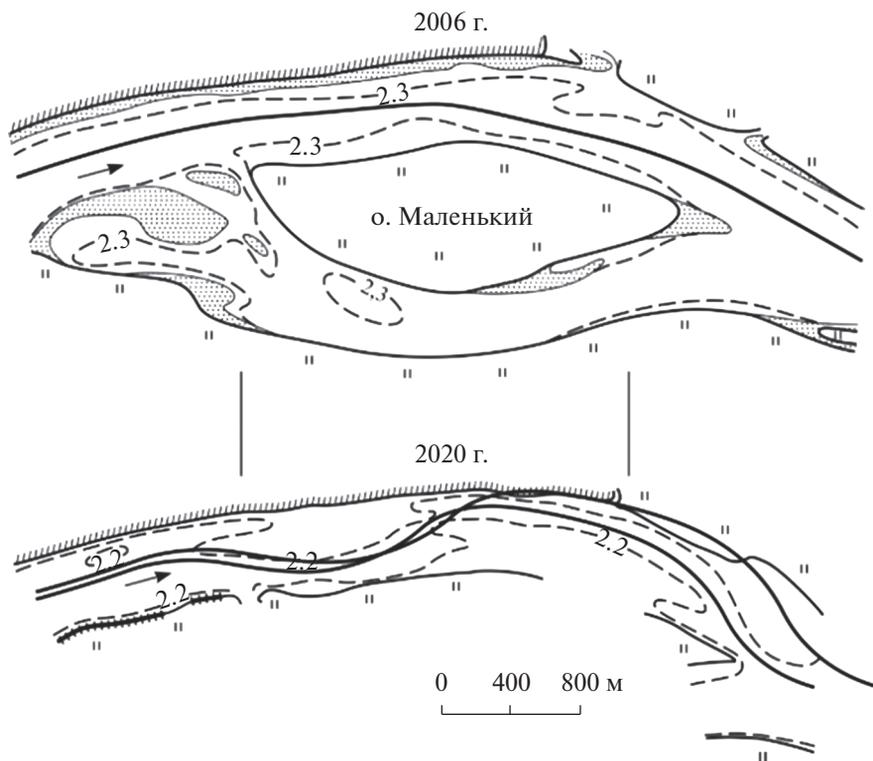


Рис. 8. Обмеление левого судоходного рукава (верхнее звено сопряженных разветвлений на рис. 7) в Орско-Борском разветвлении р. Оби из-за разработки карьера в правом рукаве.

Fig. 8. Shallowing of the left navigable arm (the upper link of conjugated branches in fig. 7) in the Orsk-Bor branch of the Ob river due to quarrying in the right arm.

трансформацию разветвлений в односторонние, причем со временем может произойти полное причленение островов к пойме и формирование относительно прямолинейного, неразветвленного русла возле коренного берега и с односторонней поймой.

Основным следствием воздействия капитальных прорезей и выправительных сооружений на судоходных реках с разветвленным руслом является обеспечение повышенной водности и пропускной способности одного из рукавов каждого одиночного разветвления или звеньев сопряженных разветвлений, что при наличии ведущего коренного берега приводит к их трансформации. Так, бывшие одиночные Тундйские разветвления на р. Вычегде и сопряженные Киреевско-Астраханцевские разветвления на р. Оби после разработки капитальных прорезей в рукавах вдоль ведущего берега превратились в односторонние; на Северной Двине Телеговские сопряженные разветвления благодаря выправительным работам трансформировались сначала в односторонние и одиночное, а затем на всем протяжении участка – в односторонние. Во всех случаях это могло бы произойти естественным путем (саморазвитием форм русла и перераспределением стока в ранее маловодные рукава), но техногенное вмешательство ускорило эти процессы и обеспечило закрепление повышенной водности и большей устойчивости русла рукавов в наиболее выгодном для водного пути условии, что, в свою очередь, способствовало трансформации русла в более морфологически простую форму [32].

На верхней Оби параллельно-рукавное разветвление после разработки серии прорезей и возведения продольных направляющих дамб на участке длиной около 30 км расчленилось на несколько частей со своим типом разветвлений, и лишь во второй части (Усть-Ануйский узел), русло осталось параллельно-рукавным, но сократилась ширина пояса разветвления, сместившегося под влиянием дамбы влево, а бывшая система правого рукава превратилась в обмелевшие и утрачивающие со временем свою водоносность протоки. Ниже по течению, где не проводились выправительные работы, тип русла остался прежним (параллельно-рукавные разветвления). При этом все работы выполнялись на основе естественных тенденций переформирования русла (в частности, в Усть-Ануйском узле в течении XX века наблюдалось постепенное направленное смещение всего русла в сторону левого берега [18]) и привели к тому, что весь участок вышел из числа очень затруднительных для судоходства. В то же время наносы, проходящие через этот участок транзитом, аккумулируются ниже по течению и приводят к активизации деформаций разветвленного русла там, где его регулирование в соответствии с естественными тенденциями выполнено не было.

Иногда антропогенные воздействия на русла и факторы русловых процессов вносят существенные коррективы в развитие русел, причем многократно превышая естественные трансформации. Наиболее существенны для крупных рек регулирование стока воды и перехват наносов водохранилищами, создающими особенно в нижних бьефах совершенно новые условия формирования русла и русловой режим. В нижних бьефах гидроузлов разветвленные русла превращаются в прямолинейные неразветвленные, сопряженные разветвления – в пологие излучины, шпоры которых образованы бывшими островами, примкнувшими к береговой пойме. На меандрирующих реках происходит изменение параметров излучин, которые приспособляются к новым условиям прохождения руслоформирующих расходов воды и дефициту наносов [2, 19, 38–40]. Изменившееся русло при решении транспортных задач в новых условиях требует применения иных методов регулирования по сравнению с теми, которые применялись до создания водохранилища.

Большинство других воздействий на реки при использовании их учета требует учета русловых процессов и возможных местных изменений морфологии русла и его переформирования. Наиболее существенные среди них – разработка карьеров аллювиальных стройматериалов, охватывающая иногда реки на значительном их протяжении (Ока, Томь и др.) и требующая выполнения компенсационных мероприятий для предотвращения негативных последствий [1]. Однако, несмотря на утвержденные научно-обоснованные нормативные документы по разработке карьеров, добывающие предприятия их регулярно нарушают, т.к. требуют дополнительных затрат, что приводит к серьезным отрицательным гидротехническим (как в приведенном выше случае с разветвлением на Оби) и экологическим последствиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трансформация речных русел, т.е. преобразование их морфодинамического типа либо усложнение его разновидностей (подтипов, типов меандрирования или разветвления) осуществляется не только как следствие изменения естественных или антропогенно обусловленных факторов русловых процессов (стока воды и наносов) и техногенных воздействий, но и в процессе саморазвития речных русел. Это происходит из-за изменений основных морфометрических (ширины, глубины) и морфологических (радиусов кривизны, шагов, стрел прогиба излучин, размеров островов, степени разветвленности и др.) параметров русел по мере развития излучин или перераспределения стока между рукавами, из-за размывов берегов и образования аккумулятивных форм, положения русла относительно затопляемой поймы и коренных берегов, появления местного источника поступления наносов и т.д.

Для меандрирующих рек характерной формой трансформации русел в процессе развития излучин является их переход на более высокий структурный уровень меандрирования или морфологическом их усложнении вследствие развития на излучинах разветвлений. Эти трансформации заключаются: 1) в образовании “больших излучин” благодаря развитию прямолинейных “вставок” между ними, вследствие чего пояс меандрирования становится равным ширине днища долины; 2) в формировании петлеобразных излучин, представляющих комбинацию исходной излучины и сегментных излучин на ее крыльях; 3) в разветвлении русла одиночными островами в местных расширениях на прямолинейных вставках и на верхних крыльях больших излучин; 4) в образовании разветвлений в привершинных частях крутых излучин, у которых нарушается условие обтекания потоком берегов; 5) в формировании прорванных излучин, приводящем к рассредоточению стока и изменению параметров русла; 6) в развитии сундучных излучин, представляющих комбинацию вынужденной излучины на подходе реки к коренному берегу, прямолинейного отрезка возле него и адаптированной излучины при отклонении русла в сторону поймы. Такие преобразования следует учитывать не только при водохозяйственном и водотранспортном освоении, т.е. решении практических задач, но и при палеорусловых и палеогидрологических построениях.

В разветвленных руслах их трансформация в процессе саморазвития связана с превращением одиночных и сопряженных разветвлений в односторонние или чередующиеся, во внутридолинной (внутрипойменной) перестройке русловой сети при размыве пойменных перешейков между рукавами, в том числе раздвоенных русел, и между ними и пойменными протоками. Усложнение морфологии разветвлений происходит вследствие расчленения больших островов при встречном размыве берегов в рукавах, а также в узлах слияния рек, когда русло одной из них перехватывается устьевым участком другой. Общая перестройка морфодинамического типа русла происходит при расположении его в процессе переформирования возле коренного берега с выровненными в плане очертаниями.

На трансформацию русла в ходе саморазвития его форм накладываются изменения их параметров и размеров, возникновения осложняющих морфологию новообразований (излучин, разветвлений), происходящих при естественном или антропогенно обусловленном (в нижних бьефах водохранилищ) увеличении или уменьшении водности реки и стока наносов, а также при непосредственном техногенном воздействии на реки. Эти воздействия ускоряют или замедляют естественные процессы, если они опираются на закономерности русловых деформации (такой подход особенно характерен при проведении гидротехнических мероприятий на водных путях), приводя к закреплению, стабилизации и упрощению морфодинамики русла в оптимальном для эксплуатации реки и обеспечении гидроэкологической безопасности состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович К.М. Русловые процессы и русловые карьеры. М.: Географ. Ф-т МГУ. 2005. 109 с.
2. Беркович К.М. Русловые процессы на реках в сфере влияния водохранилищ. М.: Географ. ф-т МГУ. 2012. 163 с.
3. Гендельман М.М. Исследование свободного меандрирования речных русел (на примере нижнего Иртыша) // Геоморфология. 1988. № 3. С. 38–46.
4. Инженерно-географические проблемы проектирования и эксплуатации крупных равнинных водохранилищ. М.: Наука, 1972. 240 с.
5. Клавен А.Б., Виноградов В.А., Костюченко А.А. Неравновесные процессы в формировании речных русел // Маккаевские чтения. 2004. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2005. С. 8–25.
6. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.
7. Куракова А.А., Чалов П.С. Морфодинамика русла нижнего Иртыша // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 98–108.

8. *Лелявский Н.С.* О речных течениях и формировании речного русла // Тр. 2-го съезда инженеров-гидротехников в 1893 г. СПб., 1893 (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 18–136).
9. *Львовская Е.А.* Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках севера ЕТР. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ. 2016. 30 с.
10. *Львовская Е.А., Чалов Р.С.* Морфодинамика русел больших рек севера ЕТР и прогнозные оценки ее изменений // Геоморфология. 2018. № 3. С. 3–23.
11. *Магрицкий Д.В.* Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2015. № 6. С. 85–95.
12. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 347 с.
13. *Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Баслеров С.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н., Шеремяцкая Е.Д.* Основные этапы истории речных долин центра Русской равнины в позднем валдае и голоцене: результаты исследований в среднем течении р. Сейм // Геоморфология. 2001. № 2. С. 19–34.
14. *Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В.* Макроизлучины рек ЕТС и проблемы палеогидрологических реконструкций // Водные ресурсы. 1992. № 4. С. 93–96.
15. *Попов И.В.* Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 328 с.
16. Проектирование судовых ходов на свободных реках / Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. М.: Транспорт. 1964. 262 с.
17. Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. М.: Журнал РТ. 2012. 492 с.
18. Русловые процессы на реках Алтайского региона. М.: МГУ. 1996. 244 с.
19. *Серебряков А.А.* Русловые процессы на судоходных реках с зарегулированным стоком. М.: Транспорт. 1970. 128 с.
20. Сидорчук А.Ю. Среднеголоценовый этап пониженной водоносности рек и его выражение в морфологии речных излучин // Древние и современные долины и реки: история формирования, эрозионные и русловые процессы. Волгоград: ВГСПУ. 2010. С. 106–117.
21. *Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И.* Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269.
22. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД. 2011. 960 с.
23. *Чалов Р.С.* Управление русловыми процессами как важнейший элемент эффективности использования водных ресурсов // Тр. Акад. проблем водохоз. наук. 2014. Вып. 12. С. 39–45.
24. *Чалов Р.С.* Управление русловыми процессами, техногенные воздействия на русла рек и проблемы гидроэкологической безопасности // Вест. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2022. Т. 32. Вып. 2. С. 184–191.
25. *Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В.* Речные излучины. М.: Изд-во МГУ. 2004. 371 с.
26. *Чалов Р.С., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н.* Размывы пойменных берегов и эволюция форм русел рек как факторы перестройки русловой сети // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2022. № 5. С. 29–40.
27. *Чалов Р.С., Павлушкин С.В., Рулева С.Н.* Техногенные воздействия на р. Обь в пределах Новосибирской агломерации и их влияние на русловые процессы и водные пути // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. Вып. 5, Ч. 1. СПб.: Изд-во Гумрф им. дм. С.О. Макарова. 2021. С. 29–39.
28. *Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Г.Б.* Формирование, эволюция и временная трансформация параллельно-рукавных разветвлений речных русел // Географический вестник. 2020. № 4(55). С. 110–125.
29. *Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Кирик О.М., Прокотьев В.П., Андросов И.М., Сахаров А.И.* Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. 2016. № 3. С. 22–35.
30. *Чалов Р.С., Кирик О.М., Ильясов А.К., Ботавин Д.В.* Временная трансформация сложноразветвленного русла крупнейшей реки (на примере приалданского участка р. Лены) // Геоморфология. 2014. № 1. С. 92–103.
31. *Чалов С.Р.* Гидрологические функции разветвленного русла. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 2007. 25 с.
32. *Чалов Р.С.* Временная трансформация морфодинамических типов русел больших равнинных рек // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2018. № 3. С. 3–13.
33. *Чалов Р.С.* Трансформация разветвленных русел рек: факторы, условия, причины // Геоморфология. 2020. № 4. С. 15–33.

34. Чалов Р.С., Куракова А.А., Рулева С.Н. Формирование прорванных излучин и образование разветвлений на меандрирующих реках // Изв. РГО. 2022. Т. 154. № 5–6. С. 73–85.
35. Чалов Р.С., Рулёва С.Н. Влияние переформирований русел на развитие узлов слияния рек // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 161–168.
36. Чалов Р.С., Чалов С.Р. Дискретные свойства русловых процессов и их отражение в морфодинамике речных русел // Изв. РАН. Серия географ. 2023. Т. 87. № 2. С. 1–16.
37. Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Тр. Геол. Ин-та АН СССР. Сер. Геологич. 1951. Вып. 135. № 55. 275 с.
38. Школьный Д.И., Чалов Р.С., Семаков В.А., Сахаров А.И. Перекатный участок Порги в нижнем течении р. Яна: современное состояние прогнозные оценки, методы выправления // Речной транспорт (XXI век). 2023. № 1. С. 18–22.
39. Babinski Z. Procesy korytowe Wisly ponizej zapory wodntj we Wloclawku / Dokumentacja geograficzna. Z. 1–2. 1982. 92 p.
40. Babinski Z. Wspolczesne procesy korytowedolnej Wisly / Prace geograficzne. № 157. Wroclaw-Warsawa-Krakow, 1997. 197 p.
41. Babinski Z. Wpiyw zapir procys korytowe rzek aluwialnych. Bydgoszcz: Wyd. Arad. 39. Bydgoskiej im. K. Wielkiego. 2002. 185 p.
42. Cotard L., Dupeyrat I., Gaulier E., Cared-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigation altug a rapily river bank application to the Lena river (Central Sibeeria) // Earith Surface and Landformes. 2003. V. 28. P. 1349–1359.

Transformation of River Channels in the Process of their Self-Development and Influence of Natural and Anthropogenic Changes in the Factors of Channel Processes

R. S. Chalov¹, *, A. A. Kurakova¹, **, G. B. Golubtsov¹, *, and A. S. Zavads kij¹, ******

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

**E-mail: rschalov@mail.ru*

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

****E-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru*

*****E-mail: az200611@rambler.ru*

Abstract—In article analyze the main ways of river channels transformation, their morphodynamic type, its complication or transition from one structural level of channel processes to a higher one, in the course of self-development of channel forms. On meandering rivers meanders in the process of development turn into large meanders with rectilinear “inserts” between adjacent forms, into loop-like meanders, which are a combination of the original in the near-top part and segmental ones on their wings. Other way – into chest meanders when the river approaches the bedrock bank (forced bend), elongation of the lower wing along it and the formation of an adapted bend when the channel deviates towards the floodplain. On rectilinear “inserts” between adjacent large bends and on their upper wings, single branches are formed. In the near-apex parts of steep bends with a violation of the condition of flow around the banks ($r < 2.5b_p$), islands form in local channel extensions due to erosion of the convex bank or due to the rejection of part of the bend spur. For branched channels, under certain conditions, transformation in the process of self-development of single and conjugated branches into unilateral or alternating and intra-valley restructuring of the channel network due to erosion of floodplain isthmuses between branches and floodplain channels is characteristic. These reshaping, leading to the morphodynamic transformation of the channels, are superimposed by natural and anthropogenic changes in water content and sediment runoff and technogenic impacts on the channels, during which the channels are fixed and stabilized in an optimal position for the economic development of rivers. Accounting for the self-development of river channels is necessary in the operation of rivers and the use of water resources, in paleoconditional and paleohydrological analysis, and also in the development of forecasts for channel reformations.

Keywords: channel self-development, braided river, meander, channel reformations, fluvial processes, water and runoff, distribution of water flow, anthropogenic impact

REFERENCE

1. Berkovich K.M. Ruslovye processy i ruslovye kar'ery. M.: Izd-vo Geograf. F-t MGU. 2005. 109 s.
2. Berkovich K.M. Ruslovye processy na rekah v sfere vliyaniya vodohranilishch. M.: Geograf. f-t MGU. 2012. 163 s.
3. Gendel'man M.M. Issledovanie svobodnogo meandrirovaniya rechnyh rusel (na primere nizhnego Irtysha) // Geomorfologiya. 1988. № 3. S. 38–46.
4. Inzhenerno-geograficheskie problemy proektirovaniya i ekspluatatsii krupnyh ravninnyh vodohranilishch. M.: Izd-vo Nauka, 1972. 240 s.
5. Klaven A.B., Vinogradov V.A., Kostyuchenko A.A. Neravnovesnye processy v formirovanii rechnyh rusel // Makkaveevskie chteniya. 2004. M.: Izd-vo Mosk. un-ta. 2005. S. 8–25.
6. Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snizhenko B.F. Osnove gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo prozessa. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 272 s.
7. Kurakova A.A., Chalov R.S. Morfodinamika rusla nizhnego Irtysha // Geomorfologiya. 2022. T. 53. № 4. S. 98–108.
8. Lelyavskij N.S. O rechnyh techeniyah i formirovanii rechnogo rusla. Tr. 2-go s''ezda inzhenerov-gidrotekhnikov v 1893 g. SPb.: 1893 (Voprosy gidrotekhniki svobodnyh rek. M.: Rechizdat, 1948. S. 18–136).
9. L'vovskaya E.A. Retrospektivnyj analiz, sovremennoe sostoyanie i ocenka vozmozhnyh izmenenij ruslovyh processov na bol'shikh rekah severa ETR. Avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. M.: Izd-vo MGU. 2016. 30 s.
10. L'vovskaya E.A., Chalov R.S. Morfodinamika rusel bol'shikh rek severa ETR i prognoznye ocenki eyo izmenenij // Geomorfologiya. 2018. № 3. S. 3–23.
11. Magrickij D.V. Faktory i zakonomernosti mnogoletnih izmenenij stoka vody, vzheshennyh nanosov i teploty Nizhnej Leny i Vilyuya // Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5: Geografiya. 2015. № 6. S. 85–95.
12. Makkaveev N.I. Ruslo reki i erzia v ee basstine. M.: Izd-vo AN SSSR. 1955. 347 s.
13. Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Baslerov S.V., Borisova O.K., Kovalyuh N.N., SHEREMECKAYA E.D. Osnovnye etapy istorii rechnyh dolin centra Russkoj ravniny v pozdnem valdae i golocene: rezul'taty issledovanij v srednem techenii r. Sejm // Geomorfologiya. 2001. № 2. S. 19–34.
14. Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. Makroizluchiny rek ETS i problemy paleogidrologicheskikh rekonstrukcij // Vodnye resursy. 1992. № 4. S. 93–96.
15. Popov I.V. Deformatsii rechnyh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. L.: Gidrometeoizdat. 1965. 328 s.
16. Proektirovanie sudovyh hodov na svobodnyh rekah / Tr. CNIIEVT. 1964. Vyp. 36. 262 s.
17. Ruslovye processy i vodnye puti na rekah bassejna Severnoj Dviny. M.: Zhurnal RT. 2012. 492 s.
18. Ruslovye processy na rekah Altajskogo regiona. M.: Izd-vo MGU. 1996. 244 s.
19. Serebryakov A.A. Ruslovye processy na sudohodnyh rekah s zaregulirovannym stokom. M.: Izd-vo Transport. 1970. 128 s.
20. Sidorchuk A.Yu. Srednegolocenovyj etap ponizhennoj vodonosnosti rek i ego vyrazhenie v morfologii rechnyh izluchin // Drevnie i sovremennye doliny i reki: istoriya formirovaniya, erozionnye i ruslovye processy. Volgograd: VGSPU. 2010. S. 106–117.
21. Frolova N.L., Magrickij D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gel'fan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Stok rek Rossii pri proiskhodyashchih i prognoziruemym izmeneniyah klimata: obzor publikacij. 1. Ocenka izmenenij vodnogo rezhima rek Rossii po dannym nablyudenij // Vodnye resursy. 2022. T. 49. № 3. S. 251–269.
22. Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnyh rusel. M.: Izd-vo KRASAND. 2011. 960 s.
23. Chalov R.S. Upravlenie ruslovymi processami kak vazhnejshij element effektivnosti ispol'zovaniya vodnyh resursov // Tr. Akad. problem vodohoz. nauk. 2014. Vyp. 12. S. 39–45.
24. Chalov R.S. Upravlenie ruslovymi processami, tekhnogennye vozdejstviya na rusla rek i problemy gidroekologicheskoi bezopasnosti // Vest. Udmurt. un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle. 2022. T. 32. Vyp. 2. S. 184–191.
25. Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Panin A.V. Rechnye izluchiny. M.: Izd-vo MGU. 2004. 371 s.
26. Chalov R.S., Kurakova A.A., Mihajlova N.M., Ruleva S.N. Razmyvy pojmnennyh beregov i evolyuciya form rusel rek kak faktory perestrojki ruslovoj seti // Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5: Geografiya. 2022. № 5. S. 29–40.
27. Chalov R.S., Pavlushkin S.V., Ruleva S.N. Tekhnogennye vozdejstviya na r. Ob' v predelakh Novosibirskoj aglomeratsii i ih vliyanie na ruslovye processy i vodnye puti // Vodnye puti i ruslovye processy. Gidrotekhnicheskije sooruzheniya vodnyh putej. Vyp. 5. Ch. 1. SPb.: Izd-vo Gumrf im. dm. S.O. Makarova. 2021. S. 29–39.
28. Chalov R.S., Berkovich K.M., Rulyova S.N., Zavadskij A.S., Golovlyov P.P., Golubcov G.B. Formirovanie, evolyuciya i vremennaya transformaciya parallel'no-rukavnyh razvetvlenij rechnyh rusel // Geographical Bulletin. 2020. № 4(55). S. 110–125.

29. Chalov R.S., Zavadskij A.S., Ruleva S.N., Kirik O.M., Prokop'ev V.P., Androsov I.M., Saharov A.I. Morfologiya, deformacii, vremennye izmeneniya rusla r. Leny i ih vliyanie na hozyajstvennyuyu infrastrukturu v rajone g.yakutska // Geomorfologiya. 2016. № 3. S. 22–35.
30. Chalov R.S., Kirik O.M., Il'yasov A.K., Botavin D.V. Vremennaya transformaciya slozhnorazvetvlennoogo rusla krupnejshej reki (na primere prialdanskogo uchastka r. Leny) // Geomorfologiya. 2014. № 1. S. 92–103.
31. Chalov S.R. Gidrologicheskie funkicii razvetvlennoogo rusla. Avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. M.: Izd-vo MGU, 2007. 25 s.
32. Chalov R.S. Vremennaya transformaciya morfodinamicheskikh tipov rusel bol'shish ravninnyh rek // Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5: Geografiya. 2018. № 3. S. 3–13.
33. Chalov R.S. Transformaciya razvetvlennyh rusel rek: faktory, usloviya, prichiny // Geomorfologiya. 2020. № 4. S. 15–33.
33. Chalov R.S., Kurakova A.A., Ruleva S.N. Formirovanie prorvannyh izluchin i obrazovanie razvetvlenij na meandriruyushchih rekah // Izv. RGO. 2022. T. 154. № 5–6. S. 73–85.
34. Chalov R.S., Rulyova S.N. Vliyanie pereformirovanij rusel na razvitie uzlov sliyaniya rek // Geografiya i prirodnye resursy. 2014. № 1. S. 161–168.
35. Chalov R.S., Chalov S.R. Diskretnye svojstva ruslovnyh processov i ih otrazhenie v morfodinamike rechnykh rusel // Izv. RAN. Seriya geograf. 2023. T. 87. № 2. S. 1–16.
36. Shancer E.V. Allyuvij ravninnyh rek umerennogo poyasa i ego znachenie dlya poznaniya zakonornostej stroeniya i formirovaniya allyuvial'nyh svit // Trudy Geol. In-ta AN SSSR. Ser. Geologich. 1951. Vyp. 135. № 55. 275 s.
37. Shkol'nyj D.I., Chalov R.S., Semakov V.A., Saharov A.I. Perekatnyj uchastok Porgi v nizhnem techenii r. Yana: sovremennoe sostoyanie prognoznye ocenki, metody vypravleniya // Rechnoj transport (XXI vek). 2023. № 1. S. 18–22.
38. Babinski Z. Procesy korytowe Wisly ponizej zapory wodntj we Wloclawku / Dokumentacja geograficzna. Z. 1–2. 1982. 92 p.
39. Babinski Z. Wspolczesne procesy korytowedolnej Wisly / Prace geograficzne. № 157. Wroclaw-Warsawa-Krakow, 1997. 197 p.
40. Babicki Z. Wpiyw zapür procsy korytowe rzek aluwialnych. Bydgoszcz: Wyd. Arad. 39. Bydgoskiej im. K. Wielkiego. 2002. 185 p.
41. Cotard L., Dupeyrat I., Gaulier E., Cared-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigation altug a rapily river bank application to the Lena river (Central Sibeeria) // Earith Surface and Land-formes. 2003. V. 28. P. 1349–1359.