

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЁТКОВИДНЫХ РУСЕЛ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ СТЕПНОЙ ЗОНЫ РУССКОЙ РАВНИНЫ[#]

© 2024 г. А. А. Камышев^{1,*}, А. А. Куракова^{1,**}, А. М. Тарбеева^{1,***}

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

* E-mail: arsenii.kamyshev@yandex.ru

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

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

Поступила в редакцию 10.06.2024 г.

После доработки 31.07.2024 г.

Принята к публикации 25.09.2024 г.

Чётковидными называются русла, в которых на значительном протяжении реки следуют друг за другом округлые в плане расширения русла в пределах бровок пойменных яров. Они широко распространены в криолитозоне и в степи и являются специфическим малоисследованным морфодинамическим типом русел. В условиях криолитозоны происхождение таких русел считается эрозионно-термокарстовым, но механизмы образования расширений русел в степи до сих пор дискутируются. Даже на смежных территориях их объясняют разными причинами: криогенными реликтами позднего неоплейстоцена, неравномерным заилением и другими процессами. В данной работе была проведена оценка частоты встречаемости чётковидных русел в районах севера степной зоны ЕТР. Анализировалось их распространение на малых реках Хопёрско-Бузулукской равнины и Калачской возвышенности. На одной из типичных малых рек – Кардаиле – проведен морфометрический анализ параметров русла. Выявлено, что чётковидные русла характерны для степных рек с площадями водосбора от 44 км² до 9000 км², и формируются в диапазоне уклонов от 0.26 м/км до 1.35 м/км. При площадях водосбора более 1600 км² чётки наблюдаются только в разветвленных руслах, пойменных протоках и старицах. В неразветвленном русле чётки наблюдаются в пределах излучин, у которых соотношение шага к ширине русла больше 10, а на берегах отсутствуют следы активной динамики русла. Общая протяженность чётковидного русла может достигать 80% длины реки. Выделено два типа чётков, различающихся по размерам, расположению в русле и выраженности в пределах бровок высокой или низкой поймы. Чётки, выраженные только в бровках низкой поймы, вероятно связаны с неравномерным зарастанием деградирующего русла и образованием молодой поймы, тогда как чётки, выраженные в бровках более высоких уровней поймы вероятнее всего сформированы внешними факторами – криогенными или суффозией.

Ключевые слова: озеровидные расширения русла, бочаги, малые реки, деградация русел, Хопёрско-Бузулукская равнина

DOI: 10.31857/S2949178924040089, **EDN:** FGBFIS

1. ВВЕДЕНИЕ

Чётковидные русла (в англоязычной литературе – *chain of ponds или beaded streams*) представляют собой серии глубоких расширений русла (чётков, бочагов), соединенных узкими, как правило мелководными, протоками различной протяженности. Чётковидные русла характерны для

малых рек криолитозоны, где они занимают до 50% протяженности малых рек (Григорьев, 1927; Hopkins et al., 1955; Губарьков, Лейбман, 2010; Тарбеева, Сурков, 2013; Arp et al., 2015; Тарбеева и др., 2019) и степной зоны Евразии (Тарбеева и др., 2016; Рябуха, Поляков, 2020; Беляев и др., 2021), также они описаны в Австралии (Mould, Fryirs, 2017; Williams, Fryirs, 2020). Однако исследованы они недостаточно. В наиболее распространенных классификациях русел (Кондратьев и др., 1982; Rosgen, 1994; Чалов, 2008) чётковидные русла не выделяются, а сведения о факторах их образования и закономерностях динамики очень скудны.

[#] Ссылка для цитирования: Камышев А.А., Куракова А.А., Тарбеева А.М. (2024). Распространение и морфометрические характеристики чётковидных русел северной части степной зоны Русской равнины. Геоморфология и палеогеография. Т. 55. № 4. С. 129–143. <https://doi.org/10.31857/S2949178924040089>; <https://elibrary.ru/FGBFIS>

В криолитозоне образование чётковидных русел обычно связывают с вытаиванием полигонально-жильных льдов (Norkins et al., 1955; Agr et al., 2015). Предположения насчет генезиса расширенных русел за пределами криолитозоны существенно различаются даже на смежных территориях: чётки считают рудиментарными образованиями, генезис которых обусловлен криогенными процессами в прошлом (Рябуха, Поляков, 2020; Беляев и др., 2021); остатками плесов в условиях заиления перекатов (Чернов, 1988; Иванова и др., 1996; Чалов, 2011); связывают с гидравликой потока при дефиците наносов (Чалов и др., 2018), суффозионно-карстовыми процессами (Тарбеева и др., 2016) и разгрузкой подземных вод (Кичигин, 1992).

Между тем установление генезиса чётковидных русел имеет большое индикационное значение и позволило бы прогнозировать динамику русла. Для решения проблемы генезиса чётковидных русел в степи требуется комплексный подход, включающий как наблюдение за современными процессами в русле, так и анализ их распространения, морфологии и геологического строения пойм. Данное исследование посвящено анализу распространения и морфометрических параметров чётковидных русел рек степной зоны в пределах двух схожих по климатическим условиям, но разных в геоморфологическом отношении (возвышенность и низменность) территорий в среднем течении Хопра.

2. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ

Исследовались малые реки в пределах Хопёрско-Бузулукской равнины и Калачской возвышенности (рис. 1, табл. 1).

Хопёрско-Бузулукская равнина, в пределах которой расположена большая часть водосбора р. Бузулук, характеризуется пологоволнистым моренным рельефом с отметками водоразделов 130–180 м. Морена преимущественно глинистого состава с включением валунов имеет мощность 15–30 м, местами перекрыта флювиогляциальными песками или лёссовидными суглинками мощностью до 15 м и подстилается неогеновыми и нижнемеловыми песками и глинами (Государственная геологическая карта... 2009). Максимальная отметка бассейна реки Бузулук, составляющая 220 м, находится вблизи истока реки на западных склонах Приволжской возвышенности.

Реки Калачской возвышенности дренируют правый берег Хопра и междуречье Хопра и Дона. Калачская возвышенность сложена верхнемеловыми карбонатными и палеогеновыми терригенными отложениями, перекрытыми флювиогляциальным и покровными образованиями. Максимальные от-

метки водосборов составляют около 240 м. Территория характеризуется развитием мелового карста (Основные... 2020).

Многолетняя мерзлота, с которой связывают реликтовое происхождение чётковидных русел, в последний раз существовала на данной территории в поздневалдайское время и имела температуры около $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Величко, 2002). С этим периодом связывают широкое развитие больших палеорусел на высокой пойме и низких террасах Дона, Хопра и Бузулука, когда речной сток в 2–4 раза превышал современный, а русла были врезаны на несколько метров глубже современных (Панин и др., 2013). В течение голоцена в отсутствие многолетнемерзлых пород на фоне колебаний стока происходило заполнение поздневалдайского веза, и сформировались еще две генерации поймы. На некоторых реках голоценовая пойма формировалась в условиях развития многоорукавного русла (Панин и др., 2011). История развития верхних звеньев гидросети данной территории, в том числе пойменных генераций малых рек, пока остается не исследованной.

В среднем течении Кардаила (правый приток р. Бузулук) выделены три уровня поймы и как минимум одна терраса (Тарбеева и др., 2024). Большую часть дна долины занимает высокая

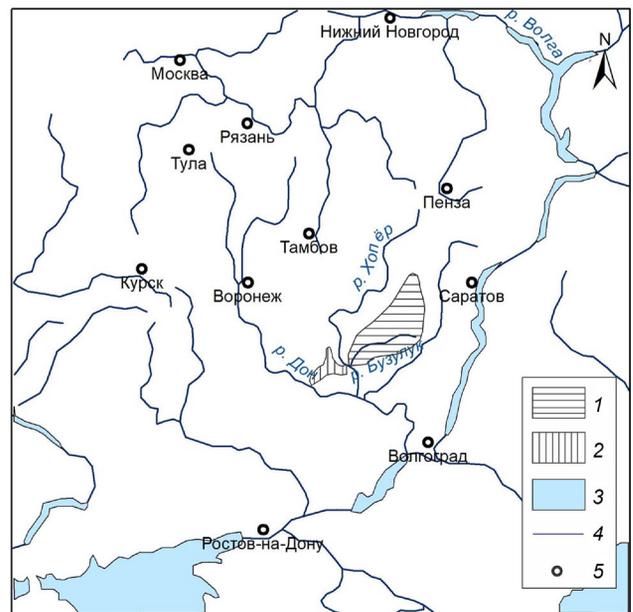


Рис. 1. Расположение исследуемых бассейнов: 1 – бассейн Бузулука (Хопёрско-Бузулукская низменность); 2 – бассейны рек Калачской возвышенности; 3 – водоемы; 4 – реки; 5 – города.

Fig. 1. Location of the studied river basins: 1 – Buzuluk basin (Khooper-Buzuluk lowland); 2 – basins rivers of the Kalach Upland; 3 – water bodies; 4 – rivers; 5 – cities.

Таблица 1. Параметры водотоков, на которых выявлены чётковидные русла
Table 1. Parameters of watercourses on which beaded channels have been identified

№	Название водотока	Общая площадь водосбора, км ²	Количество чётков	Параметры реки выше верхней по течению чётки		
				Площадь водосбора, км ²	Порядок по снимку	Порядок по карте
<i>Реки Хопёрско-Бузулукской равнины</i>						
1	Кардаил	1920	265	216	9.6	5.9
2	Каравочка	120	26	78	8.4	4.3
3	балка Крутенькая	69	23	58	8.1	4.2
4	балка Гайворонка	126	25	83	8.2	4.5
5	Кирхина	330	79	156	9.0	5.3
6	Купава	364	96	44	6.9	3.3
7	Большая Завязка	426	64	91	8.7	5.0
8	Мачеха*	438	103	71	8.0	4.3
9	Бузулук	9510	244	123	7.8	3.6
10	Черная 1	406	6	281	8.1	4.3
11	Балка Гришина	410	10	261	8.4	5.2
12	Карман	723	11	693	9.7	5.6
13	Черная 2	750	97	257	8.9	4.3
14	Паника	610	20	79	7.5	4.5
15	Балка Солонка	197	46	50	7.1	3.6
<i>Реки Калачской возвышенности</i>						
16	Тишанка	678	28	313	Не рассчитывался	
17	Акишёвка	739	10	421		
18	Песковатка	983	43	268		

Примечание. * – с учетом р. Свинухи.

(4.5–5 м над урезом межени) редко затапливаемая пойма шириной 300–400 м, плавно переходящая в первую надпойменную террасу высотой 5.5–6 м. Средняя пойма высотой 1.5–3 м представлена фрагментарно. Низкая занятая тростником пойма высотой около 1 м образовалась при зарастании и заилении части бывшего русла. Чётковидные расширения в среднем течении р. Кардаил расположены как в вершинах, так и на крыльях излучин, имеют ширину 16–23 м и глубину до 4–6 м, соединяющие их протоки имеют ширину около 8 м и глубину менее 1 м.

Климат исследуемых территорий умеренно-континентальный с недостаточным увлажнением. Среднегодовая температура воздуха по метеорологической станции Новоанинский, расположенной в западной части бассейна р. Бузулук, составляет +7.3°C, средняя температура июля +21.9°C, средняя температура января –7.9°C, количество осадков за ноябрь–март – 199 мм; за апрель–октябрь – 294 мм. Абсолютный максимум температуры воздуха – плюс 43°C; абс. минимум – ми-

нус 41°C (Свод правил... 2020). Зима малоснежная, с частыми оттепелями. 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... 2020).

Норма годового стока исследуемых рек составляет 40–60 мм. Реки характеризуются выраженным весенним половодьем (70–80% годового стока), которое является основным руслоформирующим событием. Наиболее низкие уровни воды наблюдаются в августе, некоторые реки пересыхают. Со второй половины 1970-х гг. в бассейне Дона произошли существенные изменения водного режима рек. В 1978–2017 гг. по отношению к 1936–1978 гг. объем весеннего стока рек территории сократился в среднем на 7%, объем летне-осеннего стока вырос на 166%, а зимнего – на 155% (Основные... 2020).

Исследуемая территория относится к зоне типичных степей, почвы представлены черноземами

обыкновенными, выщелоченными и южными (Основные... 2020). Земледельческое освоение среднего Дона началось во второй половине XVII в., поступление наносов в речную сеть достигло максимума в последней трети XIX в., а затем сокращалось (Голосов, 2006). В настоящее время распаивается до 80% территории (Лобанова, 2014).

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе дешифрирования космических снимков разных съемочных систем, доступных в сервисе SAS.Planet, была проведена оцифровка русел рассматриваемых рек. Русла выделялись начиная с истока (первого порядка по снимку), в качестве которого принималась самая верхняя считываемая по снимку эрозионная форма. Затем были выделены участки с разными морфодинамическими типами русел (Чалов и др., 1998): относительно прямолинейные неразветвленные русла; извилистые русла; участки развития пойменной многорукавности (в данную группу, в виду сложности их разделения дистанционными методами, включались также русла с наличием на пойме протяженных обводненных стариц). Отдельным типом выделялись зарегулированные русла, находящиеся в состоянии постоянного подпора из-за строительства крупных прудов или каскада прудов.

Дополнительно русла были разделены по степени зарастания. На основе анализа космических снимков на период межени выделены 3 категории: полностью заросшее (рис. 2, (а)), частично заросшее русло (рис. 2, (б)) и открытое русло (рис. 2, (в)).

На исследуемых реках было проведено дешифрирование всех чётковидных расширений русла – чётков. Дешифрирование чётков выполнялось на основе визуального поиска по всей русловой сети в

пределах анализируемых водосборов. Ввиду того, что критерии выделения чётков отсутствуют, выделялись все локальные расширения русла. В центре каждой из выделенных чётков устанавливалась метка с номером, затем все метки с номерами и координатами конвертировались в векторный файл и обрабатывались в программе ArcGIS.

Для участков рек как с развитием чётков, так и без них были определены площади водосбора и средние уклоны русла. Площади водосбора определялись по снимкам, значения средних уклонов водотоков – по цифровой модели местности (Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model). На основе полученных данных был построен график связи площадей водосборов с уклонами русел, на которой разделены русла с чётковидными расширениями и без них. Данный график является аналогом $Q(I)$ диаграмм, где Q – расход воды в пойменных бровках, I – уклон русла (Leopold, Wolman, 1957), которые применяются для выявления условий формирования разных морфодинамических типов русел. Для уточнения максимальной площади водосбора, при которой на реках фиксируется наличие чётков, помимо р. Бузулук были использованы ближайшие средние реки – Цна (левый приток Мокши, площадь водосбора 21 500 км²) и Ворона (правый приток Хопра, площадь водосбора 13 200 км²). Реки Цна и Ворона детально не анализировались, для них только была установлена площадь водосбора, выше которых начинается формирование чётковидных расширений русла.

Также в пределах бассейна р. Бузулук были определены порядки водотоков выше верхней по течению чётки по методике Шейдеггера (1964):

$$N = \log_2 P,$$

где P – число элементарных водотоков (водотоков первого порядка).



Рис. 2. Примеры русел с различной степенью зарастания: (а) – полностью заросшее; (б) – частично заросшее; (в) – открытое русло (не заросшее).

Fig. 2. Examples of riverbeds with varying degrees of overgrowth: (а) – completely overgrown; (б) – partially overgrown; (в) – open channel (not overgrown).

Таблица 2. Средние значения морфологических параметров излучин русла р. Кардаил по участкам: ширина русла в бровках низкой поймы ($b_{\text{нп}}$), ширина русла в бровках высокой поймы ($b_{\text{вп}}$), минимальный радиус кривизны (r) и шаг излучин (L), и их соотношения

Table 2. Average values of morphological parameters of meanders of Kardail River by sections: width of the channel in the edges of the low-level floodplain ($b_{\text{нп}}$), width of the channel in the edges of the high-level floodplain ($b_{\text{вп}}$), minimum radius of curvature (r), and half of meander wavelength (L), and their ratios

Участок	Площадь водосбора, F (км ²)	$b_{\text{нп}}$, м	$b_{\text{вп}}$, м	r , м	L , м	$L/b_{\text{нп}}$	$L/b_{\text{вп}}$	Доля излучин, $L/b_{\text{нп}} < 10$
I	376	8.7	43.7	61.6	171	20.8	4.0	0.07
II	538	11.6	36.5	53.6	153	16.5	4.2	0.36
III	936	10.0	34.7	52.2	130	14.5	3.7	0.17
IV	1630	15.2	46.3	67.5	186	14.4	4.1	0.40
V	1920	28.5	53.9	88.2	270	10.0	5.1	0.59

Элементарные водотоки определялись двумя методами: по космическому снимку и по топографической карте масштаба 1:100 000 (карта ГГЦ, 2000). Критерием выделения элементарного водотока по снимку являлось наличие морфологически выраженного (не распаханного) вреза. Критерием выделения водотока на карте являлось наличие условного знака водотока (синяя сплошная или прерывистая линия) или наличие в пределах отрицательной формы рельефа русловых прудов, т.е. – постоянного или временного водотока. Разница между порядками водотоков, выделенными разными методами, косвенно характеризует степень деградации русел малых рек в исторической перспективе, характерной для многих рек Русской равнины (Иванова и др., 1996, Панин и др., 1997).

На примере правого притока Бузулука – р. Кардаил, характеризующейся широким распространением чёток, были установлены морфометрические параметры излучин и чёток (табл. 2), оценено их изменение по мере увеличения водности реки. Для этого Кардаил был разделен на пять относительно бесприточных участков: I – исток – р. овра. Вихляевка, II – р. овра. Вихляевка – р. Каравочка, III – р. Каравочка – р. Купава, IV – р. Купава – р. Кирхина, V – р. Кирхина – устье. Для каждого из участков определена площадь водосбора и проведен статистический анализ морфометрических параметров излучин русла и чёток.

Для определения параметров чётковидного русла использовались космические снимки, доступные в сервисах GoogleEarth и SAS.Planet. Для измерений выбирались снимки сверхвысокого (менее 1 м в пикселе) разрешения, весеннего периода, где тростник на низкой пойме отсутствует или повален, а водная растительность еще не получила развития, что позволило точнее определять границы русла.

Шаг излучин (L) р. Кардаил определялся как расстояние между точками изменения знака кривизны осевой линии русла (рис. 3, (а)). Минимальные значения радиусов кривизны в пределах каждой излучины были получены при помощи специально написанной программы в Python в ArcMap 10.8 на основе обработки средней линии русла. Ширина русла р. Кардаил определялась в створах изменения кривизны осевой линии русла в верхних и нижних крыльях излучин. Определялась ширина русла в бровках высокой поймы ($b_{\text{вп}}$), и ширина русла в пределах низкой поймы ($b_{\text{нп}}$). Помимо этого, для чётковидных русел дополнительно определялись максимальная длина ($L_{\text{ч}}$) и максимальная ширина ($B_{\text{ч}}$) чёток (рис. 3, (б)).

Перечисленные параметры были установлены для 142 излучин, в пределах которых отмечено 265 чёток. Верификация дешифрируемых параметров и данные о высотных отметках уровней поймы получены в результате полевых наблюдений на двух ключевых участках русел малых рек – Кардаила и его притока Купавы (Тарбеева и др., 2024).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Закономерности распространения различных морфодинамических типов и степени зарастания русла

На исследуемых реках преобладают извилистые русла (рис. 4). Прямолинейные русла распространены в самых верховьях рек бассейна Бузулука, а также на реках Калачской возвышенности. Для верховьев рек северной части бассейна Бузулука характерно широкое распространение прудов. В нижнем течении рек развита пойменная многоруканность, которая фрагментарно встречается и в среднем течении малых рек. При этом в нижнем течении Бузулука и Кардаила пойменные протоки

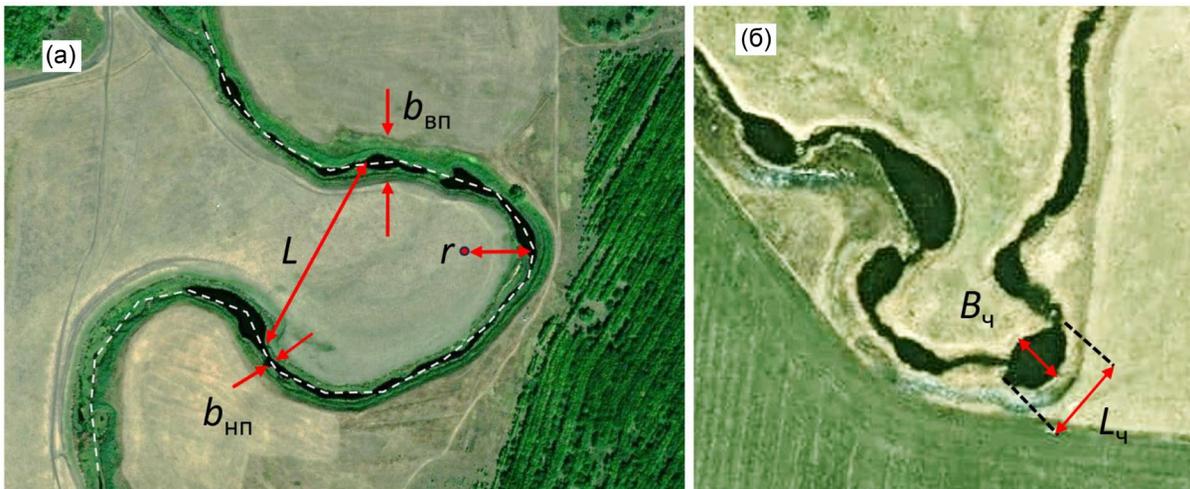


Рис. 3. Определение параметров русла р. Кардаил: (а) — излучин (ширины русла в бровках высокой поймы — $b_{вп}$, ширины русла в бровках низкой поймы — $b_{нп}$, шага излучины — L , минимальных радиусов кривизны — r); (б) — чётки (максимальных ширины чётки — $B_ч$ и максимальных длин чётки — $L_ч$).

Fig. 3. Determination of the parameters of the Kardail River channel: (a) — parameters of the meanders (the width of the channel in the edges of the high-level floodplain — $b_{вп}$, the width of the channel in the edges of the low-level floodplain — $b_{нп}$, the half of the meander wavelength — L , the minimum radius of curvature — r); (b) — parameters of beads (the maximum widths of the bead — $B_ч$ and the maximum lengths of the bead — $L_ч$).

(ерики) обводнены большую часть года, а выше по течению, например, на р. Кардаил выше устья р. Купавы, бывшие пойменные протоки сохранились лишь в форме слабо выраженных в рельефе стариц в пределах высокой поймы и первой террасы.

Полное зарастание русла характерно для самых верховьев рек. Вниз по течению полностью заросшие участки рек закономерно сменяются частично заросшими и незаросшими (рис. 5). Наиболее протяженные участки полностью заросших русел распространены в южной половине бассейна Бузулука и на реках Калачской возвышенности. Участки незаросшего русла распространены в нижнем течении р. Бузулук, нижнем и некоторых участках среднего течения рек Кардаил, Карман и др. притоков Бузулука, а также в самом верхнем течении рек, где развиты каскады прудов.

4.2. Закономерности распространения чётковидных расширений русел

Чётковидные расширения русел на исследуемых реках распространены неравномерно. В бассейне Бузулука выделено 1044 чётки в русле и 329 в старицах и второстепенных рукавах; на р. Тишанке — 28 чётки в русле и 5 в старицах, на р. Песковатке — 43 в русле и 10 в старицах, на р. Акишевке — 10 в русле и 2 в старицах. Протяжённость русла с наличием чётки варьирует от 3 км (р. Чёрная 1) до 134 км (р. Бузулук). Максимальная доля протяжённости чётковидного русла от общей длины реки составляет 85.9%, минимальная — 7.3%, среднее значение составляет

42.9%. Плотность чётки (шт./км) изменяется от 0.8 до 5.8 при среднем значении 2.2 (табл. 3).

Основные ареалы распространения чётки сконцентрированы в северной, северо-восточной и восточной частях бассейна Бузулука. Наибольшее количество чётки в основном русле зафиксировано на Кардаиле, Бузулуке, Мачехе (с учетом р. Свинухи) и Чёрной № 2. Чётковидные русла не характерны для самых верхних звеньев русловой сети и их количество уменьшается в нижнем течении Бузулука, где они распространены преимущественно в старицах (рис. 4).

Минимальное значение площади водосбора, при которой фиксируется наличие чётки, составляет 44 км² (р. Купава), среднее — 185 км², максимальное — 693 км² (р. Карман) (табл. 1). При этом максимальные площади водосборов, не затронутые формированием чётки, сконцентрированы в южной части бассейна р. Бузулук — р. Чёрная № 1, Карман и Бал. Гришина, общее количество чётки на этих реках также незначительно (11 ед. или менее), а также на реке Акишевке, для которой площадь водосбора, ограниченная верхней по течению чёткой, составляет 421 км². Для участков рек, где начинается формирование чётки, были определены порядки водотоков двумя методами. Сравнение порядков рек, посчитанных по космическому снимку и топографической карте, показало, что в среднем происходит потеря четырёх порядков (при подсчёте по карте).

Нижняя граница распространения чётки в пределах неразветвленного русла р. Бузулук соответствует впадению рек Кардаил и Карман (площадь

Таблица 3. Характеристика распространения чётковидных русел по длине водотоков
Table 3. Characteristics of the distribution of beaded channels along the watercourses

№	Название водотока	Длина реки (общая), км	Длина участка между верхней и нижней чёткой, км	Доля чётковидного русла, %	Количество чётков	Плотность чётков, шт./км***
<i>Реки Хопёрско-Бузулукской равнины</i>						
1	Кардаил	156	134	85.9	265	2.0
2	Каравочка	18	8	44.4	26	3.3
3	Балка Крутенькая	13	4	30.8	23	5.8
4	Балка Гайворонка	22	7	31.8	25	3.6
5	Кирхина	47	29	61.7	79	2.7
6	Купава	51	42	82.4	96	2.3
7	Большая Завязка	57	26	45.6	64	2.5
8	Мачеха*	61	48	78.7	103	2.1
9	Бузулук**	304	133	43.8	244	1.8
10	Чёрная 1	32	3	9.4	6	2.0
11	Балка Гришина	55	4	7.3	10	2.5
12	Карман	84	10	11.9	11	1.1
13	Чёрная 2	90	66	73.3	97	1.5
14	Паника	78	25	32.1	20	0.8
15	Балка Солонка	41	16	39.0	46	2.9
<i>Реки Калачской возвышенности</i>						
16	Тишанка	73	37	50.7	28	0.8
17	Акишёвка	61	11	18.0	10	0.9
18	Песковатка	88	22	25.0	43	2.0

Примечания. * – с учётом р. Свиноухи; ** – для р. Бузулук не учитывался участок разветвлённого русла (пойменная многоорукавность), располагающийся ниже впадения р. Кардаил; *** – плотность чётков рассчитана для участка русла между верхней и нижней чётками.

водосбора 1600 км²). При этом локально чётковидные расширения выявлены и ниже по течению, но они приурочены к участкам разделения реки на рукава в расширениях дна долины, а также к старицам. Площадь бассейна р. Бузулук, соответствующая нижней по течению чётке в старице, составляет 9240 км². Для соседних рек Цна и Ворона площади водосбора, соответствующие нижней по течению чётке, составляют 7240 км² и 9250 км² соответственно.

Анализ диаграмм связи площадей водосбора (*F*) и уклонов русла (*I*) с для участков рек с чётками и без них (рис. 6, (а)) показывает, что четковидные русла не встречаются при уклонах более 1.35 м/км. Такие уклоны характерны для верховьев рек бассейна Бузулука и рек Калачской возвышенности. Для чётковидных русел проведена верхняя огибающая (зеленая пунктирная линия), показывающая соотношение между уклонами и площадью водосборов, при которых наблюдается чётковидные русла. На рис. 6, (б) выполнено срав-

нение полученных результатов с аналогичными данными, полученными для одного из бассейнов криолитозоны (бассейна Фиш Крик на Аляске), где формирование чётков связывают с вытаяванием полигонально-жильных льдов.

4.3. Изменение морфометрических параметров излучин и чётков по длине р. Кардаил

Средние значения измеренных параметров излучин: ширины русла в бровках низкой поймы (*b_{нп}*), ширины русла в бровках высокой поймы (*b_{вп}*), минимального радиуса кривизны излучин (*r*) и шага излучин (*L*) в целом возрастают вниз по течению р. Кардаил, но наблюдается небольшое снижение значений к III участку (табл. 2).

Соотношение шага излучин к ширине русла в бровках низкой поймы (*L/b_{нп}*) существенно (в 2–4 раза) превышает нормальные значения для рек, равные 5–7, т.е. русло реки сильно сужено для излучин такого размера. Особенно сильно сужение русла проявляется в верхнем течении Кардаила, что выражается в уменьшении соотношения

$L/b_{\text{нп}}$ вниз по течению, где оно достигает значений, близких к нормальным (10).

В то же время соотношение шага излучин к ширине русла в бровках высокой поймы ($L/b_{\text{нп}}$) находится в пределах 3.7–5.1, что близко к нормальным соотношениям, хоть и несколько ниже их.

На каждом участке выделяются излучины с нормальным соотношением шага к ширине русла в бровках низкой поймы, условно принятое нами по значению $L/b_{\text{нп}} < 10$. Доля таких излучин возрастает вниз по течению (табл. 1). Шаг таких излучин в 1.2–2.2 раза меньше, чем излучин с $L/b_{\text{нп}} > 10$.

Величины максимальных ширин чётков B_q увеличиваются по длине реки, несколько снижаясь к III участку, а изменения длины L_q чётков не имеют четко выраженного тренда (табл. 4).

Визуальный анализ чётков позволил выявить две группы расширений, морфологически отличающихся друг от друга. Первая группа представляет собой расширения в пределах молодой формирующейся низкой поймы, зарастающей тростником; при этом расстояния между бровками высокой поймы не меняются (рис. 7, (a)). Они характерны для основного русла исследуемых рек.

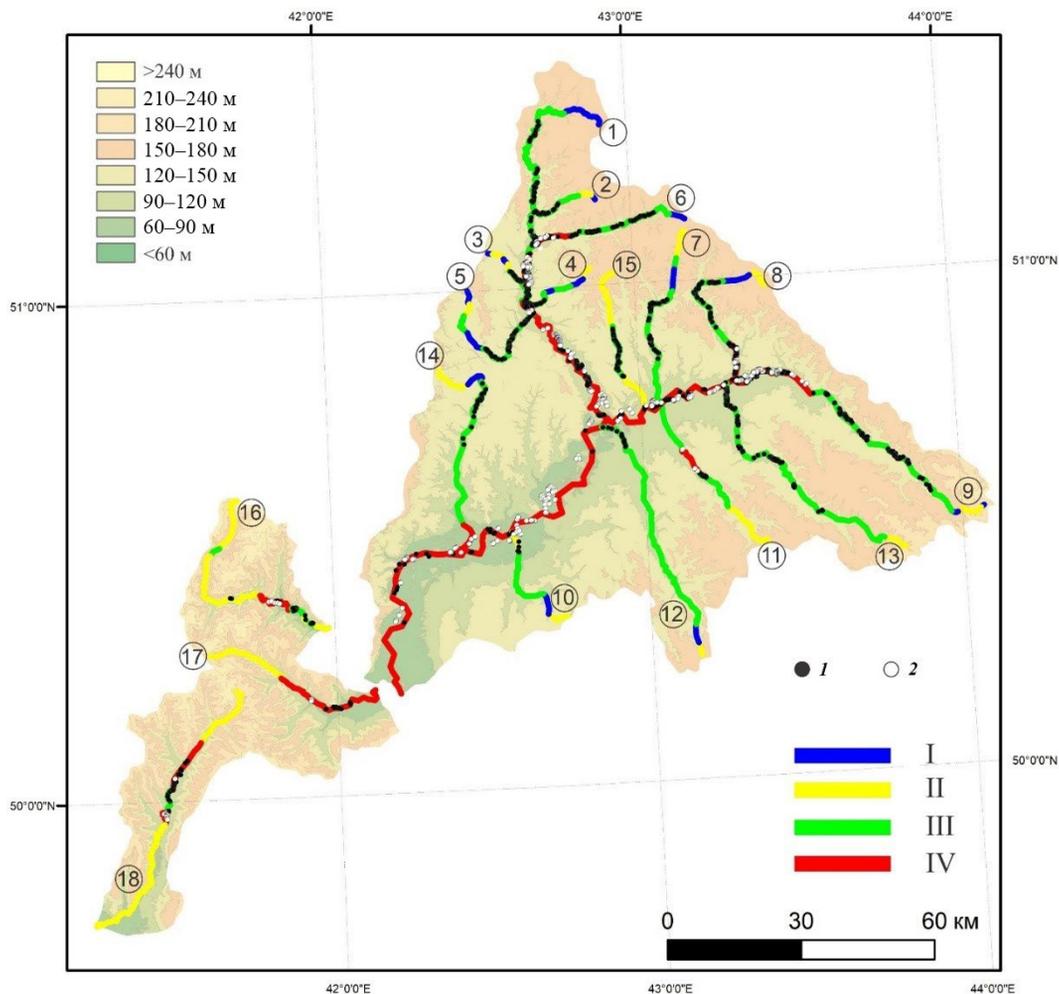


Рис. 4. Схема типов русел рек бассейна р. Бузулук – Тишанки, Акишёвки и Песковатки – с распределением чётковидных русел.

1 – чётки в основном русле водотока; 2 – чётки в старицах. I – русловые пруды (каскады прудов); II – участки с преобладанием относительно прямолинейного неразветвлённого русла; III – участки с преобладанием извилистого русла; IV – участки с наличием стариц и вторичных рукавов, как в функционирующем, так и в заиляющемся состоянии (пойменная многорукавность). Номера рек приведены в соответствии с табл. 1.

Fig. 4. Channel types of the rivers in the basin of the Buzuluk basin – the Tishanka River, the Akishevka River and the Peskovatka River – with a distribution of beaded channels.

1 – beads in the main channel; 2 – beads in the oxbows. I – channel ponds (cascades of ponds); II – areas with a predominance of a relatively straight unbranched channel; III – areas with a predominance of a meandering channel; IV – areas with the presence of oxbows and secondary branches, both in functioning and silting conditions (anabranching channels). The river numbers are given in accordance with Table 1.

Таблица 4. Морфометрические характеристики чёток р. Кардаил (L_q – максимальная длина чётки, B_q – максимальная ширина чётки)

Table 4. Morphometric characteristics of the beads of the Kardail River (L_q – maximum length of the bead, B_q – maximum width of the bead)

Участок	L_q , м			B_q , м		
	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное
I	105.1	290.0	17.0	31.2	54.0	15.0
II	61.0	139.0	25.0	26.4	58.0	9.0
III	66.6	154.0	20.0	25.8	57.0	9.0
IV	128.0	337.0	40.0	42.0	72.0	16.0
V	120.6	233.0	31.0	66.5	133.0	19.0

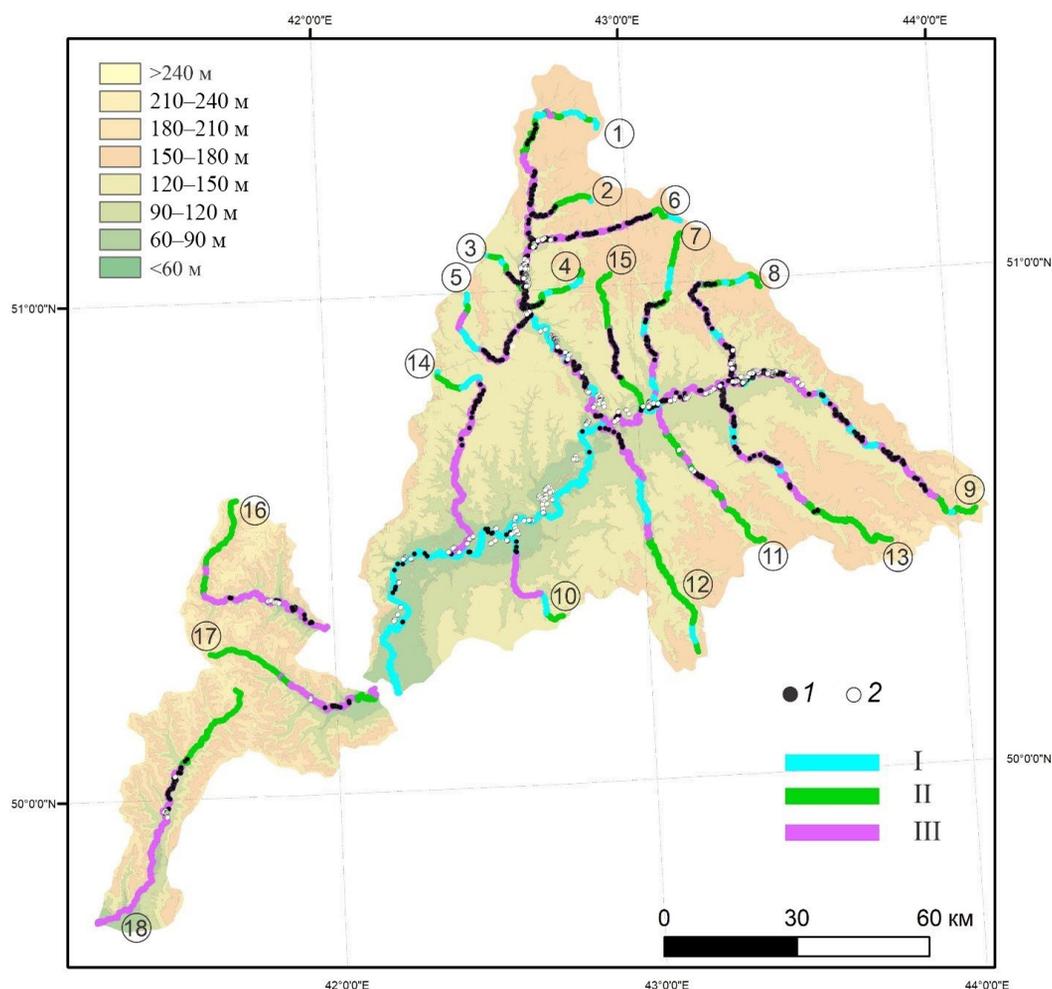


Рис. 5. Схема зарастания рек бассейна р. Бузулук – Тишанки, Акишёвки и Песковатки – с распределением чётковидных русел.

1 – чётки в основном русле водотока; 2 – чётки в старицах и вторичных рукавах. I – открытое (не заросшее) русло; II – полностью заросшее русло; III – частично заросшее русло. Номера рек приведены в соответствии с табл. 1.

Fig. 5. Overgrowth of the channels of the Buzuluk basins – the Tishanka River, the Akishevka River and the Peskovatka River – with the distribution of beaded channels.

1 – beads in the main channel; 2 – beads in the oxbows and secondary branches. I – an open (not overgrown) riverbed; II – a completely overgrown riverbed; III – a partially overgrown riverbed. The river numbers are given in accordance with Table 1.

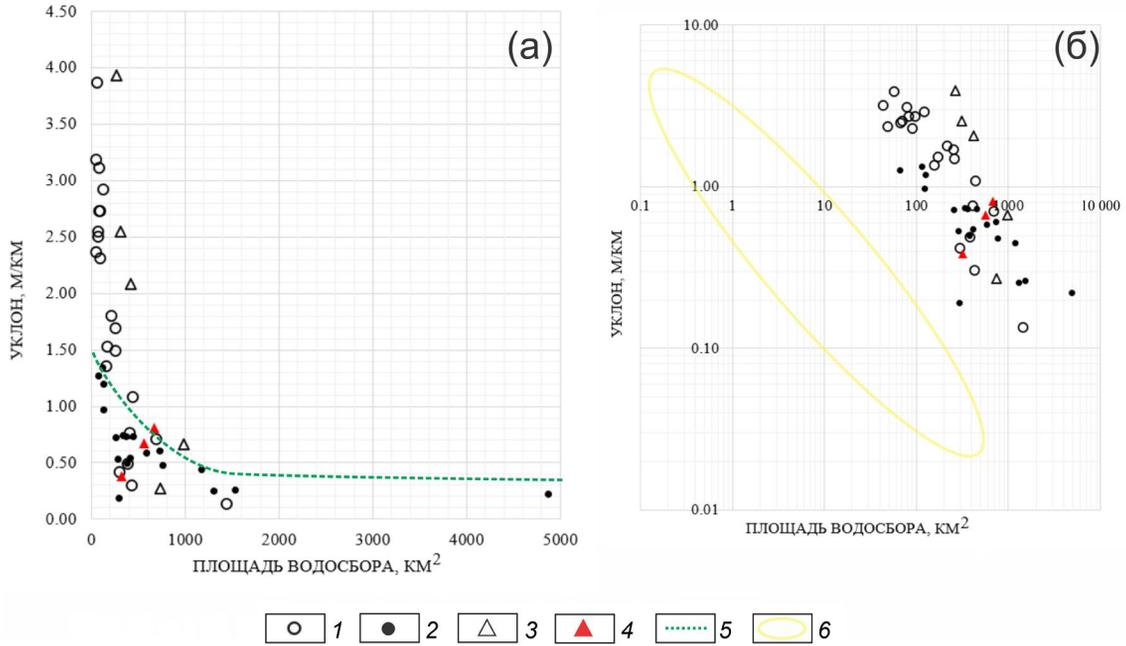


Рис. 6. Диаграммы распределения русел с чётками и без них при различных площадях водосбора и уклонах: (а) – в линейной системе координат с проведенной огибающей; (б) – в логарифмической системе координат для сравнения с реками криолитозоны.

1 – участки без чётковидных русел в пределах бассейна р. Бузулук; 2 – участки с чётковидными руслами в пределах бассейна р. Бузулук; 3 – участки без чётковидных русел в пределах бассейнов рек Тишанка, Акишёвка и Песковатка; 4 – участки с чётковидными руслами в пределах бассейнов рек Тишанка, Акишёвка и Песковатка; 5 – верхняя огибающая, ограничивающая условия распространения чётков; 6 – область, показывающая условия распространения чётков на реках Аляски (Arp at al., 2015).

Fig. 6. Diagrams of the distribution of channels with and without beads at different catchment areas and channel gradients: (a) – in a linear coordinate system with a drawn envelope; (б) – in a logarithmic coordinate system for comparison with the rivers of the cryolithozone.

1 – areas without beaded channels within the basin of the Buzuluk River; 2 – areas with beaded channels within the basin of the Buzuluk River; 3 – areas without beaded channels within the basins of the Tishanka, Akishevka and Peskovatka Rivers; 4 – areas with beaded channels within the basins of the Tishanka, Akishevka and Peskovatka rivers; 5 – is the upper envelope limiting the conditions for the distribution of beads; 6 – is the area showing the conditions for the distribution of beaded channels on the rivers of Alaska (Arp at al., 2015).

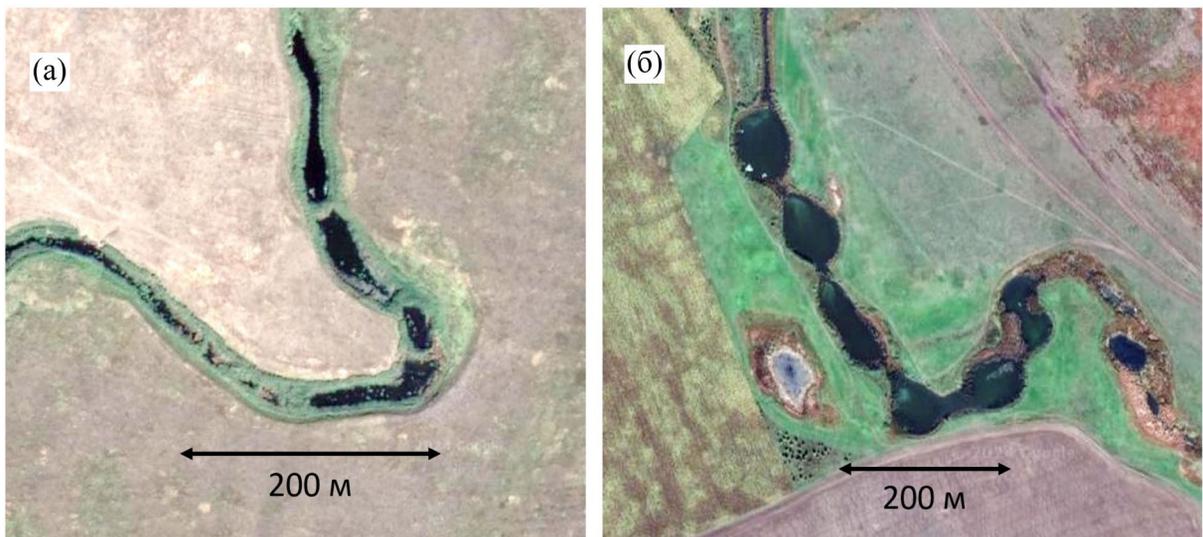


Рис. 7. Примеры чётковидных русел, относящихся к различным группам: (а) – первая группа; (б) – вторая группа.
Fig. 7. Examples of beaded channels belonging to different groups: (a) – the first group; (б) – the second group.

Вторая группа чётков представляет собой локальные расширения русла, в которых увеличивается расстояние между бровками высокой (3–5 м над урезом) луговой поймы (рис. 7, (б)). Чётки второй группы преобладают в старицах и пойменных протоках, но наблюдаются и в основном русле.

Сопоставление морфометрических параметров (длина, ширина и глубина) чётков двух выделенных типов, на которых были выполнены инструментальные измерения, показало, что длина и ширина чётков второго типа примерно в 2 раза больше, чем первого, а глубины больше примерно в 1.5 раза.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно одной из гипотез, чётки являются формой деградации русла, связанной с зарастанием и заилением русел (Чернов, 1988; Иванова и др., 1996; Чалов, 2011). Действительно, чётки свойственны руслам, не имеющим следов активной динамики (аккумулятивных форм и незадернованных берегов) в настоящее время, а также старицам и отмирающим протокам. Динамика меандрирующих русел (активные горизонтальные русловые переформирования), наблюдающаяся на средних реках территории (Вороне, Цне), и на отрезках неразветвленного русла в нижнем течении р. Бузулук, препятствует развитию чётков.

В то же время в самых верховьях рек чётки также не наблюдаются, так как там идет усиленная аккумуляция наносов, заиление русла, выражающиеся в его полном зарастании. Хопёрско-Бузулукская равнина из-за малых уклонов, низкого эрозионного потенциала осадков и наличия широких нераспахиваемых участков поймы характеризуется относительно низким смывом почв (Белоцерковский, 1983), незначительным количеством поступающих в русла бассейновых наносов и невысокими темпами заиления (Тарбеева и др., 2024). Реки Калачской возвышенности, формирующиеся в условиях больших уклонов, заилены в большей степени и характеризуются слабым распространением чётков. Наибольшее распространение чётков наблюдается на реках, которые в наименьшей степени сократили свою длину в результате деградации, что выражается в наименьшей разнице между порядками водотоков, определяемых по снимку и по карте (табл. 3).

Проведенный анализ связи площадей водосбора с уклонами русел позволил получить граничные условия современного распространения чётковидных русел. Установлено, что чётки не наблюдаются при уклонах более 1.35 м/км и при площадях водосбора более 1600 км² (в неразветвленном русле). Однако в случае деления русла на рукава, чётковидные русла встречаются в условиях степной зоны ЕТР

при площадях водосбора до 9240 км² на р. Бузулук и до 9250 км² на р. Вороне; при этом на стыке Урала и Зауральского пенеппена в пойменных протоках р. Орь чётки наблюдаются при площадях водосбора до 18600 км² (Тарбеева и др., 2016). Вероятно, эти условия зависят от слоя поверхностного стока. Так, в криолитозоне образование чётковидных русел также ограничено более низкими значениями площади водосбора и уклонов: на реках Северного склона Аляски чётки формируются в диапазоне от ≈0.1 м² до ≈500 км² (Arg et al., 2015) (см. рис. 6, (б)), а в засушливых условиях Центральной Якутии – при площадях водосбора до 3500 км² (Тарбеева и др., 2019). Ширина чётковидных расширений русла на старицах Кардаила достигает 133 м, тогда как в криолитозоне она как правило не превышает 40–50 м (Arg et al., 2015). Кроме того, формирование чётковидных стариц могло происходить при иных условиях водности, по сравнению с современным руслом реки.

В то же время чётки чаще всего осложняют извилистые и разветвленные русла, которые во время своего формирования (при иных условиях водности) имели весьма активную динамику.

Морфометрический анализ излучин р. Кардаил показал, что их размеры закономерно возрастают вниз по течению, что говорит о ведущей роли водности потока в их формировании. Незначительное снижение значений параметров излучин на III участке, вероятно, связано с наличием здесь реликтовой пойменной многорукавности, выраженной в виде стариц на пойме, тогда как современное русло наследует один из бывших рукавов многорукавного русла.

Излучины русла р. Кардаил являются унаследованными. Об этом свидетельствует несоответствие ширины русла шагу излучин, что можно объяснить зарастанием части русла и его превращением в низкую пойму.

Чётки, различающиеся по морфологии (выраженности в бровках молодой низкой или высокой поймы) и расположению (в современном русле и в старицах) с высокой степенью вероятности имеют различный генезис и возраст.

Первая группа чётков, имеющих меньшие размеры, связана с неравномерным сужением русла при образовании низкой поймы, обусловленным современным заилением и зарастанием русел: зарастание тростниковой растительностью мелководного участка русла приводит к формированию небольшого подпорного озера выше по течению. При этом наличие значительного количества заросших участков за счет более высоких коэффициентов шероховатости усиливает аккумуляцию наносов на них.

Вторая группа более крупных чётков, выраженных в бровках высокой поймы, в том числе в пределах стариц, вероятно более древняя, генезис ее пока неясен (см. рис. 7, (б)). Чётки второй группы часто имеют более выраженную округлую форму, напоминающую оседание или провал, характерные для вертикальной миграции вещества, например, при суффозии (Хоменко, 2003). Наличие таких чётков на более древних аккумулятивных поверхностях не позволяет исключить и их криогенное происхождение, что можно подтвердить или опровергнуть описанием разрезов и датированием этих палеоформ.

С достоверностью можно утверждать, что карстовые процессы не оказывают влияние на возникновение чётков, так как карстующиеся породы в пределах Хопёрско-Бузулуской равнины в верхних горизонтах осадочного чехла отсутствуют, а наличие близко залегающих карстующихся пород под чётковидными руслами рек Калачской возвышенности не приводит к увеличению количества чётков в них.

В настоящее время в литературе отсутствует определение чётковидных русел. Авторами предлагается следующее определение: чётковидное русло – это специфический морфодинамический тип русла, представляющий собой последовательность локальных расширений бровок русла, имеющих естественную природу и отличающихся округлой или овальной формой. Чётковидные русла следует выделять в качестве вторичного морфодинамического типа русла, накладывающегося на основную геометрическую форму русла: прямолинейное, извилистое или разветвленное.

6. ВЫВОДЫ

Чётковидные русла – весьма распространенный тип русел малых рек: их доля достигает 80% протяженности малых степных рек.

Чётковидные русла – это вторичный морфодинамический тип русла, накладывающегося на его основную геометрическую форму: прямолинейное, извилистое или разветвленное.

Наличие и размеры чётков связаны с размерами рек. Для севера степной зоны установлены граничные условия современного распространения чётковидных русел: уклоны не более 1.35 м/км и площади водосбора от 44 до 1600 км² (в неразветвленном русле).

Чётки различаются по морфологии (выраженности в бровках молодой низкой или высокой поймы и плановым очертаниям) и расположению (в современном русле и в старицах) и, вероятно, имеют разный возраст и сформированы различными процессами.

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. (1983). Количественная оценка эрозионно-опасных земель бассейна Дона. В сб.: *Эрозия почв и русловые процессы*. Вып. 9. С. 23–41.
- Беляев Ю.Р., Панин А.В., Бронникова М.А. и др. (2021). История формирования рельефа западной части Турано-Уюкской котловины (Тувинское нагорье) в позднем плейстоцене. *Геоморфология*. № 4. С. 15–27. <https://doi.org/10.31857/S0435428121040040>
- Величко А.А. (2002). Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130 000 лет. Атлас-монография. М.: ГЕОС. 231 с.
- Голосов В.Н. (2006). Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС. 296 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации 1 : 1 000 000 (третье поколение) Серия Центрально-Европейская. Лист М-38. Волгоград. Объяснительная записка. (2009). Под ред. С.И. Застрожнова. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ. 399 с.
- Григорьев А.А. (1927). Геоморфологический очерк Якутии. Л.: Изд-во АН СССР. 52 с.
- Губарьков А.А., Лейбман М.О. (2010). Чёткообразные русловые формы в долинах малых рек на Центральном Ямале – результат парагенеза криогенных и гидрологических процессов. *Криосфера Земли*. Т. XIV. № 1. С. 41–49.
- Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Панин А.В. (1996). Земледельческое освоение территории и отмирание рек Европейской части России. *Геоморфология*. № 4. С. 53–60.
- Кичигин А.Н. (1992). Причины деградации русел малых рек Вологодской области. *Геоморфология*. № 1. С. 56–62.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисенко Б.Ф. (1982). Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоиздат. 272 с.
- Лобанова Н.А. (2014). Особенности сельскохозяйственного районирования Волгоградской области. Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ “Грани познания”. № 4 (31). [Электронный ресурс] URL: www.grani.vspu.ru (дата обращения 30.09.2023)
- Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон: научно-прикладной справочник. (2020). Под ред. В. Ю. Георгиевского. СПб.: Свое издательство. 262 с.
- Панин А.В., Иванова Н.Н., Голосов В.Н. (1997). Речная сеть и эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейне Верхнего Дона. *Водные ресурсы*. Т. 24. № 6. С. 663–671.

- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Власов М.В. (2013). Мощный поздневалдайский речной сток в бассейне Дона. *Известия РАН. Серия географическая*. № 1. С. 118–129. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2013-1-118-129>
- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. (2011). Основные этапы формирования пойм равнинных рек Северной Евразии. *Геоморфология*. № 3. С. 20–31. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2011-3-20-31>
- Рябуха А.Г., Поляков Д.Г. (2020). Особенности распространения, морфологическое строение и механизмы формирования чётковидных русел малых рек степной зоны Оренбургской области. *Успехи современного естествознания*. № 4. С. 146–150.
- Свод правил СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99* Строительная климатология. (2020). М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/82b/SP-131.pdf>
- Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. (2016). Озоровидные расширения русел рек степной зоны и возможные причины их формирования (бассейн р. Урал в районе г. Орска). *Геоморфология*. № 1. С. 73–81. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2016-1-73-81>
- Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. и др. (2024). Современные процессы в чётковидных руслах степных рек Хопёрско-Бузулукской равнины. *Вестник МГУ. Сер. 5. География*. № 3. С. 136–149. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.11>
- Тарбеева А.М., Лебедева Л.С., Ефремов В.С. и др. (2019). Условия и процессы формирования чётковидной формы русла малой реки криолитозоны (на примере р. Шестаковки, Центральная Якутия). *Криосфера Земли*. Т. 23. № 2. С. 38–49. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2\(38-49\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-2(38-49))
- Тарбеева А.М., Сурков В.В. (2013). Чётковидные русла малых рек зоны многолетней мерзлоты. *География и природные ресурсы*. № 3. С. 27–32.
- Хоменко В.П. (2003). Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС. 216 с.
- 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., Алабян А.М., Иванов В.В. и др. (1998). Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС. 288 с.
- Чалов Р.С., Ботавин Д.В., Варёнов А.Л. и др. (2018). Формирование русел малых рек Приволжской возвышенности в условиях многовекового сельскохозяйственного освоения. *География и природные ресурсы*. Вып. 3. С. 86–94. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3\(86-94\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(86-94))
- Чернов А.В. (1988). Современное развитие малых рек центральных районов Европейской части СССР. В сб.: *Малые реки Центра Русской равнины, их использование и охрана*. М.: МО ГО СССР. С. 17–25.
- Шайдеггер А.Е. (1964). Теоретическая геоморфология. М.: Прогресс. 450 с.
- Arp C.D., Whitman M., Jones B. et al. (2015). Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes. *Biogeosciences*. V. 12. Iss. 1. P. 29–47. <https://doi.org/10.5194/bg-12-29-2015>
- Hopkins, D.M., Karlstrom, T.N.V., Black, R.F. et al. (1955). Permafrost and ground water in Alaska. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 264 F. Washington, USA. 146 p.
- Leopold L.B., Wolman M.G. (1957). River channel patterns – braided, meandering and straight. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 282-B. Washington, USA. 85 p.
- Mould S., Fryirs K. (2017). The Holocene evolution and geomorphology of a chain of ponds, southeast Australia: Establishing a physical template for river management. *Catena*. V. 149. Part 1. P. 349–362. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.012>
- Rosgen D.L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*. V. 22. Iss. 3. P. 169–199. [http://dx.doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90001-9](http://dx.doi.org/10.1016/0341-8162(94)90001-9)
- Williams R.T., Fryirs K.A. (2020). The morphology and geomorphic evolution of a large chain-of-ponds river system. *Earth Surf. Process. Landforms*. V. 45. Iss. 8. P. 1732–1748. <https://doi.org/10.1002/esp.4842>

DISTRIBUTION AND MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF BEADED CHANNELS IN THE NORTHERN PART OF THE STEPPE ZONE OF THE RUSSIAN PLAIN¹

A. A. Kamyshev^{a,#}, A. A. Kyrakova^{a,##}, and A. M. Tarbeeva^{a,###}

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

[#] *E-mail: arsenii.kamyshev@yandex.ru*

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

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

Beads – are rounded natural river channel extensions. The channels in which these extensions follow each other for a considerable length of the river are called “beaded channels” or “chain-of-ponds”. They are a specific insufficiently studied morphodynamic type of small river channels widespread in the cryolithozone and in the steppe. The origin of such channels in permafrost is considered to be erosion-thermokarst. But

the mechanisms of channel widening in the steppe are still debated. Even in adjacent territories they are explained by different reasons: cryogenic relics of the late Neopleistocene, irregular siltation and other processes. In this paper, the frequency of occurrence of beaded-shaped channels in the northern regions of the steppe zone of the European part of Russia was assessed. Their distribution in small rivers of the Khoper-Buzuluk Plain and Kalachskaya Upland was analyzed. Morphometric analysis of channel parameters was carried out on one of the typical small rivers, the Kardail. It was found that beaded channels are characteristic of steppe rivers with catchment areas from 44 km² to 9000 km² and with the range of gradients from 0.26 m/km to 1.35 m/km. With catchment areas greater than 1600 km², beads are only observed in channel branches and cutoffs. In the unbranched rivers the beads are most often observed within meanders that have a ratio of half of wavelength to channel width greater than 10 and no evidence of active channel dynamics on the banks. The length of a beaded type channel can reach 80% of entire length of the river. Two types of beads have been identified, differing in size, location in the channel, and expression within the high-level or low-level floodplain berms. The beads expressed only in the edges of the low-level floodplain are probably associated with uneven overgrowing of the degrading channel and the formation of a young floodplain, while beads expressed in the edges of high-level floodplain are most likely formed by external factors, such as cryogenic or suffusion.

Keywords: lake-like channel extensions, chain of ponds, small rivers, channel degradation, Khoper-Buzuluk Plain

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by Russian Science Foundation, project № 23-27-00008, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00008/>

REFERENCE

- Arp C.D., Whitman M., Jones B. et al. (2015). Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes. *Biogeosciences*. V. 12. Iss. 1. P. 29–47. <https://doi.org/10.5194/bg-12-29-2015>
- Belotserkovskii M.Yu., Dokudovskaya O.G., Kiryukhina Z.P. et al. (1983). Quantitative assessment of erosion-prone lands of the Don basin. In: *Eroziya pochv i ruslovy protsessy*. Iss. 9. P. 23–41. (in Russ.)
- Belyaev Yu.R., Panin A.V., Bronnikova M.A. et al. (2021). Development of the western part of the Turan-Uyuk basin (Tuva highland) in the late quaternary. *Geomorfologiya*. № 4. P. 15–27. (in Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0435428121040040>
- Chalov R.S. Alabayan A.M., Ivanov V.V. et al. (1998). Morfodinamika rusel ravninnykh rek (Morphodynamics of lowland river channels). Moscow: GEOS (Publ.). 288 p.
- Chalov R.S., Botavin D.V., Varyonov A.L. et al. (2018). Formation of small river channels of the Volga upland in conditions of centuries-long agricultural development. *Geografiya i prirodnye resursy*. № 3. P. 86–94. (in Russ.) [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3\(86-94\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(86-94))
- Chalov R.S. (2008). Ruslovedenie: teoria, geografija, praktika. T. 1: Ruslovy protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh 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. T. 2: Morfodinamika rechnykh rusel. Riverbed science: theory, geography, practice. V. 2. Morphodynamics of river channels. Moscow: KRASAND (Publ.). 960 p. (in Russ.)
- Chernov A.V. (1988). Modern development of small rivers of the central regions of the European part of the USSR. In: *Malye reki Centra Russkoi ravniny, ikh ispol'zovanie i okhrana*. Moscow: MO GOS SSSR (Publ.). P. 17–25. (in Russ.)
- Georgievsky Y.Y. (Ed.). (2020). Basic hydrological characteristics of water bodies of the Don River basin: scientific and applied reference book. St. Petersburg: Svoye (Publ.), P. 262. (in Russ.)
- Golosov V.N. (2006). Eroziionno-akkumulyativnye protsessy v rechnykh basseynakh osvoennykh ravnin (Erosion and deposition processes in the river basins of cultivated plains). Moscow: GEOS (Publ.). 296 p. (in Russ.)
- Grigoriev A.A. (1927). Geomorfologicheskii ocherk Yakutii (Geomorphologic sketch of Yakutia). Leningrad. AN SSSR (Publ.). 52 p. (in Russ.)
- Gubarkov A.A., Leibman M.O. (2010). Bead-shaped channel forms as evidence of paragenesis of cryogenic and hydrological processes in the small-river valleys of Central Yamal. *Earth's Cryosphere*. V. XIV. № 1. P. 41–49.
- Hopkins D.M., Karlstrom T.N.V., Black R.F. et al. (1955). Permafrost and ground water in Alaska. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 264 F. Washington, USA. 146 p.
- Ivanova N.N., Golosov V.N., Panin A.V. (1996). Agricultural cultivation of land and small rivers degradation in European Russia. *Geomorfologiya*. № 4. P. 53–60. (in Russ.)
- Khomenko V. P. (2003). Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov (Regularities and forecasting of suffusion). Moscow: GEOS (Publ.). 216 p.
- Kichigin A.N. (1992). Causes of degradation of the channels of small rivers of the Vologda region. *Geomorfologiya*. № 1. P. 56–62. (in Russ.)

¹For citation: Kamyshev A.A., Kyrakova A.A., Tarbeeva A.M. (2024). Distribution and morphometric characteristics of beaded channels in the northern part of the steppe zone of the Russian Plain. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 4. P. 129–143. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178924040089>; <https://elibrary.ru/FGBFIS>

- Kondratyev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. (1982). *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa* (Fundamentals of hydromorphological theory of channel process). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.). 272 p. (in Russ.)
- Leopold L.B., Wolman M.G. (1957). River channel patterns – braided, meandering and straight. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 282-B. 85 p.
- Lobanova N.A. (2014). Peculiarities of agricultural zoning of the Volgograd region. *Elektronnyi nauchno-obrazovatel'nyi zhurnal VGSPU "Grani poznaniya"*. № 4(31). [Electronic data]. Access way: www.grani.vspu.ru (access date 30.09.2023)
- Mould S., Fryirs K. (2017). The Holocene evolution and geomorphology of a chain of ponds, southeast Australia: Establishing a physical template for river management. *Catena*. V. 149. Part 1. P. 349–362. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.012>
- Panin A.V., Sidorchuk A.Y., Vlasov M.V. (2013). High late Valdai (vistulian) runoff in the Don River basin. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya geograficheskaya*. № 1. P. 118–129. (in Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2013-1-118-129>
- Panin A.V., Sidorchuk A.Y., Chernov A.V. (2011). The main stages of the flood-plain formation in northern Eurasia. *Geomorfologiya*. № 3. P. 20-31. (in Russ.). <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2011-3-20-31>
- Panin A.V., Ivanova N.N., Golosov V.N. (1997). The River Network and the Processes of Erosion and Accumulation in the Upper Don Basin. *Water resources*. V. 24. № 6. P. 609–617.
- Rosgen D.L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*. V. 22. Iss. 3. P. 169–199. [http://dx.doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90001-9](http://dx.doi.org/10.1016/0341-8162(94)90001-9)
- Ryabukha A.G., Polyakov D.G. (2020). 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*. № 4. P. 146–150. (in Russ.)
- Shaydegger A.E. (1964). *Teoreticheskaya geomorfologiya* (Theoretical Geomorphology). Moscow: Progress (Publ.). 450 p. (in Russ.)
- Svod pravil SP 131.13330.2020. SNiP 23-01-99* Stroitel'naya klimatologiya (Code of Regulations 131.13330.2020 Building climatology). (2020). Moscow: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii (Publ.). (in Russ.). <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/82b/SP-131.pdf>
- Tarbeeveva A.M., Krylenko I.V., Surkov V.V., Mikhailova N.M. (2024). Modern processes in the beaded channels of steppe rivers of the Koper-Buzuluk plain. *Lomonosov geography journal*. № 3. P. 135–148. (in Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.11>
- Tarbeeveva A.M., Lebedeva L.S., Efremov V.S. et al. (2019). Conditions and processes of formation of a beaded channel of a small river in permafrost, Shestakovka River, central Yakutia *Earth's Cryosphere*. V. XXIII. № 2. P. 33–43. [https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2019-2\(33-43\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2019-2(33-43))
- Tarbeeveva A.M., Surkov V.V. (2013). Beaded channels of small rivers of the permafrost zone. *Geography and Natural Resources*. V. 34. P. 216–220. <https://doi.org/10.1134/S1875372813030049>
- Tarbeyeva A.M., Krylenko I.V., Surkov V.V. (2016). Lake-like extensions of the riverbeds in the steppe zone and possible causes of their formation (on the example of the Ural River Basin near city of Orsk). *Geomorfologiya*. № 1. P. 73–81. (in Russ.) <http://dx.doi.org/10.15356/0435-4281-2016-1-73-81>
- Velichko A.A. (2002). Dynamics of landscape components and internal marine basins of Northern Eurasia over the last 130,000 years. Atlas-monograph. Moscow: GEOS (Publ.). 231 p. (in Russ.)
- Williams R.T., Fryirs K.A. (2020). The morphology and geomorphic evolution of a large chain-of-ponds river system. *Earth Surf. Process. Landforms*. V. 45. Iss. 8. P. 1732–1748. <https://doi.org/10.1002/esp.4842>
- Zastrozhnov S.I. (Ed.). (2009). 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: Kartfabrika VSEGEI. 399 p. (in Russ.)