

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЧЕТКОВИДНЫХ РУСЛАХ СТЕПНЫХ РЕК ХОПЕРСКО-БУЗУЛУКСКОЙ РАВНИНЫ

А.М. Тарбеева¹, И.В. Крыленко², В.В. Сурков³, Н.М. Михайлова⁴

^{1–4} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Макавеева*

¹ *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: amtarbeeva@yandex.ru*

² *Науч. сотр.; e-mail: i-krylenko@yandex.ru*

³ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: vita.surkov@yandex.ru*

⁴ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: nmmikhailova@yandex.ru*

Четковидные (четкообразные или бочажинные) русла, характеризующиеся чередованием озеровидных расширений и узких протоков, широко распространены на малых реках степной зоны России. Расширения русел – четки или бочаги глубиной до 5–6 м, имеют большое значение для сельского хозяйства, обеспечивая водопой в засушливые периоды года, когда сток малых рек прекращается. Однако механизмы формирования специфической формы русел таких рек до сих пор остаются дискуссионными: ее объясняют неравномерным заилением, образованием водоворотов, разгрузкой подземных вод, карстовыми процессами или реликтовым термокарстом. Целью исследования являлась оценка роли водного потока в образовании и поддержании четковидной формы русел рек. В задачи входило описание гидрологического режима рек Кардаил и Кувава, определение гидродинамики потока в расширениях и сужениях русла, установление особенностей эрозионно-аккумулятивных процессов и транспорта наносов, а также выявление элементов строения русла и поймы, не соответствующих современным условиям водности. Для стока воды исследуемых рек характерно снижение расходов половодья в долгосрочном плане, о чем свидетельствует редкое затопление высокой поймы, низкие темпы динамики берегов, а также несоответствие размеров излучин ширине русла. Сток наносов исследуемых рек мал, в 2023 г. он оценивается в 6,05 т/км², что связано с малым поступлением наносов с водосбора и низкими темпами размыва дна и берегов, сложенных глинистыми отложениями. Современная динамика водного потока не способствует углублению и расширению четок: поток достигает максимальных скоростей в сужениях русла (1–1,3 м/с), а в расширениях русла скорости потока падают до 0,3 м/с, и, несмотря на наличие водоворотов, происходит аккумуляция наносов. Значительная часть расширений русла расположена на месте бывших плесов древнего извилистого русла, унаследованного современным водотоком, а на бывших перекатах русло сузилось и сформировалась низкая пойма. Глубокие расширения русла сохранились благодаря малому стоку наносов и их тонкому составу, препятствующему быстрому оседанию из взвеси. Проведенные исследования не позволяют исключить других факторов образования исходных глубоких плесов, в том числе криогенных.

Ключевые слова: бочаги, малые реки, заиление, взвешенные наносы, скоростное поле потока

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.11

ВВЕДЕНИЕ

Четковидные (четкообразные или бочажинные) русла, характеризующиеся чередованием озеровидных расширений (четок или бочагов) и узких протоков, широко распространены на малых реках в степной зоне Евразии [Тарбеева и др., 2016; Рябуха, Поляков, 2020]. Озеровидные расширения русел таких рек имеют большое значение для скотоводства и выживания диких животных и птиц, обеспечивая водой даже в самые засушливые периоды года, когда сток малых рек прекращается и сужения русел обсыхают. Однако до сих пор дискуссионным остается вопрос о происхождении и причинах устойчивости четковидной формы русел степных рек, так как специальные гидрологические исследования

на них не проводились, особенности их гидродинамики, также как и процессы осадконакопления и транспорта наносов, в четковидных руслах не исследовались.

Чаще всего формирование четковидных русел в степях считают одной из стадий агрогенного заиления рек, происходящего на фоне снижения их водности, при котором сужения русла образуются при зарастании и заилении перекатов, а озеровидные расширения русел (четки или бочаги) сохраняются на месте бывших плесов [Иванова и др., 1996; Чернов, 1988; Чалов, 2011]. Аналогичные процессы отмечены в Австралии при естественном снижении водности рек на фоне климатических изменений [Williams, Fryirs, 2020]. Но описаны и другие ме-

ханизмы образования расширений русла, такие как образование водоворотных зон [Чалов и др., 2018], разгрузка в русле подземных вод [Кичигин, 1992], суффозионно-карстовые процессы [Тарбеева и др., 2016]. В том числе существует версия о реликтовой термокарстовой природе четковидных русел степи, где перигляциальные условия наблюдались в позднем неоплейстоцене [Рябуха, Поляков, 2020].

Целью исследования являлась оценка современных гидрологических условий степных рек Кардаил и Купава для выявления роли водного потока в образовании и поддержании четковидной формы русла. В задачи исследования входило установление гидрологического режима исследуемых рек, определение гидродинамических параметров потока в расширениях и сужениях русла, характеристика эрозионно-аккумулятивных процессов и транспорта наносов, а также выявление элементов строения русла, несоответствующих современным условиям водности.

Установление генезиса четковидных русел малых степных рек помогло бы глубже понять историю развития их долин, оценить роль сельскохозяйственного освоения и изменения климата в формировании русел, разработать мероприятия по их сохранению.

Природные условия территории и их изменения. Исследования проводились на территории Новониколаевского района Волгоградской области. Исследуемые малые реки Кардаил и Купава относятся к бассейну р. Бузулук (левый приток Хопра, бассейн Дона). Река Кардаил впадает в р. Бузулук справа, в его среднем течении. Длина Кардаила составляет 128 км, площадь бассейна 1920 км². Река Купава является левым притоком р. Кардаил, впадающим в него в среднем течении, в 77 км выше устья. Длина р. Купавы составляет 39 км, площадь бассейна – 380 км². Реки текут в пределах Хоперско-Бузулукской равнины, которая является частью Окско-Донской низменности, покрывавшейся донским ледником, а затем освоенной долинной сетью. Рельеф равнины пологоволнистый, абсолютные отметки водоразделов 150–175 м. Рыхлые неоген-четвертичные отложения до глубины первых сотен метров представлены преимущественно глинами и песками, карстующиеся породы залегают глубоко или отсутствуют [Государственная геологическая карта..., 2009]. Реки Кардаил и Купава имеют извилистые русла, осложненные хорошо выраженными четковидными расширениями, встречающимися и на других реках Хоперско-Бузулукской равнины. Четковидное строение имеют также некоторые старицы этих рек, приуроченные к высокой пойме и первой надпойменной террасе, наиболее протяженная из них наблюдается в нижнем течении р. Кардаил у п. Киквидзе.

В бассейне среднего Дона, в том числе в долине Бузулука, широко распространены следы мощного стока в конце позднего неоплейстоцена, выраженные в виде унаследованных макроизлучин, больших палеорусел, систем крупных глив и меандровых цирков, развитых на уровне высокой поймы и низких террас [Панин и др., 2013]. Годовой слой речного стока в позднелвалдайское время в 2–4 раза превышал современный, что связывают с большими влагозапасами в снеге в условиях длительной зимы и меньшей потерей стока на фильтрацию в условиях распространения многолетней мерзлоты. Наличием большого стока в позднелвалдайское время объясняется чрезмерная по отношению к размерам современных рек ширина пойм.

Современные климатические условия территории, определяющие формирование стока, имеют следующие характеристики. Среднегодовая (1991–2020 гг.) температура воздуха по м.с. Урюпинск, расположенной в 60 км к ЮЗ от участка исследований, составляет +7,6°C, средняя температура июля +21,9°C, средняя температура января –6,6°C, среднегодовое количество осадков – 423 мм. Зима малоснежная, с частыми оттепелями. Среднее многолетнее максимальное за год суточное количество дождевых осадков составляет 31 мм, абсолютный максимум – 63 мм (август 2019 г.) [Погода и Климат, 2023]. Климатические изменения последних десятилетий проявились в основном в потеплении в зимний период. Статистически значимого изменения слоя осадков не произошло, но уменьшилась доля твердых осадков и возросла доля экстремальных дождей [Основные гидрологические характеристики..., 2020].

Исследуемые реки характеризуются выраженным весенним половодьем, которое является основным руслоформирующим событием. Наинизшие уровни воды наблюдаются в августе, в некоторые годы реки пересыхают. На р. Кардаил (г.п. хут. Андреевский, площадь водосбора 1310 км²) с марта по май в среднем проходит 86,7% годового стока воды, с июня по ноябрь – 6,8%, а с декабря по февраль – 6,5% [Основные гидрологические характеристики..., 2020].

Со второй половины 1970-х годов в бассейне Дона произошли существенные изменения водного режима рек: объемы годового и весеннего стока сократились, при этом объемы меженного стока выросли [Основные гидрологические характеристики..., 2020]. Эти изменения неоднородны по бассейну Дона. Они имеют, прежде всего, климатические причины (сокращение снегозапасов, уменьшение глубины промерзания почвы и др.), но усугубляются усилением антропогенной нагрузки: строительством прудов и водохранилищ,

изменением характера земле- и водопользования [Варенцова и др., 2021]. По данным наблюдений на р. Кардаил (г.п. хут. Андреевский), за период 1978–2017 гг., по отношению к периоду 1956–1977 гг., слой стока половодья снизился на 8% от годового, а максимальный срочный расход половодья – на 31% [Основные гидрологические характеристики..., 2020]. При этом снижение весеннего стока в бассейне Хопра, в т. ч. в бассейне Кардаила, началось позже, а его величина была существенно меньше, чем в западной и южной частях бассейна Дона [Варенцова и др., 2021].

Бассейн р. Кардаил относится к зоне типичных степей, почвы представлены черноземами обыкновенными, выщелоченными и южными [Основные гидрологические характеристики..., 2020]. Земледельческое освоение среднего Дона началось во второй половине XVII в., а максимум поступления наносов бассейнового происхождения в русла малых рек пришелся на последнюю треть XIX в. [Голосов, 2006]. В настоящее время распаивается около 80% территории Новониколаевского района [Лобанова, 2014]. Однако Хоперско-Бузулукская низменность характеризуется невысокими значениями смыва с пашни (менее 1 т/га в год) в связи

с малыми уклонами территории и низким эрозионным потенциалом осадков [Белоцерковский и др., 1983]. В последние годы поступление наносов сокращается из-за снижения темпов овражной эрозии и увеличения протяженности суходольной сети, задерживающей сток наносов [Голосов, 2006]. Наличие русловых прудов и широкие нераспахиваемые поверхности поймы и низких террас, используемые как пастбища, также задерживают сток наносов с обрабатываемых полей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые наблюдения. Для получения данных о современном гидрологическом режиме, гидродинамике потоков и морфологическом строении русел четковидных рек в 2022–2023 гг. были проведены детальные полевые наблюдения на двух ключевых участках: река Кардаил выше впадения левого притока Куपाва вблизи хут. Верхнекардаильского (площадь водосбора в створе временного гидрологического поста 572 км²) и река Купава в 1,5 км выше устья (площадь водосбора в створе временного гидрологического поста 373 км²) (рис. 1). Протяженность ключевого участка р. Кардаил составляет 3 км, р. Купава – 1,5 км.

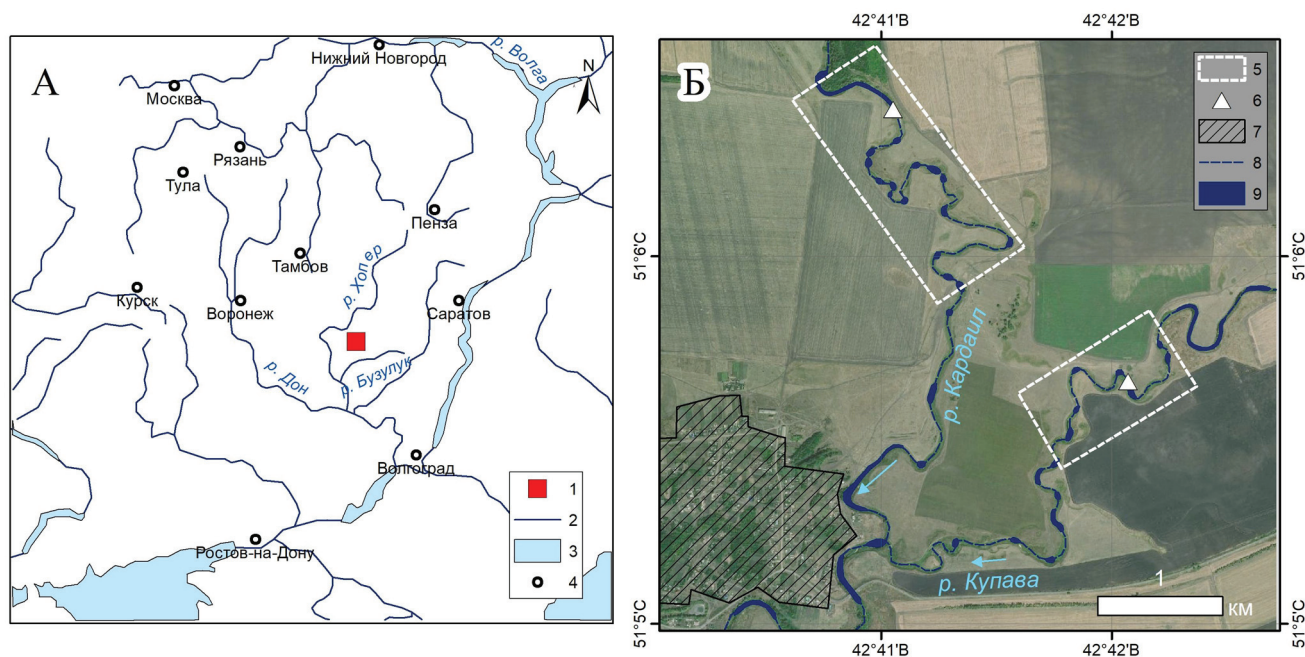


Рис. 1. Район исследований:

А – обзорная схема (1 – положение участка работ; 2 – реки; 3 – водоемы; 4 – города); Б – расположение ключевых участков рек Кардаил и Купава на космическом снимке ESRI (5 – ключевые участки работ; 6 – временные гидрологические посты; 7 – хут. Верхнекардаильский; 8 – сужения русла; 9 – расширения русла)

Fig. 1. Study area:

A – overview scheme: 1 – research area; 2 – rivers; 3 – reservoirs; 4 – cities; Б – location of key sections of the Kardail and Kupava rivers on the ESRI satellite image: 5 – key sites; 6 – temporary gauging stations; 7 – Verkhnekardail'sky settl.; 8 – narrowings of the channel; 9 – channel widenings

На каждом из ключевых участков была проведена аэрофотосъемка русла и прилегающей поймы, получены ортофотопланы и цифровые модели рельефа, по которым определялись морфометрические характеристики русла и поймы. Одновременно при помощи эхолота *Lowrance LMS-525C DF* были проведены промеры глубин на всем протяжении ключевых участков.

На каждой из рек измерялись уровни и расходы воды, определялось положение отметок уровня воды и меток высоких вод относительно временного репера с условной отметкой высот. Также определялись уклоны водной поверхности, форма поперечного сечения русла как в сужениях, так и в расширениях. С конца февраля по конец августа 2023 г. при помощи барометрических самописцев *Keller DCX-22* на р. Купаве проводились ежечасные измерения уровней воды. На период половодья на р. Кардаил была установлена автоматическая фотокамера с интервалом съемки один раз в три часа, что позволило проследить ледовые явления, сход снега и другие характеристики.

Расходы воды во время половодья измерялись при помощи акустического доплеровского измерителя скоростей течения воды (*Acoustic Doppler Current Profiler*) модели *Sontek RiverSurveyor M9*. В межень – при помощи поплавков или гидрологической вертушки ГР-55. На спаде половодья 2023 г. при помощи акустического доплеровского измерителя скоростей течения воды исследовалось скоростное поле потока в четковидных расширениях русла. Поверхностные скорости течения, которые попадают в «мертвую зону» прибора – до 0,5 м от поверхности, определялись поплавками.

Для оценки заиления русла определялся сток и состав взвешенных наносов, оценивалось распределение в русле донных отложений. Для определения стока наносов одновременно с измерением расходов воды на временных гидрологических постах (в сужениях русла) отбирались пробы воды на мутность. Пробы воды отбирались со стрежня потока вблизи его поверхности. Пробы донных отложений отбирались в расширениях и в сужениях русла.

Обработка материалов. Морфометрические характеристики русел рек Кардаил и Купава определялись для оценки соответствия формы русел современной водности потока, а также для выявления отличий морфологии четковидных русел от аллювиальных русел, не имеющих четковидного строения.

Так как доступные космические снимки и топографические карты не обладают необходимой детальностью для исследования небольших по размерам русел, морфометрические характеристики русла и высотные отметки уровней поймы определялись на основе полевых материалов: построен-

ных по результатам аэрофотосъемки ортофотопланов и цифровых моделей рельефа, батиметрических схем ключевых участков русел, поперечных профилей, проложенных через характерные участки русла и поймы путем нивелирования.

Определялись следующие морфометрические параметры русла: ширина русла в бровках низкой поймы, ширина русла в бровках высокой поймы, шаг излучин, ширина и длина расширений (четок), длина сужений, глубина в расширениях и сужениях русла при меженном уровне воды. Ширина русла определялась на крыльях излучин, где ее значения минимальны и статистически наименее вариabельны [Сидорчук, Панин, 2017]. Ширина русла в бровках низкой поймы ($B_{\text{нп}}$) измерялась по границе незадернованной части русла и растительности на низкой пойме (тростника). Ширина русла в бровках высокой поймы ($B_{\text{вп}}$), измерялась в тех же створах, но по бровкам высокой поймы.

Шаг излучин (L) или половина длины волны излучины, определялся как расстояние между точками изменения знака кривизны центральной линии русла. Длина четки определялась как ее максимальная протяженность, ширина четок определялась как максимальная ширина русла в бровках низкой поймы в расширении русла.

Ширина русла и размеры излучин имеют связь с расходами воды, поэтому морфометрические характеристики русел используются для палеогидрологических реконструкций [Сидорчук, Панин, 2017]. На свободно меандрирующих реках среднестатистическое значение соотношения шага излучины (L) к ширине русла (B) определяется расстоянием между соседними перекатами и в среднем составляет от 5 до 7 [Leopold, Wolman, 1960; Чалов, 2011]. Соотношения $L/B_{\text{нп}}$ и $L/B_{\text{вп}}$ использовались для оценки соответствия размера излучин современной водности потока. Существенное превышение этого значения ($L/B > 10$) является одним из признаков снижения водности рек, применяемым в палеогидрологии [Панин и др., 2013; Сидорчук, Панин, 2017].

Ежедневные расходы воды р. Купавы вычислялись на основе данных барометрического самописца уровней по связи измеренных расходов и уровней воды. Максимальные расходы воды рассчитывались на основе измеренной площади поперечного сечения русла, ограниченного метками уровней высоких вод, и средней скорости потока, определенной по формуле Шези.

Для интерпретации данных о водном режиме реки в период полевых наблюдений анализировались данные метеостанции Урюпинск [Расписание погоды..., 2023], расположенной в 60 км к ЮЗ от ключевых участков. Данные о температуре воздуха и количестве осадков были приведены к среднесу-

точным значениям. Также использовались сведения о наличии и мощности снежного покрова и характере осадков (твердой или жидкой фазе).

Данные о стоке взвешенных наносов были получены на основе связи измеренных значений мутности и расходов воды на реках Кардаил и Куपाва и носят оценочный характер. Из-за небольшого количества имеющихся измерений, была построена общая для двух рек связь мутности с расходом воды. На основе этой связи по данным о ежечасных расходах воды были рассчитаны соответствующие значения мутности и расхода взвешенных наносов, а затем определен сток наносов за весь период наблюдений.

Содержание взвешенных частиц в воде определялось весовым методом путем фильтрования проб воды через мембранные фильтры с порами 45 мкм.

Для установления источников поступления наносов, определения возможности размыва русла и аккумуляции наносов проводился гранулометрический анализ взвешенных частиц, осевших на фильтрах, а также донных отложений при помощи лазерного гранулометра *Fritsch Analysette 22 MicroTec plus* (расчет размеров зерен осуществлялся по модели Франгофера, пробоподготовка проводилась пирофосфатом натрия, каждый образец измерялся трижды). Также проводилось определение объемной массы размываемых отложений с исходной влажностью путем деления массы образца на его объем. По измеренным характеристикам отложений на основе таблиц для глинистых грунтов [Мирицхулава, 1988, с. 183] оценивались неразмывающие скорости потока, которые сопоставлялись с измеренными скоростями в разных частях русла.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология русла и поймы. Реки Кардаил и Купава на исследованных участках имеют извилистые русла с чередованием свободных и вынужденных излучин, осложненных четковидными расширениями (см. рис. 1, Б). Уклоны русел по длине участков изменяются от 0,1‰ (в четковидных расширениях – плесах) до 1,25‰ (в сужениях русла). У подножия склонов долины протягивается полого наклонная в сторону русла поверхность первой надпойменной террасы высотой 5,5–6 м над меженным урезом и шириной 200–300 м. Терраса часто не имеет выраженного тылового шва, осложнена отдельными замкнутыми западинами, обычно распаивается. На отметках 4,5–5 м над меженным урезом расположена субгоризонтальная поверхность высокой поймы, имеющая четкие бровки и осложненная хорошо выраженными старицами, часто имеющими четковидную форму. Высокая пойма преимущественно

луговая, используется как пастбище. Ее ширина в пределах участков исследований достигает 300–400 м. Уровни средней поймы варьируют по высоте от 1,5 до 3 м, имеют ступенчатый или наклонный характер и образуют фрагменты шириной до 40–50 м преимущественно в шпорах излучин. Низкая пойма высотой около 1 м протягивается узкой (до 10–15 м) полосой вдоль сужений русла и занята, в основном, густыми зарослями тростника (рис. 2). Берега рек на ключевых участках наблюдений устойчивые, суглинистые. Уступы высокой и средней пойм заняты луговой степной растительностью.

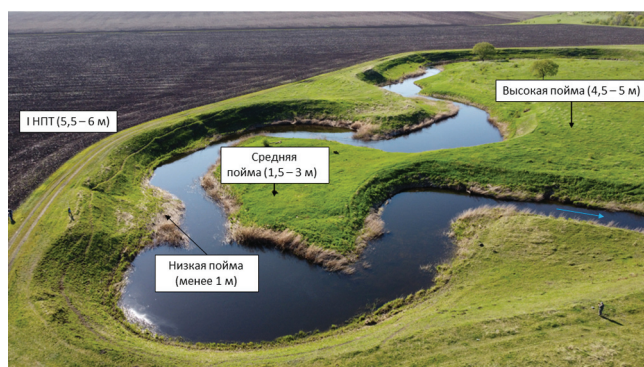


Рис. 2. Уровни поймы и первая надпойменная терраса (НПТ) на ключевом участке р. Кардаил (снимок сделан на спаде половодья 05.05.2022, низкая пойма частично затоплена)

Fig. 2. Floodplain levels and the terrace 1 in the key section of the Kardail River (photo taken at the flood recession on 05.05.2022, the low-level floodplain is partly flooded)

Морфометрические параметры русла Купавы имеют меньшие значения, чем на Кардаиле, что соответствует разнице в площадях водосбора (табл. 1). Большие излучины русла с шагом 100–160 м прослеживаются в бровках высокой поймы. Излучины меньшего размера, шагом 40–70 м наблюдаются преимущественно на Кардаиле (см. рис. 2), их шпоры образованы средней поймой. Поэтому шаг излучин Кардаила имеет больший разброс значений, чем на Купаве. При этом на Купаве наблюдается больший разброс морфометрических характеристик четковидных расширений русла.

Отношение шага излучин к ширине русла в бровках низкой поймы ($L/B_{\text{нп}}$) на Купаве изменяется от 14 до 40, что свидетельствует о несоответствии современной водности потока параметрам излучин русла ($L/B > 10$). На Кардаиле выделяются излучины меньшего размера, поэтому среднее значение этого соотношения меньше. Соотношение шага излучин к ширине русла в бровках высокой поймы ($L/B_{\text{вп}}$) составляет 1,5–3,7, что близко к среднестатистическому соотношению (от 5 до 7) и может указывать

на единовременное формирование поверхности высокой поймы и излучин русла.

Большинство крупных четковидных расширений приурочены к вершинам излучин, их расположение соответствует расположению плесов в извилистом русле. Но отдельные четки наблюдаются и на крыльях излучин, а также в старицах на поверхности поймы (рис. 3, А). Максимальные глубины русла, достигающие 4–6 м, наблюдаются в наиболее крупных четках и в большинстве случаев смещены к их верхнему по течению

краю. Четки имеют крутые подводные склоны и уплощенное дно. Поперечный профиль через расширения русла близок к симметричному, но в четках, расположенных в вершинах излучин, наиболее крутой склон часто приурочен к выпуклому берегу (рис. 3, В), что несвойственно профилю извилистого русла, где в вершине излучины у выпуклого берега чаще всего наблюдается отмель. Надводные аккумулятивные формы в расширениях русла, в том числе в вершинах излучин, отсутствуют.

Таблица 1

Морфометрические характеристики русел рек Кардаил и Купава на ключевых участках

Характеристика русла	Кардаил	Купава
Ширина русла в сужениях ($B_{\text{сп}}$), м	8	1,5–2
Ширина русла в расширениях (четках), м	19 (16–23)	15 (8–32)
Длина расширений (четок), м	38 (24–65)	34 (8–62)
Длина сужений русла, м	11–32	1–23
Глубина воды в межень в расширениях (четках), м	2–5	2,5–7
Глубина воды в межень в сужениях, м	0,2–1	0–0,5
Шаг излучин русла (L), м	37–160	72–129
Ширина русла в бровках высокой поймы ($B_{\text{вп}}$), м	25–50	31–36
$L/B_{\text{вп}}$	1,1–3,3	2,7–3,7
$L/B_{\text{сп}}$	4–19	14–40

Гидрологические и метеорологические условия 2023 г. Зимой 2022–2023 гг. реки Кардаил и Купава не замерзли, сток рек не прекращался. Наибольшая мощность льда на Кардаиле достигала 40–50 см, средняя составляла около 20 см, местами отмечались полыньи.

Основная волна половодья на Купаве продолжалась с 28 февраля по 18 марта 2023 г. (19 дней), и имела два пика, связанных с выпадением осадков (рис. 4). Наиболее высокий пик половодья с максимальным расходом воды 55,3 м³/с наблюдался 10 марта. На пике половодья уровни воды на Кардаиле и Купаве поднимались на 4–4,3 м выше меженных, но вода не доходила до бровок высокой поймы (рис. 5, А, Б). При этом нарушения дернового покрова наблюдались только на участках повреждения ледоходом (см. рис. 5, В). Следы размыва в виде оголенных корней тростника были отмечены также на уступах низкой поймы (см. рис. 5, Г). Максимальные уровни воды 2023 г. на Кардаиле были лишь немного ниже уровней рекордного за последние 16 лет половодья 2018 г., а на Купаве предполагаемые метки высоких вод 2018 г. в 2023 г. были затоплены.

Спад половодья был постепенным и продолжался до 19 июня. На спаде половодья и в последующую

летнюю межень наблюдались небольшие паводки, когда вода достигала бровок низкой поймы (1 м). С середины по конец августа на Купаве поверхностный сток воды отсутствовал, сужение русла у временного гидрологического поста обсохло, местами в нем сохранялись отдельные мелкие лужи со стоячей водой. На Кардаиле сток воды не прерывался, меженные расходы составляли около 50 л/с (табл. 2).

Сток воды р. Купавы за период с 24 февраля по 25 августа 2023 г. оценивается примерно в 18,7 млн м³, что соответствует слою стока 50 мм или 3,4 л/(с·км²). При этом за 20 суток основной волны половодья, с 28 февраля по 19 марта, прошло 87,7% от общего стока воды рассматриваемого периода. Еще 12,1% стока прошло на растянутом спаде половодья с 20 марта по 19 июня.

Скорости течения и скоростное поле потока. В сужениях русла в половодье происходит затопление низкой поймы, занятой густыми стеблями отмершего тростника, резко снижающего скорости течения. Несмотря на затопление низкой поймы, подавляющая часть стока проходит в пределах узкой (2–3 м) полосы над руслом. Измеренные на спаде половодья поверхностные скорости потока в сужениях русла Купавы достигали 1–1,3 м/с.

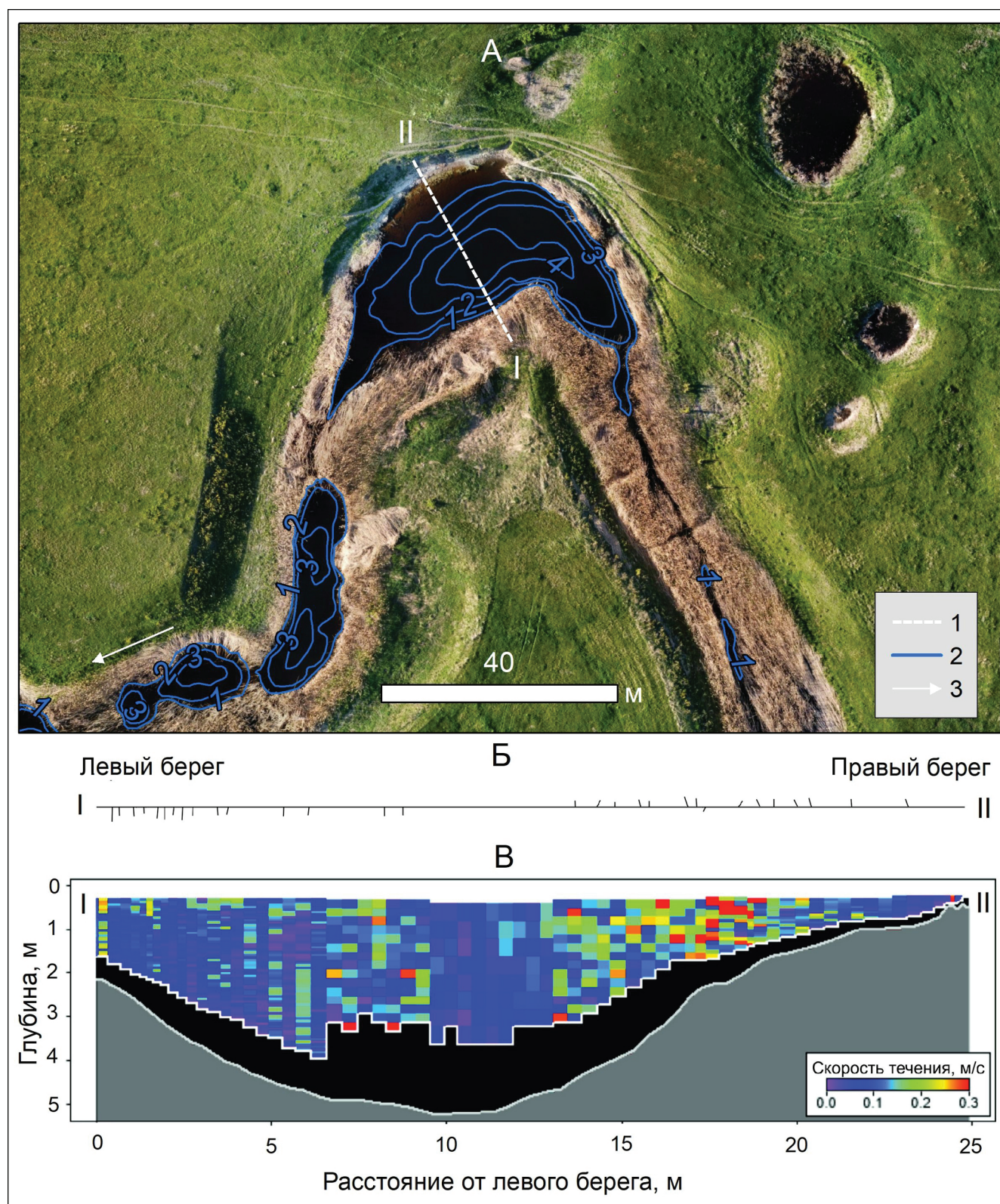


Рис. 3. Морфология русла и распределение скоростей течения в четковидном расширении русла р. Купавы: А – ортофотоплан (1 – линия профиля; 2 – изобаты, м; 3 – направление потока); Б – схема направлений течения по профилю I–II (штрихи ориентированы по направлению течения); В – распределение скоростей течения в расширении русла по профилю I–II. Черным цветом показана зона экстраполяции значений скорости, серым цветом – дно реки

Fig. 3. Morphology of the channel and distribution of flow velocities in the channel extension of the Kupava River: А – orthophotomap: 1 – profile line; 2 – isobaths, m; 3 – flow direction; Б – diagram of flow directions along profile I–II (the lines are oriented in the direction of flow); В – distribution of flow velocities in the channel extension along the profile I–II, the zone of extrapolation of speed values is shown in black, the river channel bottom is shown in grey

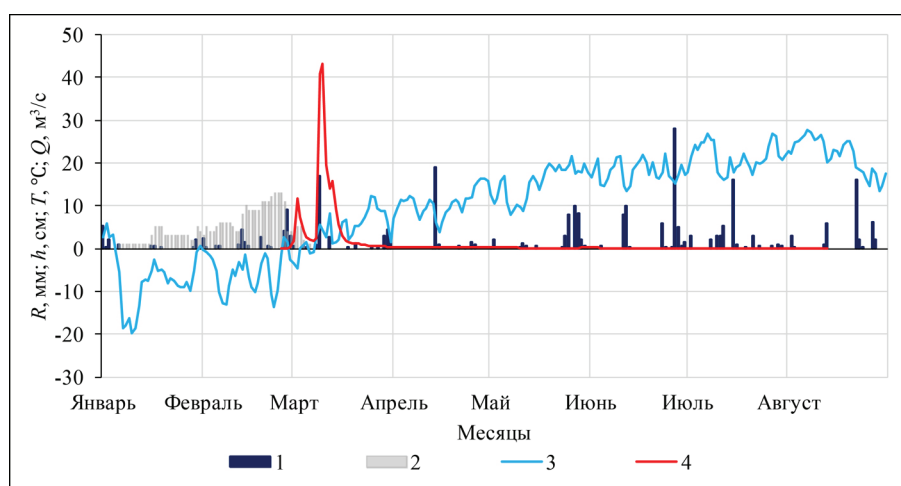


Рис. 4. Гидрограф р. Купавы и изменение метеорологических параметров по мс Урюпинск в 2023 г. Вертикальная шкала единая для всех показателей: 1 – суточная сумма осадков R , мм; 2 – высота снежного покрова h , см; 3 – среднесуточная температура воздуха T , °C; 4 – среднесуточные расходы воды Q , м³/с

Fig. 4. Hydrograph of the Kupava River and 2023 meteorological parameters at the Uryupinsk weather station (vertical scale is the same for all indicators): 1 – daily precipitation R , mm; 2 – snow depth h , cm; 3 – average daily air temperature T , °C; 4 – average daily water discharge Q , m³/s

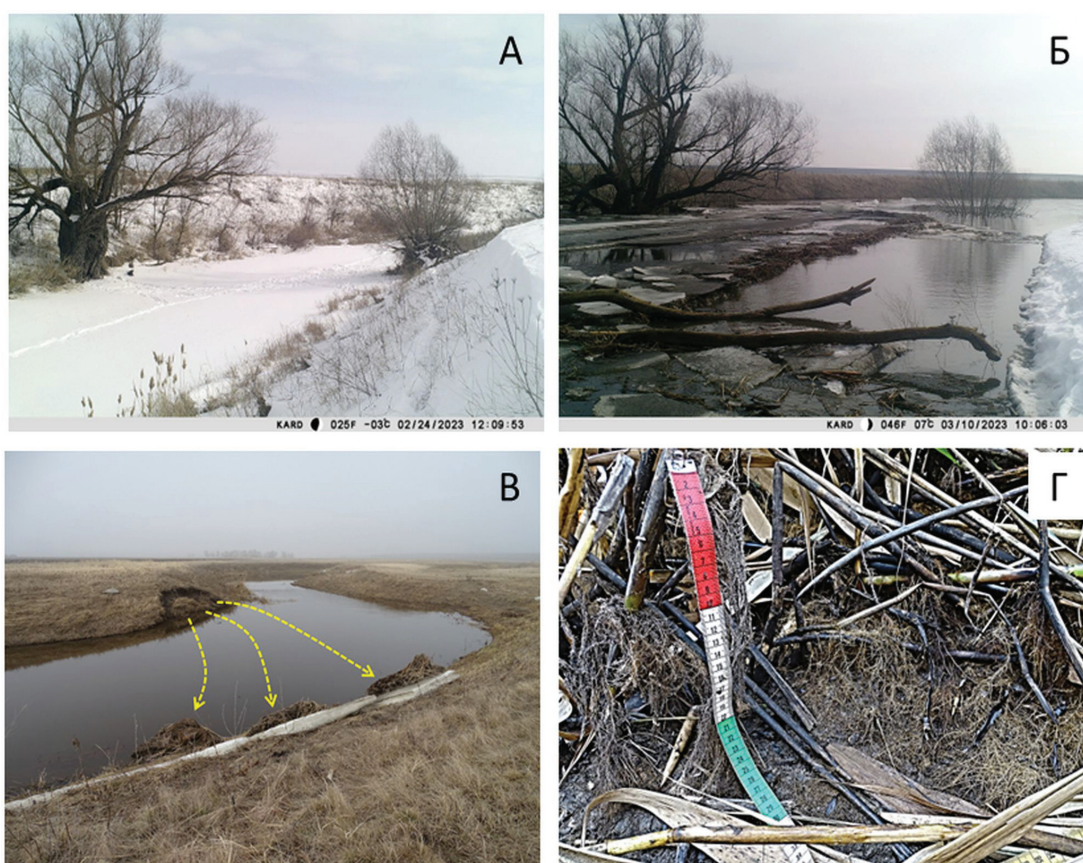


Рис. 5. Кардаил и Купавы в разные фазы водного режима:

А – р. Кардаил 24 февраля 2023 г. в зимнюю межень (снимок с фотоловушки); Б – р. Кардаил 10 марта 2023 г. прохождение пика половодья (снимок с фотоловушки); В – участок разрушения берега льдом на р. Купавы, 18 марта 2023 г.; Г – отмытые корни тростника в обсохшем русле Купавы 25 августа 2023 г.

Fig. 5. Different phases of water regime for the Kardail and Kupava rivers:

А – Kardail River during winter low water (February 24, photo from a time lapse camera); Б – Kardail River near the peak of the flood (March 10, photo from a time lapse camera); В – destruction of the bank by ice on the Kupava River, March 18, 2023; Г – washed reed roots in the dried bed of the Kupava River, August 25, 2023

Таблица 2
Измеренные уровни воды (H), расходы воды (Q) и содержание взвешенных веществ (SSC) в воде на реках Кардаил и Купава

Дата	Q , м ³ /с	H , м	SSC , мг/л
Река Кардаил			
03.05.2022	—*	100,06	—
04.05.2022	0,577	100,04	—
16.03.2023	6,1	100,81	34,9
18.03.2023	4,21	100,54	23,6
23.02.2023	—	—	—
24.08.2023	0,054	99,61	5,4
Река Купава			
06.05.2022	0,393	113,34	—
17.03.2023	1,74	113,76	12,8
18.03.2023	1,66	113,70	9,9
24.02.2023	0,0098	112,72	—
25.08.2023	0	112,53	—

Примечание. * — нет данных.

При выходе потока в расширение русла (четку) его скорости резко снижаются. В детально исследованном расширении русла Купавы образовывалась водоворотная зона: вдоль вогнутого берега направление течения соответствовало общему направлению течения реки, вдоль выпуклого — формировалось противотечение (рис. 3, Б). Скорости течения при этом не превышали 0,3 м/с и достигали максимальных значений в верхней по течению части четки, где расположена ее наиболее глубокая часть. В средней по течению части четки средняя по створу измерений скорость течения составила 0,12 м/с. При этом по центру русла скорости течения снижались до нулевых (см. рис. 3, В), а ближе к выпуклому левому берегу формировалось водоворотная зона со скоростями противотечений до 0,1 м/с.

Мутность воды, сток наносов, донные отложения. Максимальная измеренная мутность воды наблюдалась на Кардаиле на спаде половодья и составила 35 мг/л (см. табл. 2). На Купаве максимальная мутность воды на пике половодья оценивается в 55 мг/л. В межень мутность воды на Кардаиле составляла около 5 мг/л, р. Купава в летнюю межень пересыхала, сток наносов отсутствовал.

Сток взвешенных наносов р. Купавы за период наблюдений (с 24 февраля по 23 августа 2023 г.) составил 2221 т, или 6,05 т/км², из которых за период основной волны половодья (с 28 февраля по 19 марта 2023 г.) прошло более 99%. Таким образом, этот объем стока взвешенных наносов можно принять за годовой.

Взвешенные наносы р. Кардаил в половодье состоят из частиц менее 0,1 мм. Распределение гранулометрического состава частиц взвеси имеет два пика: в области значений 0,01–0,05 и 0,001–0,005 мм (рис. 6, А).

В сужениях русла р. Кардаил влекомые наносы отсутствуют, на дне вскрываются плотные сизо-серые глины с включением карбонатных конкреций длиной до 5 см. Кровля этих глин прослеживается в уступе низкой поймы на высоте 0,3 м над межennым урезом. Распределение гранулометрического состава образца этих глин идентично составу взвешенных наносов (см. рис. 6, Б). Содержание частиц менее 0,005 мм составляет 43% и частиц 0,005–0,05 мм — 56%, объемная масса образца естественной влажности — 2,02 т/м³. Ориентировочные неразмывающие придонные скорости потока для таких глин по [Мирихулава, 1988, с. 183] составляют 0,45 м/с.

На Купаве в обсохших во время межени сужениях русла влекомые наносы также отсутствуют. В уступах низкой поймы Кардаила и Купавы вскрываются тяжелые буровато-серые суглинки с прослоями растительного детрита, образовавшиеся, вероятно, путем отложения наилка и ежегодного отмирания тростника.

В расширениях русла со дна ведром для отбора наносов в конце половодья зачерпывается полужидкий ил темно-серый и темно-коричневый с ракушками. Распределение гранулометрического состава частиц донных отложений в расширениях русел Кардаила и Купавы идентично и напоминает распределение грансостава глин в сужении русла, но со срезанным пиком в области более мелкой фракции (0,001–0,005 мм) (см. рис. 6, В, Г).

Половодье 2023 г. на р. Кардаил (г.п. хут. Андреевский) было вторым по величине максимальных расходов и уровней воды за последние 16 лет, уступив только половодью 2018 г. [Автоматизированная..., 2023; Уровень воды..., 2023]. Результаты натурных наблюдений 2022–2023 гг. показали, что современный водный поток не способен производить существенных деформаций русла, высокие берега которого заросли степной растительностью с плотной дерниной. Редкие следы размыва в виде оголенных корней тростника присутствуют на уступах низкой поймы в сужениях русла, в то время как уступы высокой поймы практически не имеют следов эрозии за исключением небольших локальных участков повреждения дернового покрова ледоходом и выпасом скота. Высокое половодье 2023 г. с довольно мощным ледоходом не сопровождалось нарушением дернового покрова береговых откосов, за исключением единичных фрагментов длиной до 3–5 м, также не отмечено формирование аккумулятивных форм, т. е. русло является очень устойчивым.

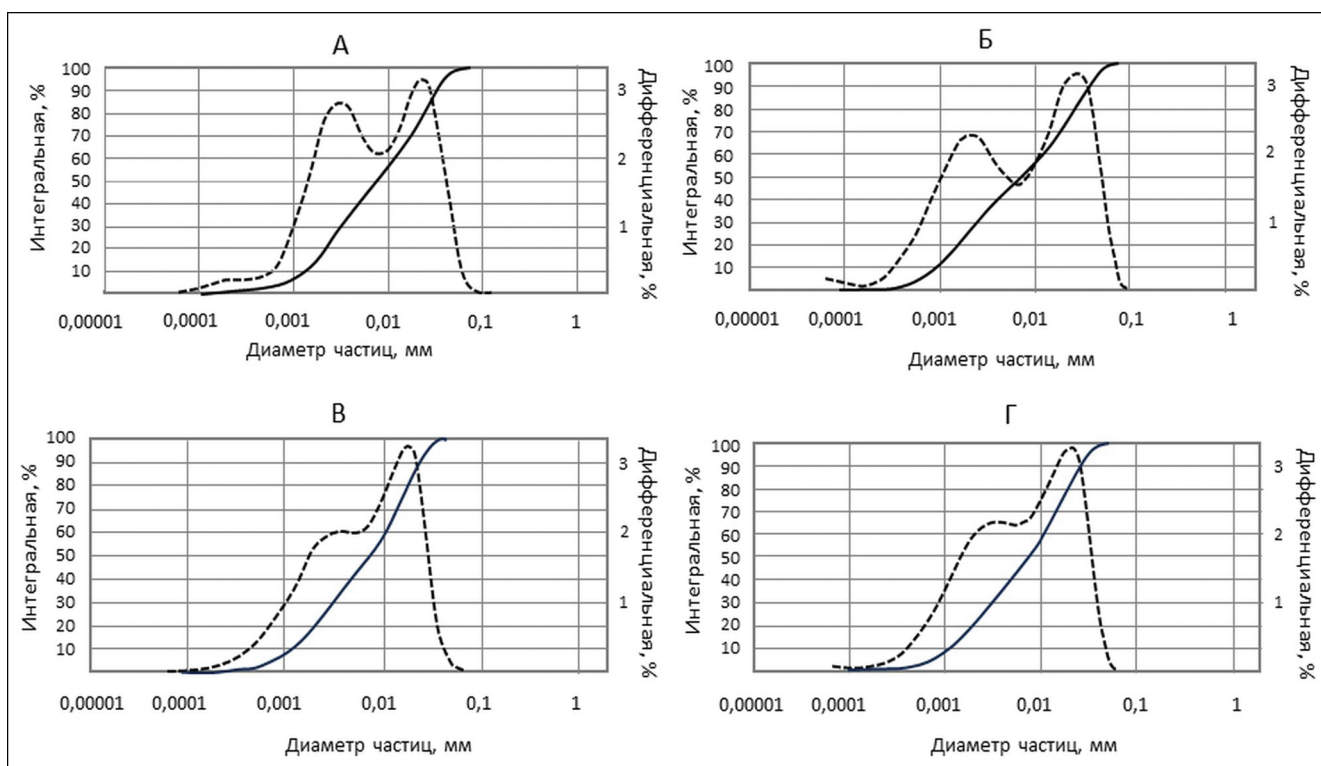


Рис. 6. Гранулометрический состав русловых отложений и взвешенных частиц в воде, выраженные в % объема: А – взвешенные частицы в воде р. Кардаил в конце половодья (17.03.2023); Б – выходы глин на дне в сужении русла реки Кардаил; В – донные илистые отложения в расширении русла р. Кардаил; Г – донные илистые отложения в расширении русла р. Купавы. Сплошная линия – кумулятивная кривая (левая шкала); пунктирная линия – распределение по размерам частиц (правая шкала)

Fig. 6. Grain-size composition of channel sediments and suspended particles in water, presented in % volume: А – suspended particles in the water of the Kardail River at the end of spring flood (March 17, 2023); Б – clay outcrops in the narrowing of the Kardail River channel; В – deposits in the channel extension of the Kardail River; Г – deposits in the channel extension of the Kupava River. Solid line – cumulative curve (left scale); dashed line – distribution by particle size (right scale)

Вероятно, малая интенсивность размыва дна и берегов также объясняется плотными глинистыми отложениями, в которых формируются русла исследованных рек. Неразмывающие придонные скорости потока (0,45 м/с и выше) достигаются только в короткий период половодья в сужениях русла, где поток концентрируется. Здесь вследствие высоких скоростей потока аккумуляция наносов отсутствует и преобладает тенденция к медленному врезанию. На низкой пойме, внутри окаймляющих русло тростниковых зарослей, скорости потока резко падают, и, напротив, идет медленное накопление наносов и растительного детрита (отмершего тростника), за счет чего она растет в высоту.

Тонкий состав размываемых пород приводит к тому, что все наносы переходят во взвешенное состояние, это подтверждается схожестью кривых распределения грансостава размываемых вмещающих глин и взвеси в воде, а также отсутствием аккумулятивных форм. В расширениях русел скорости потока резко снижаются, наиболее крупные частицы взвеси (0,01–0,05 мм) оседают. Оседание из взвеси более крупных частиц выражается в пре-

обладании пылеватых фракций в грансоставе донных отложений в расширениях в отличие от двухмодального распределения взвешенных наносов (см. рис. 6). Свежеотложенные частицы алеврита в расширениях русел легко взмучиваются потоком повторно, так как размывающие скорости свежеотложенного наилка существенно ниже, чем плотных глин [Мирицхулава, 1988]. Тонкие частицы долго не оседают, и большая их часть выносятся потоком вниз по течению. Поэтому заиление глубоких расширений русла в современных условиях происходит крайне медленно. Рельеф дна в расширениях русла, в том числе расположение наибольших глубин в верхней по течению части четки, наличие локальных повышений дна, являются следствием перераспределения водным потоком осевшего в них наилка. Придонных скоростей, не превышающих 0,3 м/с, недостаточно для размыва коренных глин, но достаточно для перемещения свежеотложенного и слабо уплотненного ила.

Невысокие темпы размыва берегов подтверждаются относительно низкими значениями мутности воды и малым стоком наносов. Модуль стока взве-

шенных наносов р. Купавы в многоводном 2023 г. составил $6,05 \text{ т/км}^2$, что является весьма небольшой величиной для освоенной степи Русской равнины, где в среднем для рек с площадями водосбора менее 1000 км^2 он оценивается в 30 т/км^2 в год [Голосов, 2006]. При этом основным источником взвешенных наносов рек является русловая эрозия. Смыв с пашни в пределах Хоперско-Бузулукской равнины не превышает 1 т/га (100 т/км^2) [Белоцерковский и др., 1983], большая часть этих наносов не доходит до рек в связи с наличием широкой плоской нераспахиваемой поверхности высокой поймы, а в последние годы – еще и со снижением поверхностного стока в период половодья [Долгов и др., 2020]. В связи с этим заиления русла практически не происходит.

Незатапливаемая поверхность высокой поймы и несоответствие ширины современного русла шагу излучин $L/B = 15 \div 40$, где B – ширина русла, L – шаг излучин, при нормальных значениях $L/B = 5 \div 7$ [Чалов, 2011], свидетельствуют о существенно меньшей величине современного максимального стока воды, по сравнению с руслоформирующими максимальными расходами воды в период образования излучин. Низкая пойма, протягивающаяся вдоль современного русла, вероятно, образовалась в пределах русла прежнего более многоводного водотока, сформировавшего излучины и высокие уровни поймы. При уменьшении стока воды, мощности потока малых рек оказалось недостаточно для формирования современных излучин меньшего размера, и он унаследовал древние большие излучины, уменьшив ширину русла на их крыльях. При этом меньшая по размерам р. Купава полностью сохранила плавные очертания больших излучин, а более многоводный Кардаил на некоторых участках сформировал вторичные изгибы русла, маркируемые средней поймой, в результате чего размеры и форма его излучин имеют большое разнообразие.

Расположение наиболее крупных четок соответствует расположению плесов древнего меандрирующего русла, поэтому четковидные расширения русла вполне могут являться его реликтами. В то же время на некоторых отрезках рек количество четок, превышает нормальную ($5\text{--}7$ ширины русла) частоту расположения плесов. Это, а также

наличие четковидных стариц на высокой пойме может свидетельствовать и о других сценариях формирования озеровидных расширений русла, в том числе криогенных. Однозначно можно лишь утверждать, что образование расширений русел рек Кардаил и Купава не связано с карстовыми процессами, так как карстующиеся породы в их бассейнах отсутствуют.

Анализ географического распространения озеровидных расширений русла в комплексе с детальными геолого-геоморфологическими обследованиями поймы позволят уточнить генезис и возраст четковидных русел.

ВЫВОДЫ

Современный максимальный сток воды малых степных рек Кардаил и Купава существенно ниже максимального (руслоформирующего) стока в период образования излучин этих рек. Об этом свидетельствует несоответствие размеров речных излучин современной ширине русла.

В настоящее время в условиях снижения поверхностного водного стока и уменьшения руслоформирующих максимальных расходов воды русла исследуемых рек очень устойчивы. Высокая пойма затапливается крайне редко, существенная береговая эрозия и горизонтальные русловые деформации отсутствуют, сток наносов низкий и имеет преимущественно русловой генезис.

Значительная часть четковидных расширений по расположению соответствует бывшим плесовым участкам древнего извилистого русла, унаследованного современным водным потоком. Вероятнее всего, большинство четок являются длительно сохраняющимися фрагментами глубоких плесов, тогда как разрастание тростника на бывших перекатных участках приводит к формированию низкой поймы и образованию сужений русла. Однако нельзя исключить других, в том числе криогенных, факторов образования древних глубоких плесов.

Сохранению четковидной формы русла способствуют глинистый состав пород, низкие темпы эрозии и аккумуляции, а также небольшой сток наносов, препятствующий заполнению глубоких озеровидных расширений.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00008, <https://rscf.ru/project/23-27-00008>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоцерковский М.Ю., Докудовская О.Г., Кирюхина З.П. и др. Количественная оценка эрозионноопасных земель бассейна Дона // Эрозия почв и русловые процессы. 1983. Вып. 9. С. 23–41.
- Варенцова Н.А., Гречушников М.Г., Повалишников Е.С. и др. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 91–108.

- Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист М-38. Волгоград. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009. 399 с.
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 674–685.
- Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Панин А.В. Земледельческое освоение территории и отмирание рек Европейской части России // Геоморфология. 1996. № 4. С. 53–60.
- Кичигин А.Н. Причины деградации русел малых рек Волгоградской области // Геоморфология. 1992. № 1. С. 56–62.
- Мирихулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 304 с.
- Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон: научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: Свое издательство, 2020. 262 с.
- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Власов М.В. Мощный поздневалдайский речной сток в бассейне Дона // Известия РАН. Серия географическая. 2013. № 1. С. 118–129.
- Рябуха А.Г., Поляков Д.Г. Особенности распространения, морфологическое строение и механизмы формирования четковидных русел малых рек степной зоны Оренбургской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 146–150.
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В. Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом (ст. 1. Морфометрические зависимости) // Геоморфология. 2017. № 1. С. 55–65.
- Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. Озеровидные расширения русел рек степной зоны и возможные причины их формирования (бассейн р. Урал в районе г. Орска) // Геоморфология. 2016. № 1. С. 73–81.
- Чалов Р.С., Ботавин Д.В., Варенов А.Л., Завадский А.С., Тарбеева А.М. Формирование русел малых рек Приволжской возвышенности в условиях многовекового сельскохозяйственного освоения // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 86–94.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
- Чернов А.В. Современное развитие малых рек центральных районов европейской части СССР // Малые реки Центра Русской равнины, их использование и охрана. М.: МО ГО СССР, 1988. С. 17–25.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Bulletin of the geological society of America*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Williams R.T., Fryirs K.A. The morphology and geomorphic evolution of a large chain-of-ponds river system, *Earth Surf. Process. Landforms*, 2020, vol. 45, p. 1732–1748, DOI: 10.1002/esp.4842.
- Электронные ресурсы*
- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniihv.ru> (дата обращения 11.10.2023).
- Лобанова Н.А. Особенности сельскохозяйственного районирования Волгоградской области // Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ «Грани познания». 2014. № 4(31). URL: www.grani.vspu.ru (дата обращения 30.09.2023).
- Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34240.htm> (дата обращения 30.09.2023).
- Расписание погоды Rp5.ru. Архив погоды в Урюпинске. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Урюпинске (дата обращения 15.09.2023).
- Уровень воды в реке Кардаил (х. Андреевский). Архивные данные. URL: <https://allrivers.info/gauge/kardail-h-andreevskiy/waterlevel> (дата обращения 01.04.2023).

Поступила в редакцию 27.11.2023

После доработки 25.01.2024

Принята к публикации 14.02.2024

MODERN PROCESSES IN THE BEADED CHANNELS OF STEPPE RIVERS OF THE KHOPER-BUZULUK PLAIN

A.M. Tarbeeva¹, I.V. Krylenko², V.V. Surkov³, N.M. Mikhailova⁴

¹⁻⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes

¹ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: amtarbeeva@yandex.ru

² Scientific Researcher; e-mail: i-krylenko@yandex.ru

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vita.surkov@yandex.ru

⁴ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: nmmikhailova@yandex.ru

Beaded-shaped channels (or chain-of-ponds), characterized by alternating lake-like extensions and narrow runs, are widespread on small rivers of the steppe zone of Russia. Extensions of channels – beads (pools or ponds), with a depth of up to 5–6 m, are of great importance for cattle breeding, providing a watering place during the dry periods of the year, when the flow of small rivers stops. However, the mechanisms of their specific channel shape formation are still debatable: it is explained by uneven siltation of channels, formation of whirlpools, groundwater discharge, karst processes or relict thermokarst. The aim of the study was to assess

the role of water flow in the formation and support of the beaded shape of river channels. The tasks were to reveal the hydrological regime of the Kardail and Kupava rivers, determine the hydrodynamics of the flow in beads and runs, describe the characteristics of erosion and accumulation processes and the sediment transport, as well as to identify relict elements of the channel and floodplain structure that do not correspond to modern water state. Water flow of the studied rivers shows a long-term decrease in snowmelt flood, as evidenced by the rare flooding of the high-level floodplain, low rates of bank dynamics, and the discrepancy between the size of meanders and the width of the channel. The annual sediment load of the studied beaded rivers is low, estimated at 6,05 t/km² in 2023. The reason is a low supply of sediments from the catchment area and low rates of erosion of channel bed and banks built of clay and silt. The present-day dynamics of water flow do not help the deepening and expansion of the beads. The flow reaches maximum speed (up to 1–1,3 m/s) in channel runs, while in channel extensions flow speeds drop to 0–0,3 m/s, supporting the sediment accumulation, despite the presence of whirlpools. A significant part of channel extensions is located on sites of former pools of the ancient meandering channel, inherited by the modern watercourse. On the former riffles the channel narrowed and a low-level floodplain was formed. Deep channel extensions were preserved due to the low sediment load and its fine composition, which prevents its rapid settling from the suspension. The results of the study suggest possible contribution of other factors to the formation of original deep pools, including the cryogenic ones.

Keywords: ponds, small rivers, siltation, suspended sediments, flow field

Acknowledgments. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 23-27-00008, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00008/>).

REFERENCES

- Belotserkovskii M.Yu., Dokudovskaya O.G., Kiryukhina Z.P., Larionov G.A., Mirgorodskaya N.N. Kolichestvennaya otsenka erozionnoopasnykh zemel' basseina Dona [Quantitative assessment of erosion-prone lands of the Don River basin], *Eroziya pochv i ruslovye protsessy*, 1983, iss. 9, p. 23–41. (In Russian)
- Chalov R.S., Botavin D.V., Varenov A.L., Zavatskii A.S., Tarbeeva A.M. Formirovanie rusel malykh rek Privolzhskoi vozvyshennosti v usloviyakh mnogovekovogo sel'skokhozyaistvennogo osvoeniya [Formation of small river channels of the Volga Upland under the centuries-long agricultural development], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2018, no. 3, p. 86–94. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, t. 2, Morfodinamika rechnykh rusel* [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 2, Morphodynamics of river channels], Moscow, KRASAND Publ., 2011, 960 p. (In Russian)
- Chernov A.V. [Modern development of small rivers of the central regions of the European part of the USSR], *Malye reki Tsentra Russkoi ravniny, ikh ispol'zovanie i okhrana* [Small rivers of the central Russian Plain, their usage and protection], Moscow, MO GO SSSR Publ., 1988, p. 17–25. (In Russian)
- Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A. Landscape-hydrological changes in the Don River basin, *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, p. 934–944.
- Goloso V.N. *Eroзионно-akkumulyativnye protsessy v rechnykh basseynakh osvoennykh ravnin* [Erosion and deposition processes in the river basins of cultivated plains], Moscow, GEOS Publ., 2006, 296 p. (In Russian)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii 1:1 000 000 (tret'e pokolenie), *Seriya Tsentral'no-Evropeiskaya, List M-38, Volgograd, Ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation 1:1 000 000 (third generation), Central European Series, Sheet M-38, Volgograd, Explanatory note], St. Petersburg, Cartography of VSEGEI, 2009, 399 p. (In Russian)
- Ivanova N.N., Goloso V.N., Panin A.V. Zemledel'cheskoe osvoenie territorii otmiranie rek Evropeiskoi chasti Rossii [Agricultural cultivation and small rivers degradation in European Russia], *Geomorfologiya*, 1996, no. 4, p. 53–60. (In Russian)
- Kichigin A.N. Prichiny degradatsii rusel malykh rek Vologodskoi oblasti [Causes of degradation of the channels of small rivers of the Vologda region], *Geomorfologiya*, 1992, no. 1, p. 56–62. (In Russian)
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders *Bulletin of the geological society of America*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Mirtskhoulava Ts.E. *Osnovy fiziki i mekhaniki erozii rusel* [Principles of Physics and Mechanics of Channel Erosion], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, 304 p. (In Russian)
- Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki vodnykh ob'ektov basseina reki Don: nauchno-prikladnoi spravochnik* [Basic hydrological characteristics of water bodies of the Don River basin: scientific and applied reference book], V.Y. Georgievsky (ed.), St. Petersburg, Svoe izdatel'stvo Publ., 2020, 262 p. (In Russian)
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Vlasov M.V. Moshchnyi pozdnevaldaiskii rechnoi stok v basseine Dona [High Late Valdai (Vistulian) Runoff in the Don River Basin], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Seriya geograficheskaya*, 2013, no. 1, p. 118–129. (In Russian)
- Ryabukha A.G., Polyakov D.G. Osobennosti rasprostraneniya, morfologicheskoe stroenie i mekhanizmy formirovaniya chetkovidnykh rusel malykh rek stepnoi zony Orenburgskoi oblasti [Distribution, morphological structure and mechanisms of formation of bead-shaped channels of small rivers in the steppe zone of the Orenburg region], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2020, no. 4, p. 146–150. (In Russian)
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V. Geomorfologicheskie podkhody k otsenke velichiny rechnogo stoka v geologicheskoy proshlom (st. 1, Morfometricheskie zavisimosti) [Geomorphologic approach to river runoff evaluation in the geological past (paper 1, Regime Equations)], *Geomorfologiya*, 2017, no. 1, p. 55–65. (In Russian)
- Tarbeeva A.M., Krylenko I.V., Surkov V.V. Ozerovidnye rasshireniya rusel rek stepnoi zony i vozmozhnye prichiny

- ikh formirovaniya (bassein r. Ural v raione g. Orska) [Lake-like extensions of the riverbeds in the steppe zone and possible causes of their formation (case study of the Ural River basin near the city of Orsk)], *Geomorfologiya*, 2016, no. 1, p. 73–81. (In Russian)
- Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Frolova N.L. Vliyaniye klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na vesennii stok v basseine Dona [Assessment of climatic and anthropogenic impact on spring runoff in the Don River basin], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geog.*, 2021, no. 5, p. 91–108. (In Russian)
- Williams R.T., Fryirs K.A. The morphology and geomorphic evolution of a large chain-of-ponds river system, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, vol. 45, p. 1732–1748, DOI: 10.1002/esp.4842.
- Web sources*
- Avtomatizirovannaya informatsionnaya Sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov (AIS GMVO) [Automated information system of state monitoring of water bodies (AIS GMVO)], URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (access date 11.10.2023). (In Russian)
- Lobanova N.A. Features of agricultural zoning of the Volga Region, *Elektronnyi nauchno-obrazovatel'nyi zhurnal VGSPU "Grani poznaniya"* [Electronic scientific and educational journal of VGSPU "Facets of cognition"], 2014, no. 4(31), URL: www.grani.vspu.ru <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34240.htm> (access date 30.09.2023). (In Russian)
- Pogoda i klimat [Weather and climate], URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34240.htm> (access date 30.09.2023). (In Russian)
- Raspisanie pogody. Arkhiv pogody v Uryupinske [Reliable Prognosis. Weather archive in Uryupinsk], URL: https://rp5.ru/Arkhiv_pogody_v_Uryupinske (access date 15.09.2023). (In Russian)
- Uroven' vody v reke Kardail (kh. Andreevskii), Arkhivnye dannye [Water level in the Kardail River (Andreevsky settl), Archived data], URL: <https://allrivers.info/gauge/kardail-h-andreevskiy/waterlevel> (access date 01.04.2023). (In Russian)

Received 27.11.2023

Revised 25.01.2024

Accepted 14.02.2024