

ТЕМПЫ СОВРЕМЕННОЙ АККУМУЛЯЦИИ И СОСТАВ ПОЙМЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СТЕПНОЙ РЕКИ С ЧЕТКОВИДНЫМ РУСЛОМ (НА ПРИМЕРЕ Р. КАРДАИЛ, СЕВЕР ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)

А.М. Тарбеева¹, Н.Н. Иванова², В.Р. Беляев³, И.В. Крыленко⁴, В.В. Сурков⁵

^{1–5} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева*

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

² *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: nadine_iv@mail.ru*

³ *Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: vladimir.r.belyaev@gmail.com*

⁴ *Науч. сотр.; e-mail: i-krylenko@yandex.ru*

⁵ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: vita.surkov@yandex.ru*

Четковидные русла малых рек, представляющие собой чередование озеровидных расширений и соединяющих их узких протоков, широко распространены в степной зоне, однако до сих пор их происхождение вызывает дискуссии. Одной из версий образования четковидных русел степной зоны является заиливание рек, хотя темпы аккумуляции наносов, их состав и особенности распределения на поймах таких рек специально не исследовались. В пойменном комплексе долины р. Кардаил, имеющей четковидное русло, при помощи хрономаркера изотопа ¹³⁷Cs установлены темпы аккумуляции наносов, а также оценена продолжительность затопления разных уровней поймы и определен гранулометрический состав пойменных отложений, взвешенных наносов, донных отложений и почв. Темпы аккумуляции наносов на пойме за период с 1986 по 2024 г. закономерно возрастают при увеличении продолжительности затопления и составляют не более 1,6 мм/год на высокой пойме, 2,4–3,2 мм/год на средней пойме и 10,5–13,2 мм/год на низкой пойме. Снижение высоты половодья, фиксируемое на всех реках региона, приводит к снижению темпов аккумуляции наносов на высокой и средней пойме. По сравнению с более высокими уровнями поймы, отложения низкой поймы отличаются большим содержанием растительных остатков, а также повышенной долей илистых частиц. Более тонкий состав наносов низкой поймы можно объяснить ее продолжительным затоплением при небольших скоростях течения, густой тростниковой растительностью на ее поверхности, снижающей скорости течения, а также тонким составом основных источников взвешенных наносов – продуктов смыва почв с распаханых участков водосбора и донных отложений. Выявлено, что темпы аккумуляции наносов на разных уровнях поймы р. Кардаил соответствуют таковым на других реках, в том числе не имеющих четковидного строения русла. Цокольное строение низкой поймы, приуроченной к сужениям русла, свидетельствует о том, что аккумуляция гумусированных наносов в последние десятилетия не является основной причиной формирования четковидных расширений русла, но способствует улучшению их морфологической выраженности.

Ключевые слова: заиливание, степь, малые реки, радиоцезиевый метод, гранулометрический анализ, аллювий

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.3.5

ВВЕДЕНИЕ

Четковидные, или бочажинные, русла (от англ. beaded streams, chain-of-ponds) – специфический морфодинамический тип русел малых рек, характеризующийся чередованием озеровидных расширений и узких протоков. Такие русла имеют широкое распространение в криолитозоне Северной Америки и Евразии, где их происхождение чаще всего объясняют вытаиванием полигонально-жильных льдов [Губарьков, Лейбман, 2010; Тарбеева, 2018; Arp et al., 2015]. Также четковидные русла характерны для степной зоны Евразии, где основными гипотезами их происхождения являются реликто-

вый термокарст позднего неоплейстоцена [Рябуха, Поляков, 2020], карстово-суффозионные процессы [Тарбеева и др., 2016] и заиливание русел малых рек на фоне снижения стока воды и увеличения стока наносов [Чернов, 1988; Иванова и др., 1996; Чалов, 2011].

В Южном полушарии четковидные русла были широко распространены на юго-востоке Австралии, однако с началом европейской колонизации (1820 г.) и сельскохозяйственного освоения большинство рек утратили четковидную форму в результате врезания русел либо заполнения наносами [Eyles, 1977]. Предполагается, что образование глубоких озеровидных расширений русел в верховьях

рек связано с периодическим их размывом, тогда как мелководные сужения русла укрепляются за счет их зарастания тростником, задерживающим наносы [Mould, Fryirs, 2017]. На более крупных меандрирующих реках расширения русел являются древними плесами, а сужения формируются на месте зарастающих древних аккумулятивных форм, при этом отмечается возможная роль разгрузки подземных вод в поддержании глубины озеровидных расширений [Williams, Fryirs, 2020].

Предлагаемое исследование посвящено оценке одной из гипотез образования четковидных русел в степях европейской части России – заилению рек. Антропогенное воздействие на бассейны малых рек, прежде всего распашка территории, привело к активному поступлению наносов с водосборов и их аккумуляции в днищах балок, а также в руслах и на поймах малых рек Русской равнины [Дедков, Мозжерин, 1984; Belyaev et al., 2012; Маркелов и др., 2012], что стало одной из причин деградации речной сети [Иванова и др., 1996; Голосов, 2006]. Средние мощности наилка на поймах степных рек превышают 1 м, при этом сильно варьируют в зависимости от размера реки, степени освоенности бассейна, а также на разных участках поймы, достигая максимальных значений в прирусловой части [Бутаков и др., 2000].

Четковидная (бочажинная) форма русла в степях считается одной из стадий деградации русел малых рек, при которой озеровидные расширения сохраняются на месте бывших плесов, тогда как перекаты зарастают, на них происходит накопление наилка, что приводит к образованию молодой поймы и сужению русла [Иванова и др., 1996; Чалов, 2011]. В то же время темпы аккумуляции наносов, их состав и особенности распределения на поймах рек с четковидным руслом специально не исследовались. Целью данной работы была оценка темпов аккумуляции наносов на разных уровнях поймы малой степной реки с четковидным руслом при помощи радиоизотопа ^{137}Cs , а также определение условий их накопления.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Природные условия территории. В качестве объекта исследований выбрана малая река Кардаил – правый приток р. Бузулук на севере Волгоградской области (рис. 1А). Бассейн р. Кардаил расположен в пределах Хоперско-Бузулукской низменности – южной части Окско-Донской равнины. Междуречья имеют высоту до 150–170 м, урез реки расположен на отметках 106–108 м. Рельеф территории образован раннеленоплейстоценовой (донской) мореной, перекрытой лессами или флювиогляциальными отложениями, в долинах рек морена

размыта [Государственная геологическая карта..., 2009]. Склоны в основном длинные (до 1,5 км) и очень пологие (2–5°), бровки долины Кардаила слабо выражены. Современное оврагообразование отсутствует, линейные эрозионные формы представлены древовидной сетью неглубоких склоновых ложбин.

Ключевой участок расположен у хут. Верхнекардаильский, где площадь водосбора р. Кардаил составляет 572 км² (см. рис. 1Б). На исследованном участке днище долины имеет ширину около 1 км. Русло Кардаила удалено от склонов долины и образует большие унаследованные излучины, врезаемые в поверхность высокой поймы. Унаследованные излучины осложнены излучинами второго порядка, шпоры которых образованы фрагментами средней поймы. Молодая низкая пойма протягивается узкой полосой вдоль русла (рис. 2). На всем протяжении русло имеет четковидные расширения, их ширина составляет 15–25 м, при ширине сужений 3–8 м. Меженная глубина в расширениях русла достигает 3–5 м, тогда как в сужениях – не более 0,5 м. Средний уклон реки на участке составляет 0,3‰.

Водный режим р. Кардаил характеризуется выраженным весенним половодьем с резким подъемом и медленным спадом уровней, обусловленным снеготаянием в сочетании с дождевыми осадками [Основные гидрологические характеристики..., 2020; Тарбеева и др., 2024]. Наименьший сток воды (около 50 л/с) наблюдается в летнюю межень. Высота редких летних паводков обычно существенно ниже половодья. Зимой реки не перемерзают, осенью и в начале зимы нередко наблюдаются паводки, обусловленные дождями и оттепелями. На реках формируется достаточно мощный (до 40–50 см), часто многослойный ледяной покров. С конца 1970-х гг. на фоне повышения зимних температур и снижения мощности и продолжительности залегания снежного покрова наблюдается уменьшение высоты половодья и увеличение меженного стока. Это приводит к снижению частоты и продолжительности затопления высокой и средней поймы рек бассейна среднего Дона [Солодовников, Шинкаренко, 2020].

Район исследований расположен в зоне типичных степей, где распространены черноземы обыкновенные и выщелоченные [Основные гидрологические характеристики..., 2020]. Интенсивная распашка степной зоны началась с середины XIX в. [Иванова и др., 1996]. В настоящее время распахиывается до 80% территории [Лобанова, 2014]. Пашня полностью занимает междуречья, склоны и первую террасу, местами подходящую непосредственно к руслу реки. Пойма занята лугами, используется для выпаса скота и сенокоса. Продукты смыва пахотного горизонта почв являются основным источником бассейновой составляющей стока наносов р. Кардаил.

Радиоцезиевый метод. Оценка темпов аккумуляции наносов на поверхности поймы проводилась при помощи ^{137}Cs – долгоживущего изотопа искусственного происхождения. Изотоп ^{137}Cs сразу после выпадения прочно сорбируется почвенными частицами и в дальнейшем перемещается только вместе с ними, что и определяет его широкое применение в качестве маркера эрозионно-аккумулятивных процессов [Walling, Bradley, 1989]. Массовые выпадения изотопа ^{137}Cs на земную поверхность начались в 1954 г. в результате ядерных испытаний в открытой атмосфере (т. н. глобальные выпадения). После запрета ядерных испытаний в атмосфере поступление ^{137}Cs в окружающую среду на Европейской территории России (ЕТР) связано с аварией на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г. [Израэль, 1996]. Количественные оценки скорости осадконакопления на ЕТР с использованием изотопа ^{137}Cs , как глобального, так и чернобыльского происхождения,

проводились на поймах рек разных порядков, в том числе на малых реках [Маркелов и др., 2012; Иванова и др., 2014]. Однако для определения темпов аккумуляции наносов на поймах рек с четковидным строением русла этот метод не применялся.

Оценка темпов аккумуляции в пределах пойменного комплекса производилась на основе анализа вертикального распределения ^{137}Cs в отложениях разных уровней поймы. Для этого на ключевом участке было заложено пять разрезов, их высотная привязка осуществлялась при помощи геодезического спутникового приемника (см. рис. 2, табл.). Из стенок разрезов был проведен послойный отбор образцов с интервалом 5 см на низкой пойме, где отложения сильно влажные, вязкие и содержат множество корней тростника (разрезы N-3 и K-8), и 3 см на средней и высокой пойме, где отложения находятся в сухом состоянии и лучше поддаются пробоотбору (разрезы K-2, K-5 и K-7).

Таблица

Запасы изотопа ^{137}Cs в пересчете на уровень 1986 г. в пахотном горизонте водораздельных почв и отложениях пойменного комплекса и темпы аккумуляции наносов на разных уровнях поймы

Разрез	Год отбора	Высота над урезом*, м	Абс. отметка, мБС	Общий запас, кБк/м ²	Запас в пике, кБк/м ²	Глубина пика, см	Темпы аккумуляции, мм/год
<i>Низкая пойма</i>							
N-3	2023	1,1	107,3	20,2	6,6	40–45	10,8–12,2
K-8	2024	0,6	106,8	12,8	2,5 (4,9)**	40–50	10,5–13,2
<i>Средняя пойма</i>							
K-2	2023	2,6	108,7	4,0	1,0	12–15	размыв
K-7	2024	2,7	108,9	10,0	2,5	9–12	2,4–3,2
<i>Высокая пойма</i>							
K-5	2024	6,3	112,4	9,4	4,2	3–6	0,8–1,6
<i>Водораздел (фон)</i>							
K-6 5 обр.	2024	42,3	148,4	9,3 (7,7–10,8)	–***	–	–

Примечания. *Отметка уреза Кардаила на дату измерений (13.08.2024) – 106,1 мБС. **Суммарный запас в слое 40–50 см. ***Нет данных.

Для оценки фонового содержания ^{137}Cs на распаханной приводораздельной поверхности в точке K-6 (см. рис. 1Б) были отобраны пять интегральных образцов почвы методом конверта. Здесь отсутствует как привнос, так и вынос материала, соответственно уровень плотности загрязнения изотопом ^{137}Cs определяется только величиной атмосферных выпадений и процессом радиоактивного распада. В результате регулярной распашки ^{137}Cs достаточно равномерно распределен в верхних 25–27 см почвы. Отбор фоновых образцов проводился цилиндрическим пробоотборником диаметром 6,6 см, который заглублялся на

30 см от поверхности, чтобы охватить всю глубину вспашки, в каждой точке отбирались по две колонки. Образцы взвешивались, после чего материал перемешивался, и отбиралась навеска 300 г.

В лаборатории образцы высушивались и гомогенизировались. Содержание ^{137}Cs определялось на гамма-спектрометре с детектором из очень чистого германия производства компании ORTEC с погрешностью измерений, не превышающей 7%.

Для корректного сравнения измеренные в образцах величины запаса изотопа были пересчитаны на уровень 1986 г. с учетом радиоактивного распада ^{137}Cs :

$$W_{1986} = W_n \cdot 2^{(t-30,2)},$$

где W_{1986} – запас ^{137}Cs в 1986 г., кБк/м²; W_n – запас ^{137}Cs в год пробоотбора, кБк/м²; t – количество лет, прошедшее после чернобыльской аварии, 30,2 года – период полураспада изотопа ^{137}Cs .

По данным анализа послойных образцов строились диаграммы вертикального распределения ^{137}Cs

в разрезе, и рассчитывались суммарные запасы изотопа ^{137}Cs . Слои с максимальной концентрацией изотопа ^{137}Cs (так называемые «пики» чернобыльских выпадений) маркируют уровень поверхности поймы в 1986 г. В силу низких значений, сопоставимых с погрешностью измерений, глобальные выпадения не использовались для датирования.

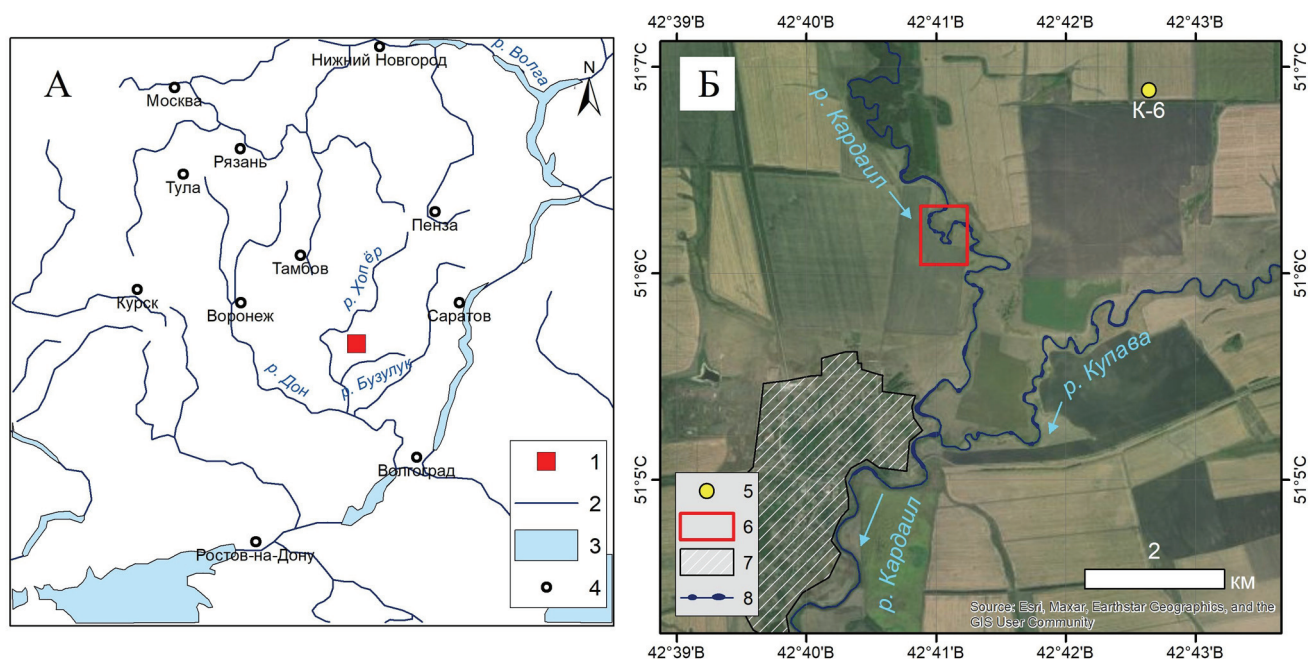


Рис. 1. Район исследований: А – обзорная схема: 1 – положение участка работ; 2 – реки; 3 – водоемы; 4 – города; Б – расположение ключевого участка на космическом снимке ESRI: 5 – точка отбора фоновых проб; 6 – граница участка отбора проб пойменных отложений (см. рис. 2); 7 – хут. Верхнекардаильский; 8 – четковидные русла

Fig. 1. Study area: A – overview diagram: 1 – location of the key site; 2 – rivers; 3 – water bodies; 4 – cities; Б – location of the key site on the ESRI image: 5 – reference sampling site; 6 – boundary of the floodplain sediment sampling site (shown in Fig. 2); 7 – Verkhnekardailsky farmstead; 8 – beaded channels

Для интегральных образцов оценивались суммарные запасы ^{137}Cs , которые принимались за фоновые значения и сравнивались с запасами в пойменных разрезах. Если общий запас изотопа ^{137}Cs в разрезе пойменных отложений больше фоновых значений, то происходила аккумуляция наносов, если меньше – то предполагается, что часть пойменных отложений была размыва.

Гранулометрический анализ. Изотоп ^{137}Cs сорбируется преимущественно пылеватыми и глинистыми частицами, поэтому гранулометрический состав отложений может оказывать влияние на его распределение в разрезе. Для оценки такого влияния все отобранные на радиоцезиевый анализ образцы пойменных отложений подвергались гранулометрическому анализу. Были построены графики распределения в разрезах фракции менее 0,05 мм.

Для выявления источников поступления материала на пойму определялся гранулометрический

состав пахотного горизонта почв на водоразделе (точка К-6, см. рис. 1Б) и на распаханной террасе (разрез К-9, рис. 2А), а также донных отложений и взвешенных наносов р. Кардаил.

Гранулометрический анализ проводился на лазерном дифрактометре *Fritsch Analysette 22 MicroTec plus*, позволяющем определять содержание частиц в диапазоне 0,08–2000 мкм (0,00008–2 мм). Образцы предварительно обрабатывались пирофосфатом натрия и ультразвуком, измерения каждого образца проводились в трехкратной повторности и усреднялись. Обработка результатов проводилась в программе MaS Control. Расчет размеров частиц проводился по модели Фраунгофера. По полученным данным строились диаграммы распределения фракций по Н.А. Качинскому [1958].

Гидрологические наблюдения. Для выявления относительной продолжительности затопления раз-

ных уровней поймы с 24 августа 2023 по 13 августа 2024 г. в сужении русла р. Кардаил на ключевом участке был установлен барометрический самописец уровня и температуры воды с интервалом записи один раз в час. Данные уровней, полученные с самописца, были компенсированы на изменение атмосферного давления и приведены к значениям абсолютной высоты. На построенный по этим данным график хода уровней нанесены линии, соответствующие высотным отметкам бровок разных уровней поймы.

Для оценки гранулометрического состава были отобраны донные отложения в сужении и центральной части четковидного расширения русла, а также проба воды для определения состава взвешенных наносов. Проба воды была отобрана 16 марта 2023 г., на спаде половодья, когда уровень воды доходил до бровки средней поймы, а расход воды составлял 6,1 м³/с. Проба фильтровалась через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм, а осевшая на нем взвесь использовалась для определения гранулометрического состава.

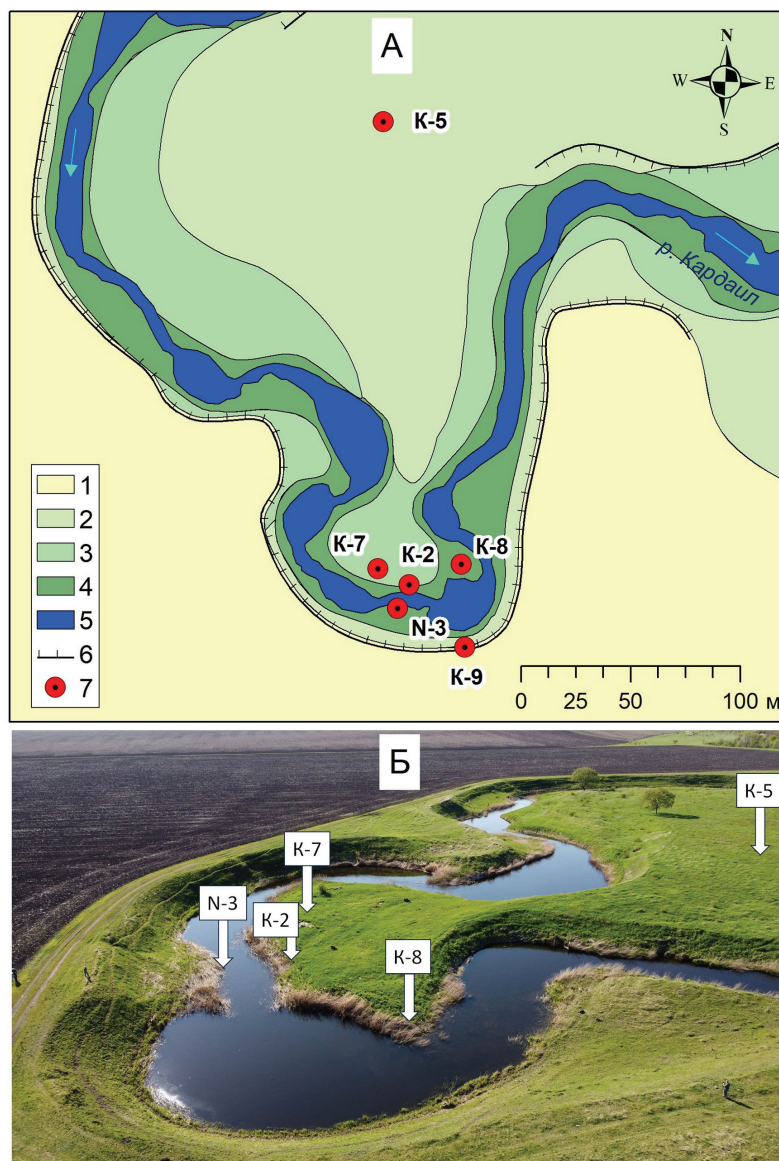


Рис. 2. Расположение разрезов на разных уровнях поймы р. Кардаил:

А – геоморфологическая схема: 1 – распаханная терраса (5,5–6 м над урезом); 2 – высокая пойма (5–5,5 м); 3 – средняя пойма (2,5–3 м); 4 – низкая пойма (до 1–1,2 м); 5 – русло; 6 – бровки; 7 – разрезы; Б – аэрофотоснимок, начало мая 2022 г., вид вверх по течению, низкая пойма частично затоплена

Fig. 2. Location of pits and sections at different levels of the Kardail River floodplain:

А – on the geomorphologic scheme: 1 – plowed terrace (5,5–6 m above the water level); 2 – high floodplain (5–5,5 m); 3 – middle floodplain (2,5–3 m); 4 – low floodplain (up to 1–1,2 m); 5 – channel; 6 – edges; 7 – sediment sections; Б – on the aerial photograph of early May 2022, view upstream, the low floodplain is partially flooded

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Плотность загрязнения ^{137}Cs на разных геоморфологических позициях. В пяти фоновых образцах из пахотного горизонта почв водораздельной поверхности (точка К-6, см. рис. 1Б), где предполагается отсутствие поступления и выноса материала, запас изотопа ^{137}Cs в пересчете на уровень 1986 г. составляет в среднем $9,3 \text{ кБк/м}^2$ (см. табл.), что несколько меньше значений, установленных ранее для этой территории на основе мелкомасштабного картирования [Атлас радиоактивного загрязнения..., 1998] и составляющих $10\text{--}20 \text{ кБк/м}^2$, включая величину глобальных выпадений $2\text{--}2,5 \text{ кБк/м}^2$.

По данным гидропоста хут. Андреевский, расположенного ниже по течению от ключевого участка (площадь водосбора 1310 км^2), в 1986 г. пик половодья на р. Кардаил пришелся на 1 апреля. К 26 апреля (дата Чернобыльской аварии) уровни воды были на $50\text{--}60 \text{ см}$ выше меженных. Таким образом, изотоп цезия должен был выпасть на осушенную поверхность средней и высокой, а, вероятнее всего, и низкой поймы р. Кардаил, и зафиксироваться в верхних сантиметрах почвы, то есть должен быть

хорошо выражен в разрезах разных уровней поймы в случае отсутствия размыва.

Отложения высокой поймы изучались в разрезе К-5, расположенном в ее центральной возвышенной части, удаленной как от русла, так и от склонов долины (см. рис. 2). В разрезе вскрывается буровато-серый алевритистый, хорошо оструктуренный мелко-среднекомковатый суглинок с пятнами и линзами более светлого рыжевато-серого и рыжевато-коричневого материала. С глубины $0,25 \text{ м}$ суглинок темнеет, с $0,75 \text{ м}$ наблюдается переслаивание с более опесчаненным материалом. В разрезе выделяется пик запасов ^{137}Cs ($4,2 \text{ кБк/м}^2$) в приповерхностном слое отложений ($3\text{--}6 \text{ см}$) (рис. 3Д). Суммарная плотность загрязнения разреза высокой поймы составляет $9,4 \text{ кБк/м}^2$ (см. табл.), т. е. близка к установленным средним фоновым значениям. Незначительное заглубление слоя с максимальными значениями запаса ^{137}Cs могло быть вызвано биотурбациями, эоловой аккумуляцией, вертикальной миграцией либо непродолжительным затоплением. Если принять, что накопившийся выше пика материал представляет собой речные наносы, то темпы аккумуляции в послечернобыльский период не превышают $1,6 \text{ мм/год}$.

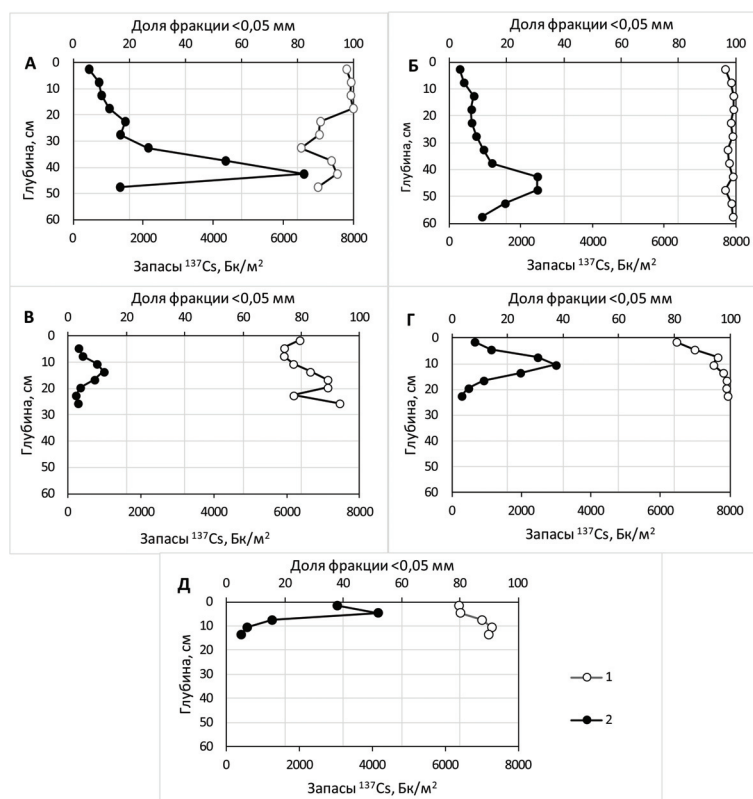


Рис. 3. Профили распределения по глубине разрезов содержания фракции менее $0,05 \text{ мм}$ (1) и запаса ^{137}Cs в пересчете на 1986 г. (2): А – разрез N-3 на низкой пойме; Б – разрез К-8 на низкой пойме; В – разрез К-2 на средней пойме; Г – разрез К-7 на средней пойме; Д – разрез К-5 на высокой пойме

Fig. 3. Distribution of the content of the sediment grain size $<0,05 \text{ mm}$ (1) and the ^{137}Cs content related to the 1986 level (2) by depth of the sections: А – section N-3 on the low floodplain; Б – section K-8 on the low floodplain; В – section K-2 on the middle floodplain; Г – section K-7 on the middle floodplain; Д – section K-5 on the high floodplain

Отложения средней поймы представлены разрезами К-2 и К-7. Разрез К-2 был заложен в уступе средней поймы в сужении русла и вскрыл днище ложбины, по которой происходит перелив пойменных вод через шпору излучины, поэтому дополнительно был заложен разрез К-7 на расположенной рядом гряде (см. рис. 2).

В разрезе К-2 до видимой глубины 93 см вскрывается переслаивание пачек спрессованных гумусированных почвенных агрегатов и прослоев алевроита. Не очень четко выраженный пик запасов ^{137}Cs ($1,0 \text{ кБк/м}^2$) отмечен в диапазоне глубин 12–15 см (рис. 3В). Суммарная плотность загрязнения в разрезе составила $4,0 \text{ кБк/м}^2$ (см. табл.), что значительно ниже фоновых значений, но превышает уровень глобальных выпадений, и вероятно объясняется частичным размывом слоя 1986 г. с последующей аккумуляцией наносов.

Разрез К-7 был заложен на аккумулятивной позиции этого же сегмента средней поймы (см. рис. 2). В нем также вскрывается переслаивание легких суглинков и супесей с линзами и прослоями алевроита. Суммарная плотность загрязнения в разрезе ($10,0 \text{ кБк/м}^2$) немного выше фоновых значений (см. табл.), что говорит об аккумуляции здесь наносов. Выраженный чернобыльский пик запасов ^{137}Cs ($2,5 \text{ кБк/м}^2$) отмечен в диапазоне глубин 9–12 см. Темпы аккумуляции наносов в разрезе К-7 составляют $2,4\text{--}3,2 \text{ мм/год}$ (рис. 3Г).

Низкая пойма представлена разрезами N-3 и К-8. Разрез N-3 расположен на правобережном уступе низкой поймы, примыкающей к поверхности распаханной первой надпойменной террасы (см. рис. 2). Для исключения возможного влияния привноса наносов с террасы на поверхность низкой поймы был заложен разрез К-8 на пологом выпуклом левом берегу излучины.

В разрезе N-3, расположенном на 1 м выше меженного уреза, пачка гумусированных пойменных отложений с включением корней и стеблей тростника имеет мощность 68–71 см и залегает на размытой кровле палево-серого тяжелого суглинка, резко отличающегося по цвету, уходящего под урез воды и вскрывающегося на дне реки. В эпюре вертикального распределения ^{137}Cs на глубине 40–45 см четко выделяется пик с величиной запаса около $6,6 \text{ кБк/м}^2$ (см. рис. 3А), т. е. мощность слоя послечернобыльской аккумуляции составляет не менее 40 см. Общая плотность загрязнения ($20,2 \text{ кБк/м}^2$) более чем в 2 раза превышает фоновые значения (см. табл.). Концентрация изотопа в поверхностных слоях (0–10 см) этого участка низкой поймы также вдвое выше, чем в соседнем разрезе К-8 (см. рис. 3Б), что можно объяснить поступлением наносов с примыкающей поверхности распаханной террасы, вероят-

но, более загрязненных, чем наносы из речных вод Кардаила.

Разрез К-8 вскрывает отложения на глубину 80 см. На глубине 53–56 см проходит четкая языковатая граница между двумя пачками отложений. Верхняя пачка буровато-серая, слоистая, содержит корни тростника и раковины моллюсков. Нижняя пачка однородная, сизовато-темно-серая, имеет запах сероводорода, содержит большое количество перегнивших растительных остатков. В эпюре вертикального распределения ^{137}Cs примерно равные по величине максимальные запасы (около $2,5 \text{ кБк/м}^2$) находятся на глубине 40–45 и 45–50 см (см. рис. 3). Таким образом, мощность слоя послечернобыльской аккумуляции в разрезе К-8 составляет не менее 40 см, а суммарный запас – $12,8 \text{ кБк/м}^2$ – выше фоновых значений.

В разрезах на низкой пойме выявлены самые высокие и близкие по значениям темпы аккумуляции наносов в диапазоне $10,5\text{--}13,2 \text{ мм/год}$ (табл.). При этом общие запасы ^{137}Cs в разрезе N-3 почти в 2 раза выше, чем в разрезе К-8, что, вероятно, связано с разными источниками поступления наносов при схожих темпах аккумуляции. Также в обоих разрезах выделяется очень четкая и резкая граница пачек отложений на глубине 53–56 см (разрез К-8) и 70 см (разрез N-3), в обоих случаях эта граница расположена выше или вблизи меженного уреза реки. Наличие этой границы говорит о предшествовавшем этапе размыва отложений низкой поймы.

Гранулометрический состав отложений. Отложения разных уровней поймы, а также основные источники наносов – пахотный горизонт почв на водораздельной поверхности и первой террасе, донные отложения и взвешенные наносы имеют схожий гранулометрический состав с бимодальным распределением. Во всех исследованных образцах преобладающей фракцией является крупная пыль (38–53%), а также мелкая пыль (18–36%). Мелкий песок присутствует во всех образцах кроме донных отложений, его максимальное количество (до 15%) наблюдается в отложениях средней и высокой поймы. Более крупные фракции (средний и крупный песок) присутствуют только в отложениях высокой, средней и низкой поймы, их доля составляет менее 3%. Доля илистых частиц несколько повышена в донных отложениях, почвах и отложениях низкой поймы (рис. 4).

Доля тонких фракций (менее $0,05 \text{ мм}$) в отложениях разных уровней поймы в целом слабо изменяется по разрезам (см. рис. 3) и не может существенно влиять на распределение цезия, хотя в некоторых разрезах (N-3, К-5) пики вертикального распределения цезия совпадают с увеличением доли тонких фракций в отложениях.

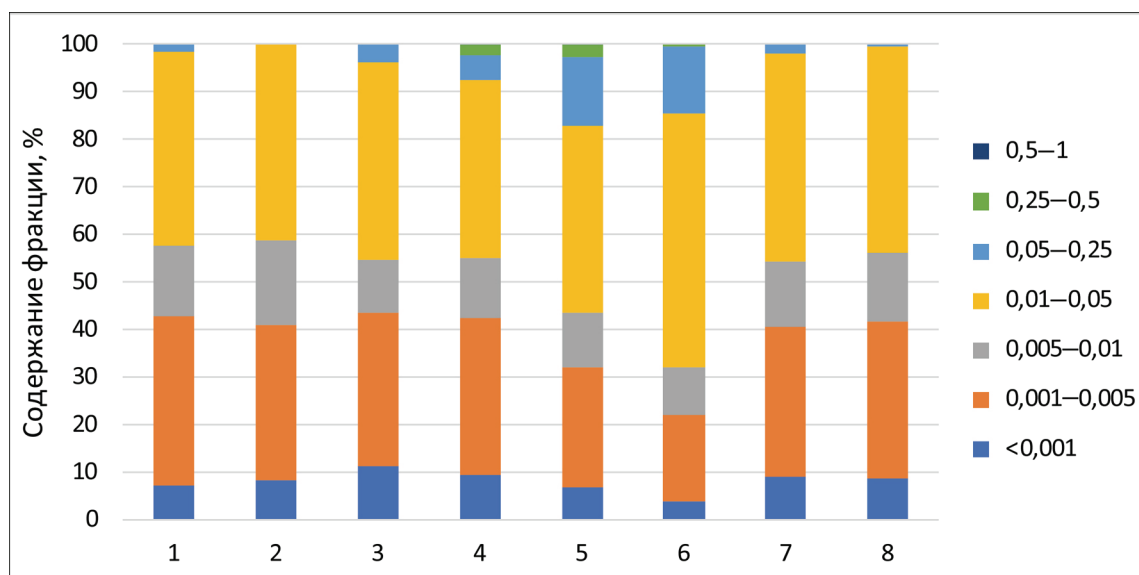


Рис. 4. Распределение фракций гранулометрического состава отложений (средние значения по разрезам) и наносов: 1 – взвешенные наносы; 2 – донные отложения в расширении русла; 3 – донные отложения в сужении русла; 4 – низкая пойма; 5 – средняя пойма; 6 – высокая пойма; 7 – почва на террасе; 8 – почва на водораздельной поверхности

Fig. 4. Distribution of granulometric fractions (average values for sections) and sediments:

1 – suspended sediments; 2 – bottom sediments in a channel widening; 3 – bottom sediments in a channel narrowing; 4 – low floodplain; 5 – middle floodplain; 6 – high floodplain; 7 – soil on the terrace; 8 – soil on the watershed

Накопление отложений на разных уровнях поймы в пределах исследованного участка происходит в результате затопления водами р. Кардаил, а также поступления поверхностного стока с пашни. В силу удаленности большинства пойменных массивов от склонов долины, непосредственное поступление продуктов смыва с пашни возможно только на поверхность низкой поймы, охарактеризованную разрезом N-3, к которой примыкает распаханная поверхность первой террасы. На остальные участки (разрезы К-2, К-5, К-7, К-8) попадание наносов возможно лишь с потоком вод Кардаила.

Вертикальное распределение доли тонких фракций в отложениях указывает на изменения гидродинамической обстановки или источников наносов в процессе осадконакопления. В отличие от средней и высокой поймы, занятой луговой степной растительностью, низкая пойма покрыта густыми и высокими (до 1–1,5 м) зарослями тростника и осоки, снижающими скорости течения и способствующими осаждению частиц менее 0,05 мм. В разрезе К-8, где наносы поступают только с водами Кардаила, доля частиц менее 0,05 мм по всему профилю превышает 96% (см. рис. 3Б). В разрезе N-3 до глубины 20 см доля частиц менее 0,05 мм также превышает 96%, но ниже наблюдается некоторое увеличение крупности частиц, вероятно, обусловленное поступлением наносов с террасы (см. рис. 3А).

На средней пойме доля тонких фракций снижается (см. рис. 3В, Г), аккумуляция наносов иногда сменяется размывом отложений, например при

переливе воды через шпору излучины или в связи с механическим воздействием льдин во время ледохода. Изменение гидродинамических условий отражается в неоднородности гранулометрического состава отложений по профилю в разрезе К-2 (см. рис. 3В).

Уровни поймы и их затопление. В 2023/24 гидрологическом году повышенные уровни воды р. Кардаил наблюдались с середины октября и до конца июля (рис. 5). За рассмотренный период не происходило затопления высокой поймы с высотой бровки около 5,5 м над урезом воды, средняя пойма с отметками около 2,5 м затоплялась меньше, чем на сутки (20 часов). Затопление низкой поймы высотой около 1 м было наиболее продолжительным (108,5 суток): она частично затоплялась с начала января, когда живое сечение потока было стеснено льдом во время зимних паводков, и до конца половодья в середине апреля, а затем на короткое время во время летних паводков.

Половодье 2024 г. было средним по водности. Во время одного из наиболее высоких за последние 17 лет половодья 2023 г., максимальный уровень воды был примерно на 1 м ниже бровки высокой поймы [Тарбеева и др., 2024], что подтверждает снижение частоты затопления высокой поймы в последние десятилетия. За счет повышения уровней воды зимней межени [Основные гидрологические характеристики..., 2020], вероятно, происходит увеличение продолжительности затопления низкой поймы, что, однако, не приводит к существенному

увеличению темпов осадконакопления, так как в условиях ледостава мутность воды минимальна.

Связь аккумуляции наносов с образованием четковидной формы русла. В степной зоне ЕТР предполагается образование четковидных русел в результате заилиения, приводящего к сужению русла на перекатах, которое связано с усиленным поступлением наносов с пашни и наиболее активно проявлялось со второй половины XIX в. [Иванова, 1996]. Полученные темпы пойменной аккумуляции на р. Кардаил (см. табл.) в целом соответствуют величинам, отмечаемым на других реках ЕТР. Так, на низкой пойме р. Сейм скорости аккумуляции наносов составляют 1,8–23 мм/год, на р. Истре – 2–15 мм/год [Александровский и др., 2023], а на высоких поймах рек Оки и Сейм – от 0,01 до 0,7 мм/год [Александровский и др., 2023]. На р. Плаве скорости аккумуляции на низкой пойме составляют 6–14 мм/год, на средней – 2–9 мм/год, а на высокой пойме – 1–5 мм/год [Belyaev et al., 2012]. При этом перечисленные реки, за исключением р. Кардаил, не имеют четковидного строения русла, что говорит о том, что аккумуляция наносов

не является единственным условием образования такой формы русла.

Помимо степной зоны ЕТР, четковидные русла (за пределами криолитозоны) наиболее полно исследованы на юго-востоке Австралии. Как и в степной зоне, их формирование происходит в засушливом климате с неравномерным стоком воды, они приурочены к широким долинам с небольшими уклонами, и их образование происходит на фоне накопления тонких донных наносов, когда сток влекомых наносов отсутствует. Отмечается, что прохождение экстремальных расходов воды может способствовать периодическому размыву расширений русла, а обсыхание в межень соединяющих их перемычек благоприятно для зарастания тростником и последующего оседания на них тонких глинистых частиц, что усиливает выраженность озеровидных углублений [Eyles, 1977]. Описанные на австралийских реках процессы характерны и для р. Кардаил. Низкая пойма в сужениях русла р. Кардаил густо заросла тростником, армирующим пойменные отложения, снижающим скорости течения и способствующим оседанию тонких взвешенных частиц.

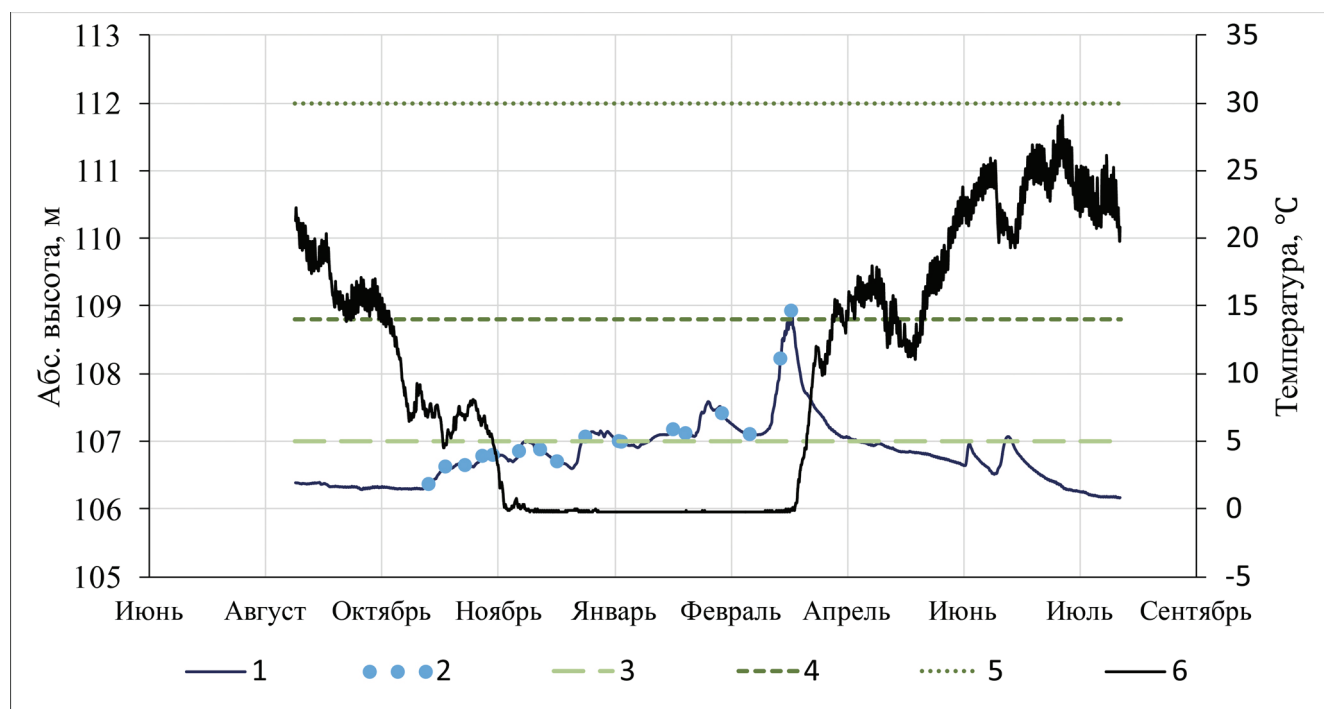


Рис. 5. Ход уровней воды на ключевом участке р. Кардаил с 24.08.2023 по 13.08.2024 и уровни затопления поймы. По левой шкале: 1 – уровень воды; 2 – ледостав; 3 – низкая пойма; 4 – средняя пойма; 5 – высокая пойма; по правой шкале: 6 – температура воды

Fig. 5. Change of water levels in the key section of the Kardail River from August 24, 2023 to August 13, 2024 and floodplain inundation levels. On the left axis: 1 – water level; 2 – freeze-up; 3 – low floodplain; 4 – middle floodplain; 5 – high floodplain; on the right axis: 6 – water temperature

На реках юго-восточной Австралии, как и на реках ЕТР, аккумуляция наносов на поймах усилилась

с началом сельскохозяйственного освоения. Так, до начала активного антропогенного освоения темпы

аккумуляции наносов на поймах рек юго-востока Австралии не превышали 0,2 мм/год [Rustomji, Pietsch, 2007]. В центре Русской равнины в доагрикультурный период средние скорости накопления наносов также оцениваются в 0,1 мм/год [Александровский и др., 2023]. После начала сельскохозяйственного освоения темпы аккумуляции наносов на прилегающих к руслу уступам пойм увеличились на порядок. На малых реках юго-восточной Австралии они возросли до 9–16 мм/год [Rustomji, Pietsch, 2007], что близко к описанным выше темпам аккумуляции наносов на малых реках ЕТР (1,8–15 мм/год), в т. ч. и на р. Кардаил (10,5–13,2 мм/год). При этом формирование озеровидных расширений русел на реках юго-восточной Австралии началось до начала сельскохозяйственного освоения – около 4,5–3,7 тыс. л. н. [Mould, Fryirs, 2017; Williams, Fryirs, 2020]. Антропогенное воздействие, начавшееся в Австралии в первой половине XIX в., привело к разрушению естественно сформировавшихся расширений русел в результате их врезания или заполнения наносами.

В разрезе N-3 на низкой пойме р. Кардаил, образующей сужение русла между озеровидными расширениями и имеющей высоту около 1 м, верхние 40 см отложений накопились всего за 38 лет, т. е. при неизменных скоростях осадконакопления вся низкая пойма могла быть сформирована за 100–130 лет. При этом низкая пойма, по крайней мере на двух исследованных участках, имеет цоколь из отличающихся по структуре и цвету глинистых отложений, наличие которого свидетельствует о периоде размыва, при котором дно реки в расширениях русла оставалось как минимум на 2,5–3 м ниже дна реки в сужении, т. е. его четковидная форма вероятнее всего существовала до начала накопления верхней пачки гумусированных отложений низкой поймы, что может свидетельствовать о том, что формирование четковидных русел на территории степной зоны ЕТР началось задолго до начала сельскохозяйственного освоения этой территории. Это подтверждается также наличием многочисленных четковидных стариц на высокой пойме и низкой террасе Кардаила и других степных рек [Камышев и др., 2024].

ВЫВОДЫ

Для малоисследованной территории севера Волгоградской области уточнены фоновые значения плотности загрязнения ^{137}Cs , которые в пересчете на 1986 г. (авария на ЧАЭС) составляют 9,3 кБк/м².

Выявлены основные закономерности распределения запасов ^{137}Cs на разных высотных уровнях поймы. На высокой пойме запасы ^{137}Cs соответствуют фоновым значениям, а их пик четкий и залегает

вблизи поверхности. В разных частях средней поймы, в зависимости от микрорельефа поверхности, общие запасы ^{137}Cs в разрезах могут быть выше или ниже фоновых значений, следовательно, могла происходить как эрозия, так и аккумуляция наносов. На низкой пойме, где запасы ^{137}Cs в 1,3–2,2 раза превышают фоновые значения, преобладает аккумуляция наносов. При равных темпах аккумуляции наносов на двух соседних участках низкой поймы суммарные запасы ^{137}Cs в разрезе, и запасы в чернобыльском пике могут существенно (до 2 раз) различаться, что можно объяснить различными источниками поступления материала (взвешенные наносы р. Кардаил или продукты смыва непосредственно с распаханых склонов).

Темпы аккумуляции наносов на разных уровнях поймы р. Кардаил закономерно возрастают при увеличении продолжительности затопления и составляют на высокой пойме – не более 1,6 мм, на средней пойме – 2,4–3,2 мм/год, на низкой пойме – 10,5–13,2 мм/год. Снижение высоты половодья, фиксируемое на всех реках региона, приводит к снижению темпов аккумуляции наносов на высокой и средней пойме.

Отложения разных уровней поймы, а также основные источники наносов – пахотный горизонт почв, донные отложения и взвешенные наносы имеют схожий гранулометрический состав, в котором преобладают фракции крупной (38–53%) и мелкой (18–36%) пыли. В отличие от средней и высокой поймы, в отложениях низкой поймы наблюдается большое количество корней тростника и повышена доля глинистых частиц, что можно объяснить ее продолжительным затоплением при небольших скоростях течения, высокой и густой околосводной растительностью, а также тонким составом основных источников взвешенных наносов – распаханых почв и донных отложений.

Выявленные темпы аккумуляции наносов соответствуют таковым на других реках, в том числе не имеющих четковидного строения русла, что говорит о том, что аккумуляция наносов не является единственным условием образования четковидных русел. Увеличение высоты низкой поймы может способствовать улучшению морфологической выраженности расширений русла, но повышенный сток наносов может приводить и к их заполнению наносами, как это описано на реках Австралии.

Цокольное строение низкой поймы и наличие четковидных стариц на высокой пойме и низкой террасе Кардаила свидетельствуют о том, что возраст четковидного русла р. Кардаил, вероятнее всего, значительно превышает длительность периода сельскохозяйственного освоения этой территории.

Таким образом, несмотря на расширение представлений о темпах аккумуляции наносов в поймах четковидных рек, конкретные механизмы образования озеровидных расширений русел, также как и

причины, по которым такие русла встречаются на одних реках, но отсутствуют на других, пока остаются недостаточно ясными.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александровский А.Л., Голосов В.Н., Замотаев И.В. Темпы седиментации на поймах равнинных рек центра европейской части России по данным изучения почвенно-аллювиальных серий // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54. № 1. С. 17–36. DOI: 10.31857/S2949178923010036.
- Атлас радиоактивного загрязнения европейской части России, Белоруссии и Украины / под ред. Ю.А. Израэля. М.: Росгидромет, Роскартография, 1998. 142 с.
- Бутаков Г.П., Курбанова С.Г., Панин А.В. и др. Формирование антропогенно обусловленного наилка на поймах рек Русской равнины // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 3. М.: МГУ, 2000. С. 78–92.
- 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 / под ред. С.И. Застрожного. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009. 399 с.
- Губарков А.А., Лейбман М.О. Четкообразные русловые формы в долинах малых рек на Центральном Ямале — результат парагенеза криогенных и гидрологических процессов // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 41–49.
- Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1984. 264 с.
- Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Панин А.В. Земледельческое освоение территории и отмирание рек европейской части России // Геоморфология. 1996. № 4. С. 53–60.
- Иванова Н.Н., Шашиурина Е.Н., Голосов В.Н. и др. Оценка перераспределения ¹³⁷Cs экзогенными процессами в днище долины р. Плава (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 1. С. 24–34.
- Израэль Ю.А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. СПб.: Прогресс-погода, 1996. 355 с.
- Камышев А.А., Куракова А.А., Тарбеева А.М. Распространение и морфометрические характеристики четковидных русел северной части степной зоны Русской равнины // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55. № 4. С. 129–143. DOI: 10.31857/S2949178924040089.
- Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 192 с.
- Маркелов М.В., Голосов В.Н., Беляев В.Р. Изменение скорости аккумуляции на поймах малых рек в центре Русской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 5. С. 70–76.
- Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон: научно-прикладной справочник / под ред. В. Ю. Георгиевского. СПб.: Свое издательство, 2020. 262 с.
- 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.
- Солодовников Д.А., Шинкаренко С.С. Гидрологические и гидрогеологические закономерности формирования речных пойм в бассейне среднего Дона в современных условиях // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 719–728. DOI: 10.31857/S0321059620060139.
- Тарбеева А.М. О происхождении четковидной формы русел малых рек криолитозоны // Геоморфология. 2018. № 1. С. 88–95. DOI: 10.7868/S043542811801008X.
- 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. DOI: 10.15356/0435-4281-2016-1-73-81.
- Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. и др. Современные процессы в четковидных руслах степных рек Хоперско-Бузулукской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2024. Т. 79. № 3. С. 136–149. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.11.
- 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.: АН СССР. 1988. С. 15–24.
- Arp C.D., Whitman M., Jones B. et al. Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes, *Biogeosciences*, 2015, no. 12, iss. 1, p. 29–47, DOI: 10.5194/bg-12-29-2015.
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V. et al. Using chernobyl-derived ¹³⁷Cs to document recent sediment deposition rates on the river Plava floodplain, *Hydrological processes*, 2012, vol. 27, iss. 6, p. 807–821, DOI: 10.1002/hyp.9461.
- Eyles R.J. Changes in drainage networks since 1820, Southern Tablelands, N.S.W., *Australian Geographer*, 1977, vol. 13, iss. 6, p. 377–386, DOI: 10.1080/00049187708702716.
- Mould S., Fryirs K. The Holocene evolution and geomorphology of a chain of ponds, southeast Australia: Establishing a physical template for river management, *CATENA*, 2017, vol. 149, p. 349–362, DOI: 10.1016/j.catena.2016.10.012.

- Rustomji P., Pietsch T. Alluvial sedimentation rates from southeastern Australia indicate post-European settlement landscape recovery, *Geomorphology*, 2007, vol. 90, iss. 1–2, p. 73–90, DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.01.009.
- Walling D.E., Bradley S.B. Rates and patterns of contemporary floodplain sedimentation: a case study of the River Culm, Devon, UK, *GeoJournal*, 1989, vol. 19, p. 53–62.
- Williams R.T., Fryirs K.A. The morphology and geomorphic evolution of a large chain-of-ponds river system, *Earth Surf. Processes Landforms*, 2020, vol. 45, iss. 8, p. 1732–1748, DOI: 10.1002/esp.4842.
- Электронный ресурс
Лобанова Н.А. Особенности сельскохозяйственного районирования Волгоградской области // Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ «Грани познания». № 4(31). Апрель 2014. URL: www.grani.vspu.ru (дата обращения 30.09.2023).

Поступила в редакцию 11.12.2024

После доработки 11.02.2025

Принята к публикации 12.03.2025

DEPOSITION RATES AND COMPOSITION OF OVERBANK SEDIMENTS FOR A STEPPE RIVER WITH A BEADED-SHAPE CHANNEL (CASE STUDY OF THE KARDAIL RIVER, NORTHERN VOLGOGRAD REGION)

A.M. Tarbeeva¹, N.N. Ivanova², V.R. Belyaev³, I.V. Krylenko⁴, V.V. Surkov⁵

^{1–5} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes*

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

² *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: nadine_iv@mail.ru*

³ *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vladimir.belyaev@gmail.com*

⁴ *Scientific Researcher; e-mail: i-krylenko@yandex.ru*

⁵ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vita.surkov@yandex.ru*

Beaded channels of small rivers, with alternating lake-like extensions and narrow channels connecting them, are widespread in the steppe zone. Nevertheless, their origin is still controversial. A version of the beaded channels formation in the steppe zone is the siltation of rivers; however the rates of sediment deposition, their composition and features of their distribution on the floodplains of beaded rivers have not been specially studied. The rates of overbank deposition were determined for the floodplain complex of the Kardail River, which has a beaded channel, using the ¹³⁷Cs. The duration of inundation of different floodplain levels was estimated, and the granulometric composition of overbank deposits, suspended sediments, channel bottom sediments and soils was specified. The rate of overbank sediment deposition for the period from 1986 to 2024 grow in line with the increasing duration of floodplain inundation and amounts to no more than 1,6 mm/year for the high floodplain, 2,4–3,2 mm/year for the middle floodplain, and 10,5–13,2 mm/year for the low floodplain. The decrease in flood water rise is characteristic for all rivers in the region and leads to a decrease in the rate of sediment deposition on the middle and high floodplains. Compared with higher floodplain levels, low floodplain deposits are characterized by a higher content of plant residues and an increased proportion of silt. The finer composition of low floodplain deposits could be a result of its longer inundation, dense reeds on its surface, which slow up the flow, and the fine composition of the main sources of suspended sediments, i. e. arable soil horizon and channel bottom sediments. It was found that the rates of sediment deposition at different levels of the Kardail River floodplain correspond to those of other rivers, including those without a beaded channel morphology. The presence of the clay base under organic rich deposits within low floodplains in the narrowings of the channel indicates that the deposition of organic rich deposits is not the main cause of the formation of channel extensions, but it makes their morphology more pronounced.

Keywords: siltation, steppe, small rivers, radiocesium analysis, granulometric analysis, alluvium

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-27-00008, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00008/>).

REFERENCES

- Aleksandrovskii A.L., Golosov V.N., Zamotaev I.V. Sedimentation rate of the floodplain alluvium in the center of European Russia according to the study of buried soil series, *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 513, no. 3(1), p. S140–S153.
- Arp C.D., Whitman M., Jones B. et al. Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes, *Biogeosciences*, 2015, no. 12, iss. 1, p. 29–47, DOI: 10.5194/bg-12-29-2015.
- Atlas radioaktivnogo zagrizneniya evropejskoj chasti Rossii, Belorussii i Ukrainy* [Atlas of radioactive contamination of the European part of Russia, Belarus and Ukraine], Yu.A. Izrael (ed.), Moscow, Roshydromet, Roskartografiya Publ., 1998, 142 p. (In Russian)
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V. et al. Using chernobyl-derived ^{137}Cs to document recent sediment deposition rates on the river Plava floodplain, *Hydrological processes*, 2012, vol. 27, iss. 6, p. 807–821, DOI: 10.1002/hyp.9461.
- Butakov G.P., Kurbanova S.G., Panin A.V. et al. [Formation of anthropogenically caused silt deposit on the floodplains of rivers of the Russian Plain], *Eroziionnye i ruslovyje processy* [Erosion and channel processes], Moscow, Moscow State University Publ., 2000, vol. 3, p. 78–92. (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 use and protection], Moscow, MO GO SSSR Publ., 1988, p. 17–25. (In Russian)
- Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle* [Erosion and sediment runoff on the Earth], Kazan, Kazan University Publishing House, 1984, 264 p. (In Russian)
- Eyles R.J. Changes in drainage networks since 1820, Southern Tablelands, N.S.W., *Australian Geographer*, 1977, vol. 13, no. 6, p. 377–386, DOI: 10.1080/00049187708702716.
- Golosov V.N. *Eroziionno-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 Rossijskoi 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], S.I. Zastrozhny (ed.), St. Petersburg, Cartography of VSEGEI, 2009, 399 p. (In Russian)
- Israel Yu.A. *Radioaktivnye vypadeniya posle yadernykh vzyrov i avarij* [Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents], St. Petersburg, Progress-weather Publ., 1996, 355 p. (In Russian)
- Ivanova N.N., Golosov V.N., Panin A.V. *Zemledel'cheskoe osvoenie territorii i otmiranie rek Evropejskoi chasti Rossii* [Agricultural cultivation and small rivers degradation in European Russia], *Geomorfologiya*, 1996, no. 4, p. 53–60. (In Russian)
- Ivanova N.N., Shamshurina E.N., Golosov V.N. et al. *Ocenka pereraspredeleniya ^{137}Cs ekzogennymi processami v dnishche doliny r. Plava (Tul'skaya oblast') posle avarii na Chernobyl'skoj AES* [Assessment of ^{137}Cs redistribution by exogenic processes in the Plava River valley bottom (Tula oblast) after the Chernobyl accident], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 1, p. 24–34. (In Russian)
- Kachinsky N.A. *Mekhanicheskij i mikroagregatnyj sostav pochvy, metody ego izucheniya*. [Mechanical and microaggregate composition of soil, methods of its study], Moscow, Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1958, 192 p. (In Russian)
- Markelov M.V., Golosov V.N., Belyaev V.R. *Izmenenie skorosti akkumulyacii na pojmah malykh rek v centre Russkoj ravniny* [Changes in the sedimentation rates on the floodplains of small rivers in the Central Russian plain], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 5, p. 70–76. (In Russian)
- Mould S., Fryirs K. The Holocene evolution and geomorphology of a chain of ponds, southeast Australia: Establishing a physical template for river management, *CATENA*, 2017, vol. 149, p. 349–362, DOI: 10.1016/j.catena.2016.10.012.
- Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki vodnykh ob'ektov basseina reki Don: nauchno-prikladnoi spravocchnik* [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)
- Rustomji P., Pietsch T. Alluvial sedimentation rates from southeastern Australia indicate post-European settlement landscape recovery, *Geomorphology*, 2007, vol. 90, iss. 1–2, p. 73–90, DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.01.009.
- 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 channel of small rivers of the steppe zone of the Orenburg region], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2020, no. 4, p. 146–150. (In Russian)
- Solodovnikov D.A., Shinkarenko S.S. Present-day hydrological and hydrogeological regularities in the formation of river floodplains in the Middle Don Basin, *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, p. 977–986, DOI: 10.1134/S009780782006013.
- Tarbeeveva A.M. O proiskhozhdenii chyotkovidnoj formy rusel malykh rek kriolitozony [On the origin of the beaded shape of river channels in the permafrost zone], *Geomorfologiya*, 2018, no. 1, p. 88–95, DOI: 10.7868/S043542811801008X. (In Russian)
- Tarbeeveva 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 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)

- Tarbeeveva A.M., Krylenko I.V., Surkov V.V., Mikhailova N.M. Sovremennye processy v chetkovidnyh ruslah stepnyh rek Hopersko-Buzulukskoj ravniny [Modern processes in the beaded channels of steppe rivers of the Koper-Buzuluk plain], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2024, no. 3, p. 135–148, DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.11. (In Russian)
- Walling D.E., Bradley S.B. Rates and patterns of contemporary floodplain sedimentation: a case study of the River Culm, Devon, UK, *GeoJournal*, 1989, vol. 19, p. 53–62.
- Williams R.T., Fryirs K.A. The morphology and geomorphic evolution of a large chain-of-ponds river system, *Earth Surf. Processes Landforms*, 2020, vol. 45, iss. 8, p. 1732–1748, DOI: 10.1002/esp.4842.
- Web sources*
- Lobanova N.A. [Features of agricultural zoning of the Volga River 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 (access date 30.09.2023). (In Russian)

Received 11.12.2024

Revised 11.02.2025

Accepted 12.03.2025