

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ РУСЛА БОЛЬШОЙ РЕКИ ВО ВНУТРИГОРНОЙ КОТЛОВИНЕ (НА ПРИМЕРЕ р. ЯНЫ В ПРЕДЕЛАХ КУЛАРСКОГО ГОРНОГО МАССИВА)[#]

© 2024 г. Д. И. Школьный^{1, *}, Р. С. Чалов^{1, **}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: danila.hydro@yandex.ru

**E-mail: rschalov@mail.ru

Поступила в редакцию 01.05.2023 г.

После доработки 07.08.2023 г.

Принята к публикации 13.10.2023 г.

Врезанные галечно-валунные русла крупных рек в горах (в том числе — Яны на ее горном участке) достаточно хорошо изучены с точки зрения морфологии и истории формирования. Однако местные условия, возникающие в расширениях долины в пределах внутригорных котловин, приводят к проявлению специфических особенностей развития русла и его морфологии — в данном случае, формированию пальцеобразной излучины. В статье дан анализ истории развития и многолетних (за время формирования поймы) деформаций русла р. Яны на участке “Пороги”, расположенном во внутригорной котловине Куларского хребта, а также описано негативное их влияние на состояние водного пути. На примере этого участка рассмотрены закономерности развития русла крупной реки в условиях действия комплекса факторов — геологического строения котловины (обусловившего активное врезание русла), стока воды и состава русловых наносов. Приведены характеристики смещения и искривления излучины в условиях выхода в русло скальных пород, вскрывающихся в процессе горизонтальных переформирований, и подпора потока от нижерасположенного сужения долины. Рассчитаны интервалы расходов воды, при которых возможно смещение перекатов, и их продолжительность. Дан прогноз дальнейшего развития русла и обоснованы рекомендации по его регулированию в целях обеспечения устойчивого судоходства.

Ключевые слова: русловые процессы, врезанное русло, внутригорная котловина, излучина, порог, шивера, перекаты

DOI: 10.31857/S2949178924010025, EDN: IRXBSM

ВВЕДЕНИЕ

Большие реки, протекающие в горных областях или пересекающие горные массивы, характеризуются относительно небольшими продольными уклонами (до 0.2–0.5 ‰), галечно-валунным составом руслообразующих наносов и преимущественно врезанным руслом (беспойменным или имеющим очень узкую, меньшую чем ширина самого русла пойму). В отношении русловых процессов эти реки относятся к наименее изученным, поскольку переформирования их русел и движение наносов очень замедлены, и до второй половины XX в. их

можно было не учитывать при решении практических задач из-за слабой освоенности долин рек в горных странах. Поэтому они включены лишь в некоторые классификации (Чалов, 1979, 2008; Ржаницын, 1985; Rosgen, 1994), или упоминаются в общем виде как “врезанные излучины горных рек”, “скальные острова” и “многоорукавные на горных реках” в работах китайских ученых (Чалов и др., 2000). При этом, как это часто бывает, к горным относятся, в том числе, большие реки, протекающие по горным территориям, но имеющие спокойное течение, т.е. являющиеся по типу русловых процессов равнинными (Чалов, 2002). Главное внимание в работах, посвященных рекам с врезанным руслом в горах, уделяется врезанным излучинам и макроизлучинам, отражающим по своим размерам более многоводные геологические эпохи, вследствие чего их параметры используют

[#] Ссылка для цитирования: Школьный Д.И., Чалов Р.С. (2024). Особенности формирования и деформации русла большой реки во внутригорной котловине (на примере р. Яны в пределах Куларского горного массива). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 1. С. 13–25. <https://doi.org/10.31857/S2949178924010025>; <https://elibrary.ru/IRXBSM>

ся для палеогидрологических построений (Dury, 1965; Матвеев, Панин, 1988; Матвеев и др., 1992).

В 70–90-е годы XX в. произошел своеобразный пик в исследованиях врезанных русел ряда протекающих в горах больших рек Восточной Сибири и Дальнего Востока — верхней и средней Лены, Витима, Алдана, Яны, верхнего Амура (Борсук, Чалов, 1973; Матвеев, Панин, 1982; Панин, 1990, 1991; Гурин, Лодина, 1994; Борсук и др., 1995; Долженко и др., 1995; Зайцев и др., 1998; Нижняя Яна..., 1998; Борсук и др., 2001; Гусев, 2002), позволивший дать разностороннюю характеристику условий формирования, морфологии и деформации галечно-валунных русел рек этих регионов на разных уровнях их проявления (от макроформ самого русла — макроизлучин и протяженных прямолинейных участков до перекатов как грядовых галечно-валунных форм руслового рельефа и движения отдельных крупных частиц аллювия), сделать обобщения (Беркович и др., 1985; Зайцев, 1989; Зайцев, Савцова, 1994) и выявить некоторые общие закономерности морфодинамики и гидроморфологии врезанных русел (Чалов, 2008, 2011). Среди таких рек, на которых зачастую впервые проводились исследования русловых процессов, — р. Яна на участке пересечения ею Куларского хребта. На примере ее врезанного русла были установлены наиболее существенные особенности формирования макроизлучин в горных условиях (Матвеев, Панин, 1988; Коротаев и др., 1990; Матвеев и др., 1992). Однако наряду с собственно врезанным руслом на р. Яне в пределах Куларского хребта встречаются сравнительно короткие (20–25 км) местные расширения днища долины, в которых формируется переходный тип русла от врезанного к широкопойменному — адаптированное, по морфодинамической классификации МГУ (Чалов, 2008), или широкопойменное, характеризующееся наличием неширокой поймы, в основном высокой и на значительной части — редко затопливаемой. Русло здесь формирует разветвления и излучины, может быть прямолинейным неразветвленным, проходящим вдоль коренного берега при односторонней пойме. Борта современного днища долины (пойма, русло) представлены разновысотными террасами с цоколем, сложенным коренными породами. На смежных участках врезанного русла коренные берега реки размываются (отступают) со скоростью 0.2 м/год (Матвеев и др., 1992). В пределах котловины, где поток воздействует на уступы террас, скорость

отступления возрастает на порядок, составляя от 1–1.5 до 2.5–3 м/год, а иногда и больше.

Подобные участки есть и на других больших реках, протекающих в горах и имеющих врезанные русла, но ни одна из приведенных публикаций не содержит характеристики русел при пересечении реками внутригорных котловин (впадин), хотя именно на таких коротких участках формирование русла отличается специфическими особенностями, а сами русла оказываются наиболее сложными, в первую очередь, для транспортного использования рек, а иногда и для других видов их хозяйственного освоения. Отсюда задача настоящей статьи: на основе выполненных натурных исследований участка р. Яны “Пороги”, анализа имеющихся картографических материалов и космических снимков, а также результатов гидродинамического моделирования рассмотреть специфические особенности формирования русла большой реки в пределах внутригорной впадины и обосновать рекомендации для улучшения судоходных условий.

ОБЪЕКТ, МЕТОДИКА И ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Река Яна, одна из больших рек Северо-Востока России, пересекает в antecedentной долине Куларский хребет, расположенный в области активных тектонических структур Верхоянской горной области (Русанов, Бороденкова и др., 1967; Баранова, Бискэ и др., 1968). При пересечении хребта русло реки врезанное, образует 11 макроизлучин (Матвеев и др., 1992), пойма отсутствует или представлена узкими фрагментами (ширина поймы $B_p \ll$ ширины русла b_p) возле выпуклых берегов. На участке “Пороги” в осевой зоне хребта река протекает через Черчинско-Босхонгскую впадину (Отчет..., 1985). Долина здесь расширяется почти в 2 раза, имеется пойма (шириной до 3–4 ширины русла), русло сформировало крупную смещающуюся излучину, а сам участок представляет собой нижнее крыло макроизлучины (рис. 1).

Яна относится к рекам с восточносибирским типом гидрологического режима, характеризующегося весенним половодьем и мощными летними паводками, которые начинаются на спаде половодья, вследствие чего летняя межень практически отсутствует. Максимальный наблюдаемый расход воды в низовьях реки составил 19400 м³/с, расходы воды во время паводков превышают расходы половодья в 15% случаев на гидропосту (г/п)

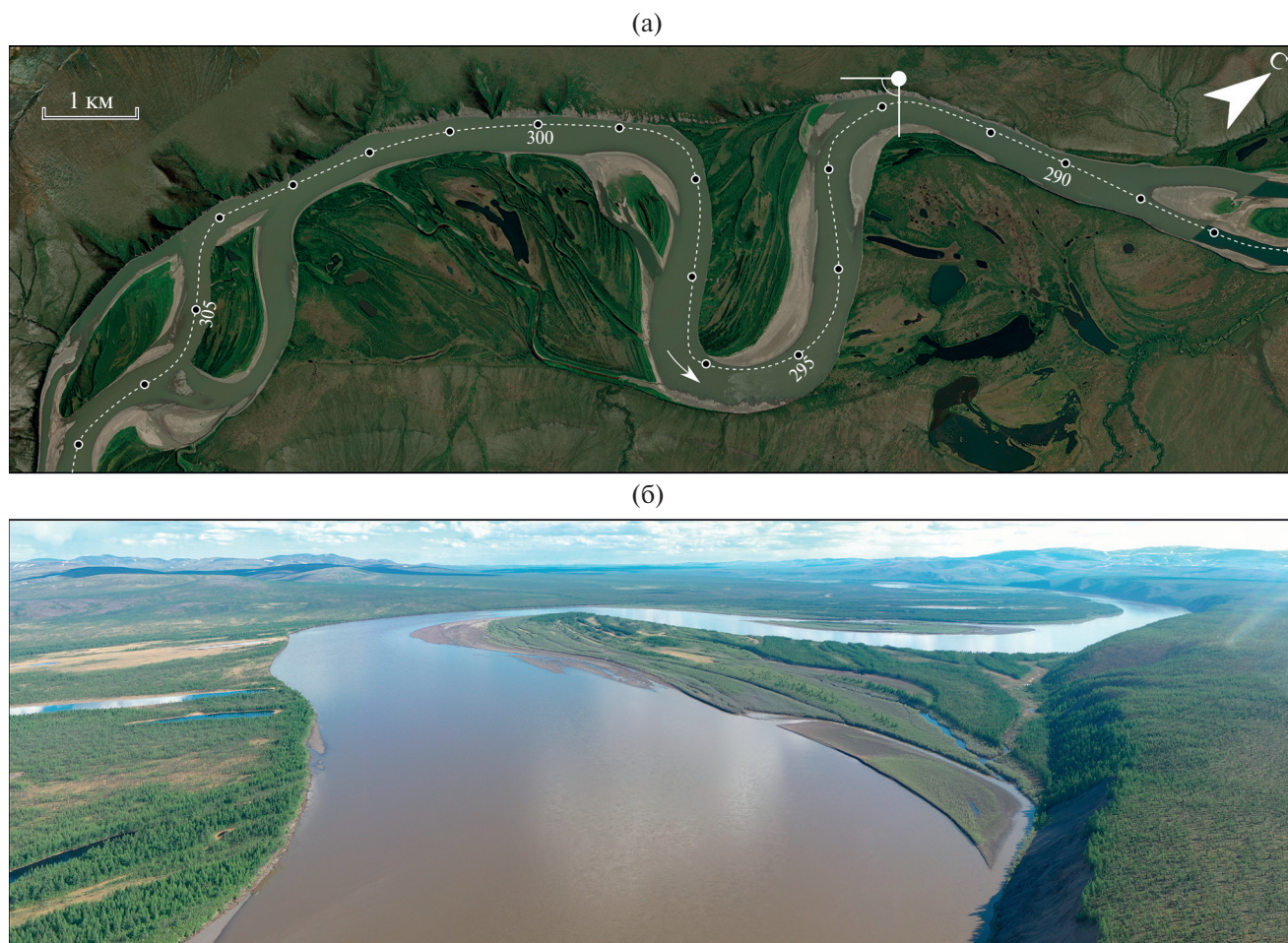


Рис. 1. Река Яна во внутригорной впадине (Черчинско-Босхонгской депрессии) — участок “Пороги”: (а) — космический снимок Sentinel 18.06.2022 с указанием положения судового хода и километров по нему и точки съемки с БПЛА; (б) — вид на участок с БПЛА (высота съемки — 200 м над уровнем воды).

Fig. 1. The Yana River in the intermountain basin (Chercha-Boskhong depression) — the “Porogi” site: (a) — Sentinel image, June 18, 2022, with fairway and kilometres along it and UAV camera location; (b) — UAV view of the site from 200 meters above the water.

Юбилейная (ниже выхода реки из гор) и в 40% — на г/п Джангкы (выше Куларского участка). Специфической особенностью гидрологического режима Яны является ее перемерзание в зимнее время на период до 134 дней.

Какие-либо сведения о нижнем течении Яны практически отсутствовали до конца XIX в., когда были осуществлены первые экспедиции (А.А. Бунге и Э.В. Толля в 1895 г., К.А. Воллосовича в 1909 г.), давшие представления о географических и гидрологических особенностях реки. В советское время бассейн Яны был отнесен к регионам перспективного освоения, а сама река как важная транспортная артерия приобрела большое значение. Первое детальное описание и лоция нижнего течения реки, в том числе участка “Янских порогов”, были составлены Якутской экспедици-

ей АН СССР 1927–1929 гг. (Хмызников, 1934). Результаты этих работ позволили осуществить первые проводки судов по реке, и с 1939 г. было открыто регулярное судоходство до г. Верхоянска. В последующий период составлялись и издавались лоцманские карты (1945, 1966, 1978, 1994 гг.), проводились съемки отдельных порогов. Первое же научное исследование морфологии и динамики русла нижней Яны, в том числе на Куларском участке, было выполнено лишь в 1985–1987 гг. (Нижняя Яна..., 1998), когда была осуществлена съемка глубин и распределения руслообразующих наносов, произведена оценка переформирования русла на основе анализа лоцманских карт, и на основе полученных данных были проведены расчеты русловых деформаций. Однако в результатах этих исследований участок “Пороги” лишь кратко

упоминается; особенности же русла во внутригорной котловине не получили должного освещения и в других публикациях по итогам этих исследований (Матвеев, Панин, 1988; Панин, 1990; Матвеев и др., 1992).

Свое название участок получил по наличию выходов скал в русле, создающих перегиб продольного профиля реки (уклоны здесь увеличиваются до 0.8‰ против 0.1–0.2‰ выше и ниже по течению) и перегораживающих русло почти на 2/3 его ширины, образуя со стороны вогнутого берега крутой излучины шиверу, занимающую часть поперечника русла и на всех картах называемую порогом. Скальные выходы приурочены к пересечению ослабленных зон разломов (Русанов и др., 1967; Отчет, 1985).

Шивера расположена в вершине крутой излучины, подходящей к правому борту днища долины (рис. 1). Параметры излучины составляют: радиус кривизны в привершинной части $r=800$ м, шаг $L=2$ км, степень развитости $l/L=3.4$ (здесь l — длина русла по излучине). Вследствие наличия шиверы в нарушение нормального для меандрирующего русла руслового рельефа линия наибольших глубин и динамическая ось потока прижаты к левому берегу, а к вогнутости правого берега приурочены выходы скал, грядобразная поверхность которых постепенно повышается к берегу, и у подножья террасы ее высота достигает 1.5 м над урезом (в низкую межень). Под левым выпуклым берегом глубина русла — до 3 м, из-за стеснения скалами его ширина в межень уменьшается до 70 м. Скорости потока по длине порожистого участка — не менее 2.2 м/с, максимальные наблюдаются на спаде половодья (паводков) — до 3.2 м/с в среднем по сечению и 4 м/с — на стрежне.

Шивера представляет собой разборную скалу в виде крупных плит, в ее рельефе читаются отдельные выступающие блоки с узкими ложбинами между ними. Стоячие волны над блоками и водоскаты над ложбинами между скалами создают заметные глазу перепады высот водной поверхности — этим обуславливается визуально пугающий облик и устойчивое название участка (“Янские пороги”). Значительная кривизна русла на подходе к шивере в сочетании с высокими скоростями потока приводит к затруднениям для судоходства.

Порожистые участки, сформированные скальными выходами, нередко встречаются на крупных реках Сибири с врезанными руслами (Казачинский и Осинковский пороги на Енисее,

Стрелковский порог и шиверы в нижнем течении Ангары, пороги на Нижней и Подкаменной Тунгусках, некоторые участки на средней Лене, Алдане, Витиме). Однако Янские пороги не имеют прямых аналогов, выделяясь расположением скал в вершине крутой излучины в пределах внутригорной впадины с широкопойменным руслом. В отличие от порожистых участков на других реках, высокие темпы деформаций русла на Яне выражаются в постоянном изменении радиусов кривизны русла в вершине излучины и увеличению ширины шиверы, отклоняющей стрежень потока в зону аккумуляции наносов у выпуклого берега. Формирование и устойчивое существование сравнительно глубокой ложбины (3 м) между левым берегом и шиверой возможно только из-за очень высоких скоростей потока.

Русло Яны в целом на участке широкопойменное (рис. 1). На входе во внутригорную впадину оно образует одиночное трехрукавное разветвление, затем располагается вдоль уступов высокой левобережной террасы (высота бровки над меженным уровнем 35–40 м) с коренным скальным цоколем, представленным триасовыми песчаниками и сланцами. Отходя от него, река образует крутую пальцеобразную излучину, вершина которой подходит к правому берегу — к уступам надпойменных террас также с коренным скальным цоколем, который, выступая в русло, формирует шиверу. Возвращаясь к левому борту долины, русло вновь становится относительно прямолинейным, оставляя по правому берегу низкую раннеголоценовую надпойменную террасу, лишь немного превышающую пойму (ее высота над меженным уровнем в нижнем крыле излучины — не более 4.5 м). Пойма здесь практически отсутствует, и, хотя далее река еще протекает в пределах впадины, русло становится уже врезанным, носит плёсовый характер. Таким образом, область активных переформирований русла Яны в пределах впадины ограничивается ее верхней частью, где оно является широкопойменным.

Стоит отметить, что поверхности пойменно-террасового комплекса одного морфологического возраста в условиях направленного врезания реки и значительного изменения ее продольных уклонов за счет обнажения шиверы могут находиться на разной высоте относительно русла. В результате этого, отдельные участки террас — такие, как вышеупомянутый участок на правом берегу ниже шиверы — по-видимому, подтапливаются во время самых высоких (экстремальных) половодий

или паводков или подтапливались в прошедшее столетие. Во избежание терминологической путаницы в дальнейшем по тексту такие участки будут называться “поймой–террасой”.

Руслообразующими наносами, слагающими формы руслового рельефа и образующими аллювиальную отмостку на спаде половодья (паводков) и в межень, являются галечники, слагающие более 80% площади русла с абсолютным преобладанием (77%) по крупности средних и крупных фракций. Они слабо окатаны и имеют местное происхождение, поступая в реку в пределах врезанного русла и при воздействии потока на левобережную террасу на участке. Песчаные наносы различной крупности слагают лишь тыловые части обсыхающих в межень побочней. Аллювиальные отложения террас и поймы и песчаные тыловые части прирусловых отмелей на рассматриваемом участке сцементированы мерзлотой; под большей частью русла мерзлоты нет из-за формирования сквозного талика благодаря фильтрационной способности галечников (Михайлов, 2018). Поверхность террас сильно видоизменена полигонально-трещиноватым рельефом и термокарстовыми озерами вплоть до полного исчезновения первичных аллювиальных форм. Мерзлотные формы рельефа также характерны для высокой поймы, имеющей средне- и позднеголоценовый возраст (Соловьев и др., 2003).

При проведении руслового анализа были использованы все доступные картографические материалы (с 1934 г.) и космические снимки (с 1969 г.), зафиксировавшие состояние русла и дна долины на различные временные срезы, а также материалы полевых исследований участка в 1985–1987 гг., в том числе выполненные тогда расчеты сдвига и транспорта галечных наносов и условий разрушения отмостки. Значительная часть использованных результатов получена в ходе проведенных летом 2022 г. специальных исследований участка “Пороги” для обоснования рекомендаций по оптимизации водного пути в связи с планами экономического развития региона. Эти исследования (Школьный и др., 2023) включали в себя полную съемку и промеры русла, измерения расходов воды и скоростных полей, определение состава руслообразующих наносов и их распределения по руслу, скорости размыва берегов, а также гидродинамическое моделирование в программном комплексе Stream 2D, позволившее получить параметры потока на участке в различных гидрологических условиях и

выполнить прогноз деформаций при реализации различных сценариев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На участке “Пороги”, где р. Яна входит в пределы внутригорной впадины, долина реки расширяется, в том числе до 3 км на уровне дна долины (русло, пойма и пойма-терраса), ограниченного уступами высоких террас с коренным скальным цоколем (рис. 2, (а)). В строении поймы и поймы-террасы отчетливо прослеживаются вытянутые вдоль долины бывшие острова, понижения между которыми представляют собой широкие ложбины, по которым в многоводные фазы режима поступает вода из русла. Рельеф поймы реки отражает развитие русла Яны, представляя собой четыре уровня, в каждом из которых дешифрируются остров и примыкающие к нему пойменные гривы, образовавшиеся благодаря причленению побочней. Ориентировка бывших островов и пойменных грив, в свою очередь, свидетельствует о развитии излучин русла. Использование гривистого рельефа пойм по его отображению на аэро- и космических снимках для восстановления положений русла основано еще И.В. Поповым (1955). Применение этого подхода позволило проследить смещение и изменение формы излучины за время формирования поймы и перемещение ее вершины к правому борту дна долины.

Смещение и последовательное искривление излучины происходило благодаря формированию (и росту за счет причленения побочней) островов в ее верхнем крыле, причем их размеры (длина, ширина) уменьшались с развитием кривизны русла, а ориентировка островов (их продольной оси) становилась направленной под все большим углом к оси дна долины. Отмирание рукавов между островами и правобережной поймой приводило к причленению островов к пойме и увеличению размеров всего пойменного массива. Конфигурация гривисто-островного рельефа поймы свидетельствует о преобладавшем продольном смещении излучины вниз по долине со значительным превышением скорости смещения верхнего крыла над нижним, в результате чего произошло ее сжатие, и к настоящему времени излучина из пологой сегментной приняла крутую пальцеобразную форму с малыми радиусами кривизны (рис. 2, (б)). Осредненная за период с 1969 г. площадь размыва левого берега на верхнем крыле излучины превышает аналогичную площадь размыва правого бере-

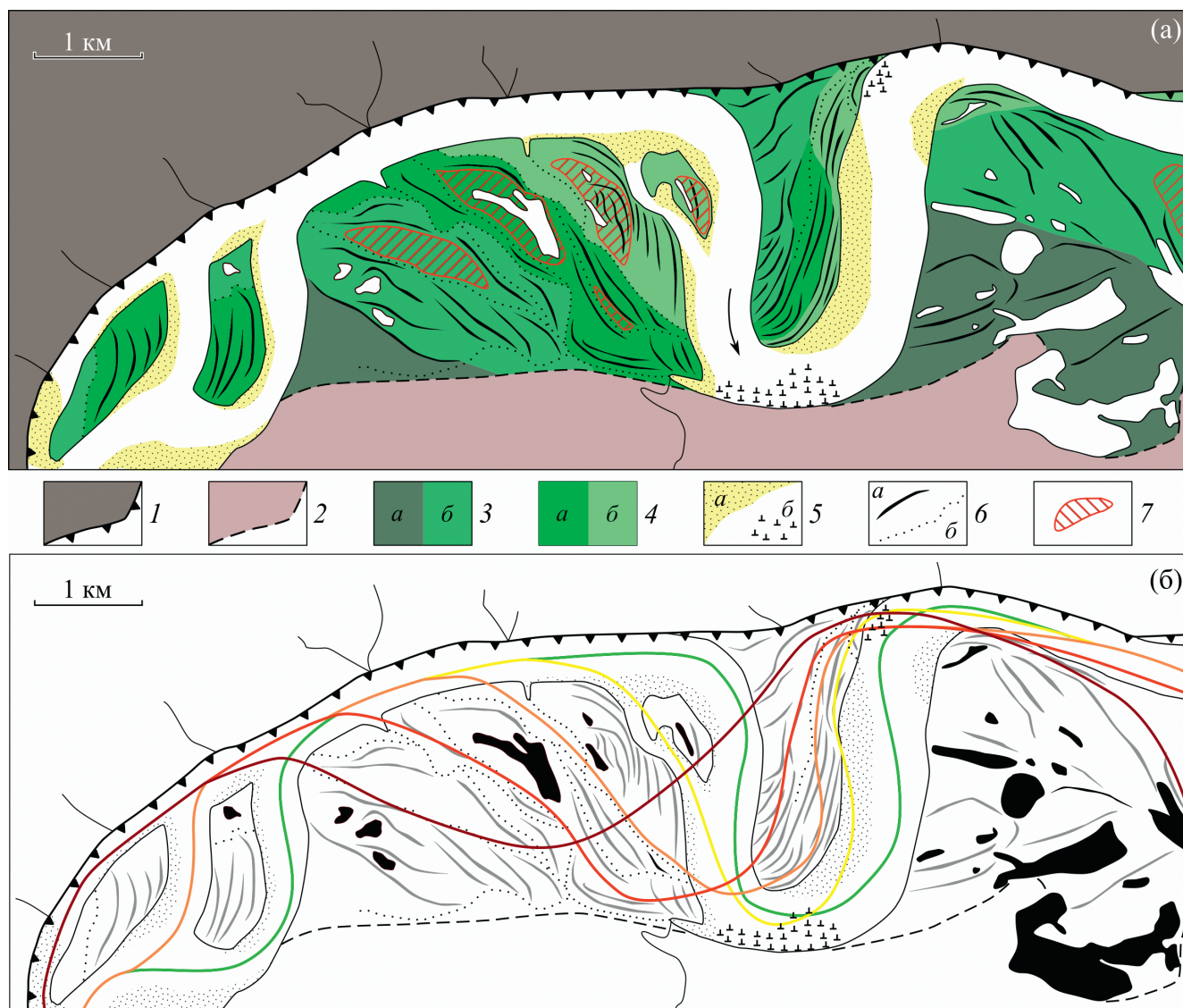


Рис. 2. (а) — Геоморфологическая схема участка «Пороги» в пределах внутригорной впадины. 1 — 4-я среднеплейстоценовая цокольная терраса и ее бровка; 2 — 3-я и 2-я позднплейстоценовые цокольные террасы; 3а — 1-я терраса (пойма-терраса), 3б — высокая пойма; 4 — регулярно затапливаемая молодая пойма (а — средняя, б — низкая); 5а — прирусловые отмели, 5б — скальные выходы в русле; 6а — пойменные гряды, 6б — пойменные ложбины; 7 — контуры бывших островов в рельефе поймы. (б) — Реконструкция последовательных положений русла (по оси потока) за время формирования поймы на участке «Пороги» (цвет изменяется от бордового к зеленому с уменьшением возраста).

Fig. 2. (a) — Geomorphological scheme of the «Porogi» site within the intermountain basin. 1 — 4th Middle Pleistocene high-basement terrace and its ledge to the river; 2 — 3rd and 2nd Late Pleistocene basement terraces; 3a — 1st terrace («floodplain-terrace»), 3b — high floodplain; 4 — regularly flooded young floodplain (a — medium, b — low); 5a — near-channel shoals, 5b — rock outcrops in the channel; 6a — meander scars, 6b — floodplain gullies; 7 — contours of former islands in the floodplain relief. (b) — Reconstruction of the sequential channel positions (along the flow axis) during the floodplain formation on the «Porogi» site (the color changes from burgundy to green with floodplain age decreasing).

га на нижнем крыле на четверть (табл. 1). Причем, если в верхнем крыле берег размывается по всей его длине, то в нижнем размыв охватывает только его часть, формируя в нем вогнутость, нижний участок которой способствует отклонению стрежня потока к середине русла. Различие в скоростях размыва берегов указывает на продолжающееся

сжатие излучины и связано с разной структурой размываемых берегов: если в верхнем крыле излучины это мерзлые гравелистые пески (отложения самого древнего на участке массива поймы), то в нижнем ее крыле правый размываемый берег является поймой-террасой, сложенной почвенно-мерзлотными отдельностями.

Таблица 1. Характеристика размываемых берегов в пределах пальцеобразной излуины**Table 1.** Characteristics of eroded banks of the finger-shaped bend

Годы	Левый берег в верхнем крыле			Правый берег в нижнем крыле		
	Площадь размыва, тыс. м ²	Средняя скорость, м/год	Макс. скорость, м/год	Площадь размыва, тыс. м ²	Средняя скорость, м/год	Макс. скорость, м/год
1969–1980	74.6	2.5	4.6	66.5	2.8	5.1
1980–2001	72.9	1.6	2.9	75.2	1.5	3.6
2001–2007	41.3	3.6	9.7	16.2	2.0	3.8
2007–2022	64.7	1.6	2.4	49.6	1.4	2.3

Такое сжатие излуины приводит к нарушению условия безотрывного обтекания берегов на излуине (правило Миловича — $r < 2.5b_p$), причем радиус кривизны r лишь немного превышает ширину самого русла, вследствие чего динамическая ось потока в привершинной части излуины смещается к выпуклому берегу. В данном случае этому способствует медленный размыв правого вогнутого берега излуины, представленного уступом высокой цокольной террасы, сопровождающийся расширением скального выступа (сужающего стрежневую зону русла) и ростом стрелы прогиба.

Разновысотность уровней поймы (начиная с поймы-террасы и далее понижающейся от самой древней к молодой, современной) в пределах 1–1.5 м между каждым из уровней является следствием направленного врезания реки, характерного для всего куларского участка. По расчетам Б.В. Матвеева и др. (1992), компенсирующая тектоническое поднятие Куларского хребта скорость врезания равна 0.7 мм/год. Эта величина представляется сильно заниженной, поскольку характерна для рек равнинно-платформенных территорий. Для горных стран она существенно выше и по другим расчетам для Яны на куларском участке составляет 5–10 мм/год (Чалов и др., 2020). По другим данным, скорости врезания рек в горах достигают 7 см/год (Чалов, 2008). Врезание реки обуславливает рост высоты поймы и редкую затопляемость значительной ее части.

Повышение отметок поверхности прирусловой части правобережной поймы в шпоре излуины вдоль ее верхнего крыла происходит также благодаря наложенным прирусловым валам, формирующимся при переливе воды из русла в пойму в многоводные годы. В результате разливы реки охватывают регулярно только молодую низкую пойму; остальные массивы поймы затопляются с низовой стороны, или (в случае правобережной поймы) вода из русла поступает на них через ложбины — бывшие протоки. Шпора пальцеобразной

излуины со стороны верхнего крыла возвышается над меженным уровнем почти на 5 м (как и прирусловая часть правобережной поймы выше по течению), и транзитное пойменное течение через нее не возникает. В этих условиях естественное спрямление излуины путем образования прорана между крыльями, несмотря на достижение критических значений кривизны, не происходит, и при сохранении современных темпов размыва его можно ожидать не ранее чем через 50 лет, когда будет полностью размыта наиболее древняя и высокая пойма в тыловой части шпоры.

Таким образом, развитие излуины, достижение ею очень крутой формы и слабая затопляемость большей части поймы является следствием интенсивного направленного врезания реки, отсутствия пересекающего шпору излуины транзитного течения и наличия прируслового вала вдоль бровки поймы в верхнем крыле излуины (из-за чего ее затопление происходит с низовой части шпоры). В свою очередь, в половодье (паводки) поток сосредотачивается в русле, способствуя усилению врезания реки.

Наличие описанных выше специфических факторов: 1) регулярного затопления правобережной поймы с нижней по течению стороны, 2) крутой излуины русла, шпора которой со стороны верхнего крыла затопляется очень редко, 3) шиверы у правого вогнутого берега в ее вершине, 4) подхода реки под прямым углом обратно к левому коренному берегу и 5) смены широкопойменного русла врезанным привели к формированию на излуине сложной системы перекатов и значительному изменению профиля водной поверхности при смене фаз водного режима (рис. 3). Шивера и окружающие ее перекаты с точки зрения воздействия на гидравлические условия течения выступают как широкий и протяженный подтопленный водослив (Зайцев, 1999), регулируя за счет изменения подпора русловой режим всего рассматриваемого участка. В межень в подпоре оказывает-

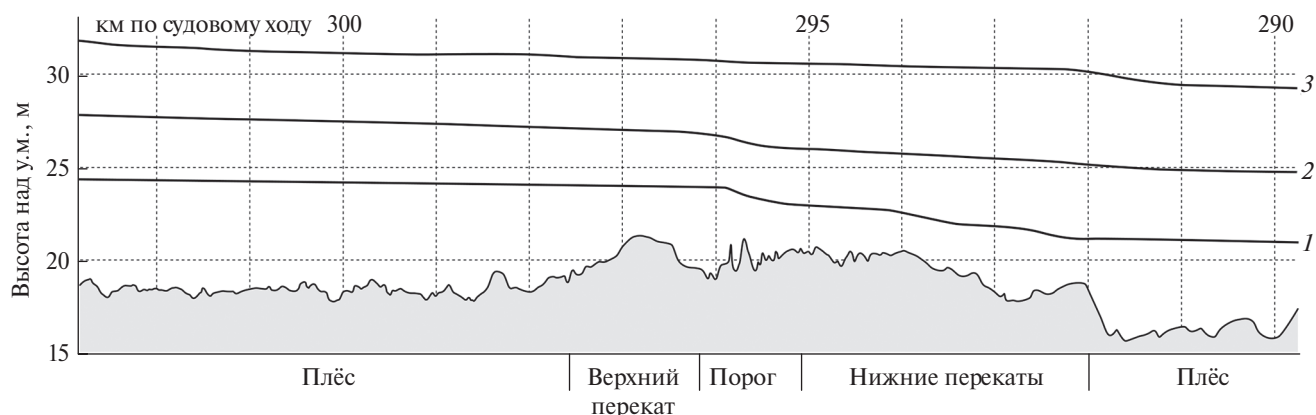


Рис. 3. Рельеф дна русла р. Яны в пределах внутригорной впадины, его макроформы и продольные профили водной поверхности при различных расходах воды: 1 — при проектном уровне (920 м³/с), 2 — во время полевых исследований (4340 м³/с), 3 — при руслонаполняющем (12000 м³/с).

Fig. 3. The shape of the Yana River bottom within the intermountain basin, its macroforms and longitudinal profiles of the water surface at different water discharges: 1 — at lowest navigable water level (920 m³/s), 2 — during field study (4340 m³/s), 3 — bankfull ($Q=12000$ m³/s).

ся участок выше шиверы, ниже нее формируется кривая спада уровней вплоть до нижнего изгиба реки возле левого коренного берега. В многоводные фазы при росте расходов подпор от шиверы при ее затоплении сменяется подпором от левого коренного берега у нижнего изгиба, уклон по всей длине участка выравнивается до 0.13‰. Русло здесь сужается более, чем в 2 раза, а на крыльях излучины выше и ниже шиверы в зоне подпора формируются пороги; вдоль левого берега выше излучины и до разветвления русло имеет плёсовый характер. Влияние подпора на русловой режим участка подчеркивается наличием выше зоны выклинивания подпора одиночного трехрукавного разветвления на выходе Яны во внутригорную котловину, рукава и острова в котором не развиваются по аналогии с нижележащим пойменно-русловым комплексом.

Условия подпора в многоводную фазу режима обуславливают формирование аккумулятивных форм руслового рельефа — порогов: верхнего — выше шиверы в верхнем крыле излучины, среднего — непосредственно ниже шиверы и нижнего — перед изгибом русла у левого коренного берега (рис. 3). Верхний порог формируется в зоне подпора потока от шиверы как следствие аккумуляции более мелкого материала в верхнем крыле излучины. Ниже шиверы резко возрастает ширина русла в бровках поймы из-за размыва правого берега, к которому, минуя вершину излучины, направляется поток. Это благоприятствует формированию здесь побочня у левого выпуклого берега и местного расширения русла, в котором возникает и разви-

вается средний порог за счет аккумуляции наносов, поступающих с верхнего крыла излучины и проходящих через шиверу транзитом.

Руслообразующие наносы здесь — галечно-гравийные с примесью валунов. Их крупность в отстойке на участке такова, что размывающие скорости очень редко превосходят максимальные скорости потока. В связи с этим сплошного движения донных наносов не происходит, и на первый план выходят импульсные смещения, вызванные пульсациями скоростей потока (Беркович и др., 1985). По расчетам, выполненным на основании грунтовой съемки в 1985 г. (Нижняя Яна..., 1998), для начала движения наносов придонные скорости на пороговом участке ниже скал должны превышать 1.75 м/с, что происходит, согласно результатам гидродинамического моделирования, в интервале расходов 3500–5600 м³/с. В маловодные годы продолжительность периода стояния уровней, соответствующих этим расходам, не превышает 5–8 дней. В многоводные годы с учетом высоких летних паводков период движения наносов увеличивается до 15–20 дней. Межгодовая изменчивость водности приводит к блужданию корыта порога, изменению положения и протяженности его гребня. Также на его состояние влияет зимнее перемерзание реки, во время которого лед на порогах ложится на дно, перекрывая все русло, что весной при резком подъеме воды и подвижке льда приводит к экзарации дна.

Ниже этого порога русло подходит к левому коренному берегу под прямым углом, образуя вынужденную излучину в условиях подпора, уси-

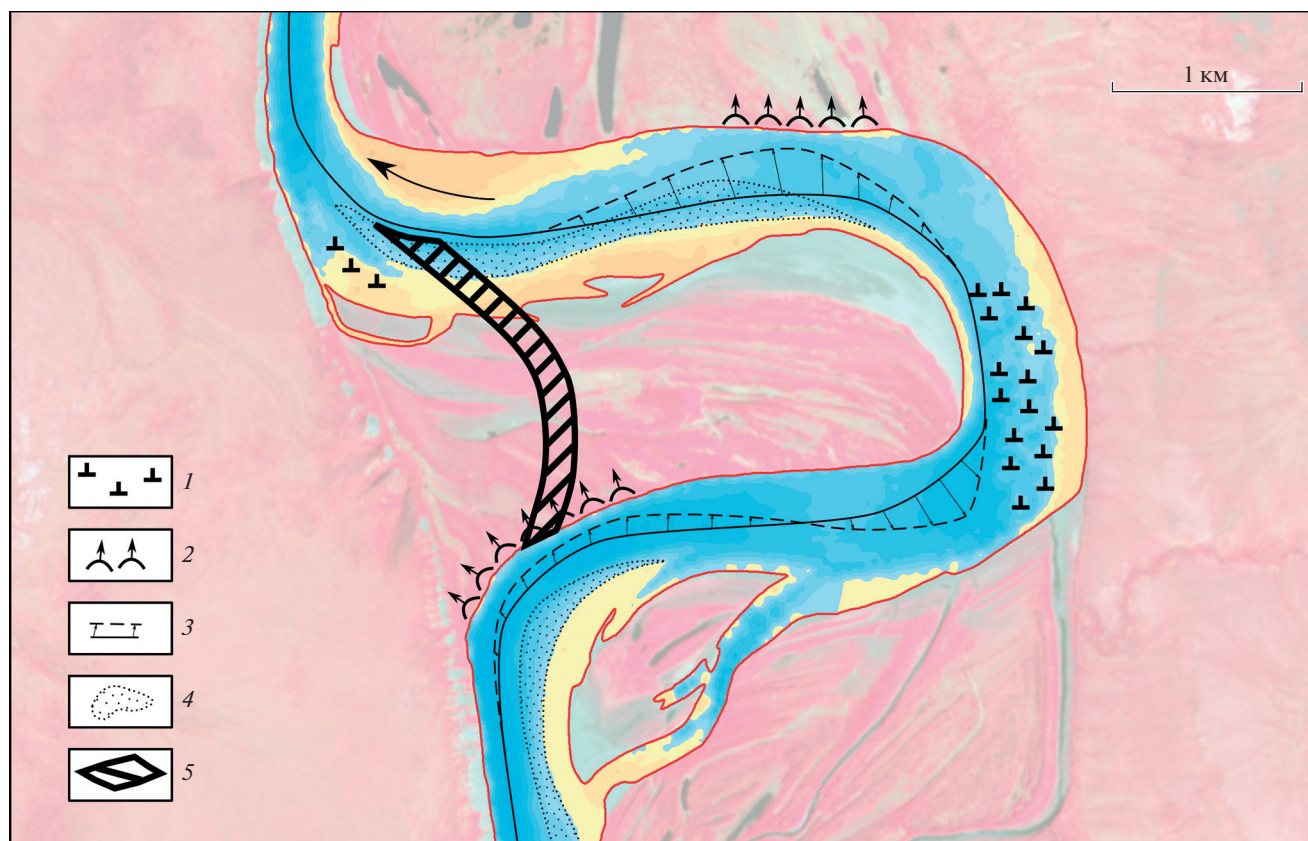


Рис. 4. Прогнозная оценка переформирований русла: 1 — скальные выходы в потоке; 2 — развитие вогнутости размываемого берега, оказывающее направляющее воздействие на поток; 3 — изменение положения динамической оси потока; 4 — зоны аккумуляции наносов; 5 — гидравлически оптимальное положение оси потока при спрямлении излучины и рекомендуемая прорезь-канал через шпору излучины.

Fig. 4. Prediction of channel deformations: 1 — rock outcrops in the stream; 2 — development of the concavity of the eroded bank, which has a guiding effect on the flow; 3 — change in the position of the flow dynamic axis; 4 — sediment accumulation zones; 5 — hydraulically optimal position of the flow axis (straightening the bend) and the recommended channel through the bend spur.

ливающегося из-за сужения русла и дна долины ниже по течению. В вершине этого поворота в левобережной части русла имеется небольшой (по сравнению с шиверой) выход скальных пород, отжимающий стрежень потока к правому выпуклому берегу. Такая конфигурация русла приводит к нехарактерному для вершин излучин развитию побочней возле обоих берегов и кос в их ухвостьях, формирующих нижний перекат. При прорывах кос, происходящих в многоводные фазы водного режима, поток разделяется на две ветви. Из-за уменьшения расхода воды под правым берегом начинается активный рост правобережной побочней, к которому причленяется осередок, образовавшийся при отторжении левобережной косы. Эти переформирования приводят к обмелению нижнего переката, усилению подпора и аккумуляции на участке выше переката до шиверы.

На основе ретроспективного руслового анализа и данных исследований в половодье 2022 г. был разработан прогноз дальнейших естественных переформирований русла (рис. 4). Современные тенденции указывают на то, что излучина на участке “Пороги” будет продолжать развиваться за счет размыва берегов на крыльях, постепенно принимая все более заваленную форму. Несмотря на постепенное сужение шейки излучины, ее естественное резкое спрямление маловероятно из-за малых глубин и короткого периода затопления поймы на излучине, а также мерзлых грунтов поймы. Развитие излучины при этом будет сопровождаться искривлением оси потока в верхнем крыле излучины, дальнейшим усилением аккумуляции наносов, обмелением верхнего переката выше шиверы и направлению все большего расхода воды и стрежня потока к вогнутому правому берегу излучины, оставляя в скоростной

тени относительно глубокую ложбину между шпорой излучины и скалами.

Ниже шиверы уже сейчас наблюдается свальное течение под правый берег, которое будет усиливаться, активизируя его размыв и развитие выбоины в его очертаниях. При сохранении этой тенденции будет расти левобережный побочень у выпуклого левого берега в нижнем крыле излучины (ниже ее вершины). Это, в свою очередь, приведет к искривлению фарватера между перекатами в нижнем крыле и их обмелению. Скальный выступ у левого коренного берега при этом также превратится в шиверу. Таким образом, прогнозируемые переформирования излучины русла и перекатов на участке “Пороги” в перспективе приведут к существенному ухудшению условий судоходства.

Приведенные прогнозные оценки были подтверждены результатами гидродинамического моделирования деформаций русла (Школьный и др., 2023) и позволили обосновать рекомендации по выправлению русла для ускорения естественных тенденций его развития путем спрямления пальцеобразной излучины, параметры которой намного превысили критические, но естественное спрямление не происходит из-за большой высоты поймы, слабой ее затопляемости и отсутствия течений через шпору, способных произвести ее размыв. Результаты сценарного моделирования показали, что создание прорези-канала через шпору излучины стабилизирует русло, обеспечив формирование единого глубоководного плёсового участка реки в пределах внутригорной впадины. Равномерное распределение расходов между каналом и еще сохраняющимся старым руслом снизит скорости размыва берегов, уменьшит количество наносов, поступающих в русло, снизит затопляемость левобережной поймы и, в конечном счете, приведет к общей стабилизации русла. Со временем расходы воды будут перераспределяться в пользу спрямляющего канала, старое русло начнет заполняться наносами и мелеть, превращаясь в староречье или залив. В свою очередь, увеличение водности нового русла и обмеление старого будут способствовать активизации врезания русла из-за спрямления излучины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые для большой реки (на примере р. Яны), протекающей по горной территории и имеющей врезанное русло, рассмотрено

формирование русла в относительно небольшой внутригорной впадине на фоне общего достаточно интенсивного врезания реки. Несмотря на то, что русло во впадине широкопойменное, большая часть поймы затопляется крайне редко, на небольшую глубину и без образования на ней транзитного течения. Русло образует излучину, которая по мере смещения трансформировалась из сегментной в пальцеобразную. Привершинная часть излучины достигает борта днища долины, представленного террасой, цоколь которой при размыве аллювиальной толщи образовал шиверу — скальный порог, перегораживающий русло более, чем на половину его ширины.

В условиях подпора, который возникает как из-за нижерасположенного сужения днища долины, так и из-за наличия шиверы и крутого изгиба русла на излучине с образованием свальных течений на ее крыльях, формируются перекиды, сложенные галечником, имеющим местное происхождение (продукты размыва берегов). Изменение формы излучины связано с неодинаковыми скоростями размыва берегов на ее крыльях: верхнее крыло смещается вдвое интенсивнее нижнего, что связано как с подпором, так и с различиями в строении берегов и с мерзлотной их переработкой. Спрямление излучины, несмотря на ее избыточную крутизну, естественным путем не происходит из-за условий затопления пойменной шпоры, при котором не возникает течение через нее, способное произвести размыв.

На основе ретроспективного анализа и математического моделирования разработана прогнозная оценка переформирования русла и обоснованы рекомендации по выправлению русла для улучшения условий судоходства, заключающиеся в разработке спрямляющего канала через основную шпору излучины.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши (проект № 121051400038-1) и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева (проект № 121051100166-4) МГУ им. М.В. Ломоносова (ретроспективные материалы) и по госконтракту с Росморречфлотом (моделирование, натурные исследования и рекомендации по выправлению русла) при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17-00065) — геоморфологические и гидрологические условия, русловый анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранова Ю.П., Бискэ С.Ф., Гончаров В.Ф. и др. (1968). Кайнозой Северо-Востока СССР. *Труды ИГиГ*. Вып. 38. 136 с.
- Беркович К.М., Зайцев А.А., Лодина Р.В. и др. (1985). Русловые процессы на больших реках Восточной Сибири с галечно-валунным аллювием и особенности их регулирования. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. № 3. С. 35–41.
- Борсук О.А., Долженко Ю.А., Зайцев А.А. и др. (1995). Русловые процессы на верхнем Алдане и их учет при транспортном освоении реки. В сб.: *Эрозия почв и русловые процессы*. Вып. 10. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 157–188.
- Борсук О.А., Зайцев А.А., Кирик О.М. и др. (2001). Русловые процессы на средней Лене (от Витима до Покровска). В сб.: *Эрозия почв и русловые процессы*. Вып. 13. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 203–228.
- Борсук О.А., Чалов Р.С. (1973). О врезании русла р. Лены. *Известия РГО*. Т. 105. № 5. С. 452–456.
- Гусев М.Н. (2002). Морфодинамика днища долины верхнего Амура. Владивосток: Дальнаука. 220 с.
- Гурин А.Д., Лодина Р.В. (1994). Особенности русловых процессов и морфология русла нижнего Витима. *Геоморфология*. № 1. С. 87–93.
- Зайцев А.А. (1989). Режим уровней и уклонов на валуно-галечных перекатах и скальных выступах в руслах крупных рек. *Метеорология и гидрология*. № 12. С. 103–106.
- Зайцев А.А., Кирик О.М., Лодина Р.В. и др. (1998). Гидроморфологическая характеристика и регулирование русла нижнего Витима в связи с его транспортным использованием. В сб.: *Эрозия почв и русловые процессы*. Вып. 12. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 189–214.
- Зайцев А.А., Савцова Т.М. (1994). Скульптурный и аккумулятивный рельеф врезанных русел рек Восточной Сибири и особенности его формирования. *Геоморфология*. № 4. С. 58–83.
- Коротаев В.Н., Матвеев Б.В., Панин А.В. и др. (1990). Развитие долины и русла р. Яны в зоне Куларского хребта в плейстоцене и голоцене. В сб.: *Четвертичный период: методы исследования, стратиграфия и экология*. Таллин: Изд-во АН Эстонии. С. 79–80.
- Маккавеев Н.И. (1955). Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 347 с.
- Матвеев Б.В., Панин А.В. (1988). Происхождение и динамика макроизлучин (на примере р. Яны). В сб.: *Экзогенные процессы и окружающая среда*. Казань: Изд-во Казан. ун-та. С. 94–95.
- Матвеев Б.В., Панин А.В., Сидорчук А.Ю. (1992). Развитие antecedentной долины реки Яны на участке пересечения Куларского хребта. *География и природные ресурсы*. № 1. С. 102–107.
- Михайлов В.М. (2018). Литология коренных пород и природные комплексы речных долин (на примере Северо-Востока России). *География и природные ресурсы*. № 3. С. 116–123.
- Нижняя Яна: устьевые и русловые процессы. (1998). Отв. ред. В.Н. Коротаев. М.: ГЕОС. 212 с.
- Панин А.В. (1990). Влияние геолого-геоморфологических факторов на морфологию русла рек Восточной Сибири (на примере р. Яны). *Геоморфология*. № 1. С. 73–80.
- Панин А.В. (1991). Морфология и динамика врезанных галечно-валунных русел. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 24 с.
- Попов И.В. (1955). Процесс меандрирования речных русел и его изучение при помощи аэрофотосъемки. *Труды ГГИ*. Вып. 49. С. 5–33.
- Ржаницын Н.А. (1985). Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат. 264 с.
- Русанов Б.С., Бороденкова З.Ф., Гончаров О.Ф. и др. (1967). Геоморфология Восточной Якутии. Якутск: Якут. книж. изд-во. 376 с.
- Соловьев М.Н., Федянин А.Н., Сорокина К.М. (2003). Отчет о геологическом доизучении, пересоставлении и подготовке к изданию Государственной Геологической Карты Российской Федерации (России) масштаба 1:200000 (новая серия) листов R-53- IX, X, XV, XVI в 1992–2003 гг. Батагай: ГУГГП “Янгеология”. 432 с.
- Хмызников П.К. (1934). Гидрология бассейна реки Яны. Л.: Изд-во АН СССР. 252 с.
- Чалов Р.С. (1979). Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та. 232 с.
- Чалов Р.С. (2002). Горные реки и реки в горах: продольный профиль, морфология и динамика русел. *Геоморфология*. № 3. С. 26–40.
- Чалов Р.С. (2008). Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ. 608 с.
- Чалов Р.С. (2011). Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД. 960 с.
- Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. (2000). Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во Моск. ун-та. 216 с.
- Чалов Р.С., Лю Шугуан, Чернов А.В. и др. (2020). Сравнительный анализ русловых процессов на больших реках России (Азиатская часть), Монголии и Китая. В сб.: *Эрозионные и русловые процессы*. Вып. 7. М.: Геогр. ф-т МГУ. С. 307–398.
- Школьный Д.И., Чалов Р.С., Семаков В.А. и др. (2023). Перекатный участок Пороги в нижнем течении р. Яна: современное состояние, прогнозные оценки, методы выправления. *Речной транспорт (XXI век)*. № 1. С. 18–22.
- Эпов О.Г., Золотилина Г.Д., Богданович О.Р. и др. (1985). Отчет о результатах прогнозно-металлогенических работ в Куларском антиклинории в 1979–1985 гг. Батагай: ЯнГРЭ. 274 с.
- Dury G.N. (1965). Theoretical implications of underfit streams. U.S. Geol. Survey. Prof. Paper 452-c. 43 p.
- Rosgen D.L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*. V. 22. P. 169–199. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90001-9)

BIG RIVER CHANNEL FORMATION AND DEFORMATION IN THE INTERMOUNTAIN BASIN (CASE STUDY OF THE YANA RIVER WITHIN THE KULAR MOUNTAIN MASSIF)¹

D. I. Shkolnyi^{a, #} and R. S. Chalov^{a, ##}

^a *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: danila.hydro@yandex.ru*

^{##} *E-mail: rschalov@mail.ru*

The incised pebble-boulder channels of large mountain rivers (including the Yana in its mountainous area), their morphology and history of formation are well studied. However, local conditions within the intermountain depressions lead to the emergence of specific features of the channel development and its morphology — in this case, the formation of finger-shaped meander. The paper analyzes the historical and modern features of the formation of the Yana riverbed in the “Porogi” section located in the depression inside Kular range, and describes the negative impact of channel processes on navigation. Using this case study, we consider the characteristic features of the channel development of a large river under the influence of a complex of factors — the regional geological conditions (which caused active incision of the channel), discharge, and channel sediment composition. Characteristics of lateral migration and curvature development of meander controlled by bedrock and narrowing of the valley are presented. The discharge conditions under which the displacement of riffles is possible are calculated. The forecast of the further channel development and recommendations for sustainable navigation are given.

Keywords: channel processes, incised channel, intermountain basin, meander, rapids, riffle

ACKNOWLEDGMENTS

The paper is prepared according to the plan of scientific research of the Department of Land Hydrology (№ 121051400038-1) and the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes (№ 12105100166-4) within contract with the Federal Agency for Maritime and River Transport and with financial support of the Russian Science Foundation (№ 23-17-00065).

REFERENCES

- Baranova Ju.P., Biske S.F., Goncharov V.F. et al. (1968). Cenozoic of the North-East of the USSR. *Trudy IGIG*. V. 38. 136 p. (in Russ.)
- Berkovich K.M., Zaitsev A.A., Lodina R.V. et al. (1985). Channel processes on large rivers of Eastern Siberia with pebble-boulder alluvium and features of their regulation. *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. № 3. P. 35–41. (in Russ.)
- Borsuk O.A., Dolzhenko Yu.A., Zaitsev A.A. et al. (1995). Channel processes on the upper Aldan and their consideration in the transport development of the river. In: *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy*. V. 10. Moscow: MGU (Publ.). P. 157–188. (in Russ.)
- Borsuk O.A., Zaitsev A.A., Kirik O.M. et al. (2001). Channel processes in the middle reaches of Lena River (from Vitim to Pokrovsk). In: *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy*. V. 13. Moscow: MGU (Publ.). P. 203–228. (in Russ.)
- Borsuk O.A., Chalov R.S. (1973). About the incision of the Lena riverbed. *Izvestiya RGO*. V. 105. № 5. P. 452–456. (in Russ.)
- Chalov R.S. (1979). Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov (Geographical studies of channel processes). Moscow: MGU (Publ.). 232 p. (in Russ.)
- Chalov R.S. (2002). Mountain rivers and rivers in the mountains: longitudinal profile, morphology, and channel dynamics. *Geomorfologiya*. № 3. P. 26–40. (in Russ.)
- Chalov R.S. (2008). Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. Tom 1: Ruslovyie protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnikh rusel (River channel science: theory, geography, practice. V. 1: Riverbed processes, mechanism, forms of manifestations and conditions of formations of riverbeds). Moscow: LKI (Publ.). 608 p. (in Russ.)
- Chalov R.S. (2011). Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. Tom 2: Morfodinamika rechnikh rusel (River channel science: theory, geography, practice. V. 2: Morphodynamics of river channels). Moscow: KRASAND (Publ.). 960 p. (in Russ.)
- Chalov R.S., Liu Shuguang, Alekseevskii N.I. (2000). Stok nanosov i ruslovyie protsessy na bol'shikh rekakh Rossii i Kitaya (Sediment Runoff and Channel Processes on Large Rivers of Russia and China). Moscow: MGU (Publ.). 216 p. (in Russ.)
- Chalov R.S., Liu Shuguang, Chernov A.V. et al. (2020). Comparative analysis of channel processes on large rivers of Russia (Asian part), Mongolia and China. In: *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy*. V. 7. Moscow: MGU (Publ.). P. 307–398. (in Russ.)

¹ For citation: Shkolnyi D.I., Chalov R.S. (2024). Big river channel formation and deformation in the intermountain basin (case study of the Yana River within the Kular mountain massif). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 1. P. 13–25. <https://doi.org/10.31857/S2949178924010025>; <https://elibrary.ru/IRXBSM>

- Dury G.N. (1965). Theoretical implications of underfit streams. U.S. Geol. Survey. Prof. Paper 452-c. 43 p.
- Gusev M.N. (2002). Morphodynamics of the bottom of the upper Amur valley. Vladivostok: Dal'nauka (Publ.). 220 p. (in Russ.)
- Gurin A.D., Lodina R.V. (1994). Channel processes and morphology of the lower Vitim channel. *Geomorfologiya*. № 1. P. 87–93. (in Russ.)
- Epov O.G., Zolotilina G.D., Bogdanovich O.R. et al. (1985). Otchet o rezul'tatakh prognoznno-metallogenicheskikh rabot v Kularskom antiklinorii v 1979–1985 gg. (Report on the results of predictive-metallogenic work in the Kular anticlinorium in 1979–1985). Batagay: YanGRE (Publ.). 274 p. (in Russ.)
- Khmyznikov P.K. (1934). *Gidrologiya basseina reki Yany* (Hydrology of the Yana River Basin). Leningrad: AN SSSR (Publ.). 252 p. (in Russ.)
- Korotaev V.N. (Ed.). (1998). *Nizhnyaya Yana: ust'evye i ruslovy protsessy* (Lower Yana: estuarine and channel processes). Moscow: GEOS (Publ.). 212 p. (in Russ.)
- Korotaev V.N., Matveev B.V., Panin A.V. et al. (1990). Development of the Yana River valley and channel in the Kular Range zone in the Pleistocene and Holocene. In: *Chetvertichnyi period: metody issledovaniya, stratigrafiya i ekologiya*. Tallin: AN Estonii (Publ.). P. 79–80. (in Russ.)
- Makkaveev N.I. (1955). River bed and erosion in its basin. Moscow: AN SSSR (Publ.). 347 p. (in Russ.)
- Matveev B.V., Panin A.V. (1988). Origin and dynamics of macrobends (on the example of the Yana River). In: *Ekzogennye protsessy i okruzhayushchaya sreda*. Kazan: Kazanskii universitet (Publ.). P. 94–95. (in Russ.)
- Matveev B.V., Panin A.V., Sidorchuk A.Yu. (1992). Development of the antecedent valley of the Yana River at the intersection of the Kular Ridge. *Geografiya i prirodnye resursy*. № 1. P. 102–107. (in Russ.)
- Mikhailov V.M. (2018). Bedrock lithology and natural complexes of river valleys (a case study of the North-east of Russia). *Geografiya i prirodnye resursy*. № 3. P. 116–123. (in Russ.)
- Panin A.V. (1990). Geological and geomorphic factor influence on channel morphology of East Siberian large rivers (with special reference to the Yana River). *Geomorfologiya*. № 1. P. 73–80. (in Russ.)
- Panin A.V. (1991). *Morfologiya i dinamika vrezannykh galechno-valunnykh rusel* (Morphology and dynamics of incised pebble-boulder channels). PhD thesis. Moscow: MSU. 24 p. (in Russ.)
- Popov I.V. (1955). The process of river channels meandering and its study using aerial photography. *Trudy GGI*. V. 49. P. 5–33. (in Russ.)
- Rosgen D.L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*. V. 22. P. 169–199. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90001-9)
- Rusanov B.S., Borodenkova Z.F., Goncharov O.F. et al. (1967). *Geomorfologiya Vostochnoi Yakutii* (Geomorphology of Eastern Yakutia). Yakutsk: Yakutsk. knizhn. izd-vo (Publ.). 376 p. (in Russ.)
- Rzhanitsyn N.A. (1985). *Rusloformiruyushchie protsessy rek* (Channel-forming processes of rivers). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.). 264 p. (in Russ.)
- Shkolnyi D.I., Chalov R.S., Semakov V.A. et al. (2023). “Porogi” rift section in the Lower Yana: current state, predictive estimates, methods of correction. *River transport (XXI century)*. № 1. P. 18–22. (in Russ.)
- Solov'ev M.N., Fedyanin A.N., Sorokina K.M. (2003). Otchet o geologicheskom doizuchenii, peresostavlenii i podgotovke k izdaniyu Gosudarstvennoi Geologicheskoi Karty Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200 000 (novaya seriya) listov R-53-IX, X, XV, XVI v 1992–2003 gg. (Report on additional geological study, recompilation and preparation for publication of the State Geological Map of the Russian Federation at 1:200,000 scale (new series), sheets R-53-IX, X, XV, XVI in 1992–2003). Batagay: GUGGP “Yangeologiya” (Publ.). 432 p. (in Russ.)
- Zaitsev A.A. (1989). Behavior of levels and slopes on boulder-pebble rifts and rock ledges in the channels of large rivers. *Russian meteorology and hydrology*. № 12. P. 103–106. (in Russ.)
- Zaitsev A.A., Kirik O.M., Lodina R.V. et al. (1998). Hydro-morphological characteristics and regulation of the lower Vitim channel in connection with its transport use. In: *Eroziya pochv i ruslovy protsessy*. V. 12. Moscow: MGU (Publ.). P. 189–214. (in Russ.)
- Zaitsev A.A., Savtsova T.M. (1994). Sculptural and alluvial landforms of incised channels in East Siberia: special features of the relief formation. *Geomorfologiya*. № 4. P. 58–83.