Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 74–90
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2025. No. 2. P. 74–90
DOI: 10.17076/lim2072

УДК 556.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БОБРОВЫХ ПРУДОВ МАЛЫХ РЕК СЕВЕРА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

А. Г. Шарифуллин[1], А. В. Гусаров[1], Д. В. Иванов[2]*

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет (ул. Кремлевская, 18, корп. 1, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008)
*[2] Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087), *water-rf@mail.ru*

Рассмотрены особенности распределения тяжелых металлов (ТМ) (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn) в донных отложениях бобровых прудов на малых реках севера Предволжья Республики Татарстан. Полученные результаты свидетельствуют о сравнительно равномерном характере пространственного распределения металлов в отложениях изученных рек, за исключением валовых Co, Zn и Cr, а также подвижных форм Cd и Zn. Их содержание в отложениях верхних и средних участков течения рек выше, чем в нижнем течении. Распределение валовых и подвижных форм ТМ в приповерхностных отложениях бобровых прудов также равномерное, за исключением Cd и Pb. В более глубоких слоях донных отложений зоны выклинивания подпора прудов наблюдается слабая тенденция к уменьшению содержания металлов, тогда как в средней части прудов валовые содержания ТМ не отличаются контрастностью распределения. В приплотинной зоне отмечается разнонаправленная тенденция: рост валового содержания и уменьшение подвижных форм с глубиной залегания отложений. Валовое содержание ТМ коррелирует с гранулометрическим составом донных отложений и содержанием в них органического вещества. Статистически значимыми факторами в распределении подвижных форм ТМ являются расстояние от устья, длина плотин и прудов, а также содержание органического вещества в отложениях.

Ключевые слова: бобр; *Castor fiber* L.; Республика Татарстан; донные отложения; тяжелые металлы; гранулометрический состав; органическое вещество; RDA-тест

Для цитирования: Шарифуллин А. Г., Гусаров А. В., Иванов Д. В. Распределение тяжелых металлов в донных отложениях бобровых прудов малых рек севера Приволжской возвышенности // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 74–90. doi: 10.17076/lim2072

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10087 (https://rscf.ru/project/22-77-10087/).

A. G. Sharifullin[1], A. V. Gusarov[1], D. V. Ivanov[2]*. HEAVY METALS DISTRIBUTION PATTERNS IN BOTTOM SEDIMENTS OF BEAVER PONDS IN SMALL RIVERS IN THE NORTH OF THE VOLGA UPLAND, EUROPEAN RUSSIA

[1] Kazan (Volga Region) Federal University (18-1 Kremlevskaya St., 420008 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia)
*[2] Institute of Ecology and Subsoil Use, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan (28 Daurskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia), *water-rf@mail.ru*

The article presents the results of the analysis of the redistribution of heavy metals (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, and Mn) in bottom sediments of beaver ponds in small rivers in the north of the Pre-Volga Region of the Republic of Tatarstan. The results indicate a relatively uniform spatial distribution of the metals in the river sediments, except for Co, Zn, and Cr total concentrations, as well as labile forms of Cd and Zn. Their content in the sediments was higher in the upper and middle reaches compared with the lower reaches. The distribution of gross and labile forms of heavy metals in top-core sediments of beaver ponds is also uniform, except for Cd and Pb. The deeper strata of sediments in the pond's fluctuating backwater region show a weak tendency towards a decrease in the metal content, whereas the distribution of the gross content of heavy metals in the middle part of the ponds has no contrast. The tendency in the near-dam region is multidirectional: an increase in the gross content and a decrease in labile forms in the sediments with depth. The total content of heavy metals correlates with the grain size composition of the sediments and their organic matter content. Statistically significant factors in the distribution of labile forms of heavy metals are the distance to the river mouth, the length of beaver dams and ponds, and the content of organic matter in the beaver pond sediments.

Keywords: beaver; *Castor fiber* L.; Republic of Tatarstan; bottom sediment; heavy metals; grain size composition; organic matter; RDA-test

For citation: Sharifullin A. G., Gusarov A. V., Ivanov D. V. Heavy metals distribution patterns in bottom sediments of beaver ponds in small rivers in the north of the Volga Upland, European Russia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 74–90. doi: 10.17076/lim2072

Funding. The research was carried out under Russian Science Foundation grant No. 22-77-10087 (https://rscf.ru/project/22-77-10087/).

Введение

Последние десятилетия продемонстрировали беспрецедентный рост населения и соответствующие ему ускоренные темпы индустриализации [Mora, 2014; Crist et al., 2017; Washington, Kopnina, 2022]. Хотя качество человеческой жизни за прошедшие годы существенно улучшилось, нельзя игнорировать тот факт, что все это происходило за счет ухудшения качества окружающей среды [Jacob et al., 2018; Cafaro, 2022]. Наиболее распространенными загрязнителями, поступающими в окружающую среду, являются тяжелые металлы (ТМ) [Zhuang et al., 2009; Wang, Zhang, 2018; Hou et al., 2020; Dinis et al., 2021], такие как ртуть (Hg), кадмий (Cd), свинец (Pb), медь (Cu), хром (Cr), никель (Ni), цинк (Zn) и марганец (Mn). Хотя некоторые из указанных элементов (Cu, Zn и т. д.) весьма значимы для жизни [Mertz, 1981; Hostetler et al., 2003], они могут быть опасными, когда их концентрации превышают приемлемый уровень [Goldhaber, 2003]. Основными источниками ТМ в водных экосистемах являются сельскохозяйственные удобрения [N'guessan et al., 2009], пестициды [Gimeno-García et al., 1996], отходы животноводческих ферм [Leclerc, Laurent, 2017] и сточные воды населенных пунктов, особенно городов [Wei, Yang, 2010].

Процессы водной эрозии способствуют перераспределению смываемых частиц почвогрунтов и связанных с ними ТМ в речных водосборах [Wu, Probst, 2021]. Значительное их количество задерживается в нижних частях склонов и днищах сухих долин [Шарифуллин и др., 2018; Шарифуллин, Гусаров, 2022; Иванов и др., 2023]. Другая часть продуктов эрозии достигает русел рек, аккумулируется в прудах и водохранилищах, где происходит переотложение наносов и транспортируемых совместно с ними ТМ.

Попадая в водную среду в виде растворенных соединений и в составе взвешенного

вещества, ТМ начинают мигрировать под контролем процессов сорбции, комплексообразования с мелкими частицами, содержащими глинистые минералы, оксиды железа и/или марганца, органические вещества, соосаждения с другими элементами [Ghrefat, Yusuf, 2006; Çevik et al., 2009], гидролиза и десорбции. Физико-химические свойства отложений, включая pH, содержание карбонатов и органических веществ, а также окислительно-восстановительные условия и т. д. могут влиять на эти процессы [Du Laing et al., 2009]. ТМ легко высвобождаются из донных отложений при изменении водного режима и физико-химических условий воды/отложений [Duan et al., 2010], что может вызвать вторичное загрязнение водных масс ниже по течению [Jiao et al., 2015]. Кроме того, ТМ могут накапливаться в гидробионтах различных трофических уровней [Tokar' et al., 2023]. Предыдущие исследования [Gołdyn et al., 2015; Wu, Probst, 2021] показали, что токсичные металлы, такие как Pb, Cd и Cr, в высоких концентрациях содержатся в донных отложениях прудов. Также выявлено их повышенное содержание в верхнем звене трофической цепи – в рыбах [Egemose et al., 2015; Dietrich, Ayers, 2021; Naz et al., 2022]. В этой связи оценка геохимической подвижности ТМ в донных отложениях является необходимой для анализа их возможного воздействия на окружающую среду и, в частности, на живые организмы.

Естественным барьером в транспортировке загрязняющих веществ вниз по течению рек являются бобровые пруды. Строительство плотин на малых реках нередко приводит к затоплению пойм [Neumayer et al., 2020; Brazier et al., 2021], изменению их гидрологического режима [Pollock et al., 2017; Stout et al., 2017; Larsen et al., 2021; Wohl, 2021], снижению скорости течения водотока [Green, Westbrook, 2009; Nyssen et al., 2011] и накоплению на дне прудов богатых органическими веществами отложений [Błędzki et al., 2011; Wohl, 2013], нитратов [Klotz, 2010; Law et al., 2016] и фосфатов [Devito et al., 1989; Klotz, 1998; Bason et al., 2017; Puttock et al., 2018]. Бобровые пруды с их тонкодисперсными осадками могут также функционировать как объекты повышенного депонирования ТМ [Fletcher et al., 2019], в том числе метилртути [Levanoni et al., 2015; Čiuldienė et al., 2020]. Это обстоятельство может способствовать естественному очищению вод малых рек [Butler, Malanson, 2005; Kalvīte et al., 2021].

Исследования влияния бобровой деятельности на геохимические характеристики донных отложений малых рек, включая процессы накопления в них соединений ТМ, ранее проводились преимущественно в Северной Америке, а также в Северной и Центральной Европе. В России подобные работы начались гораздо позже и являются сравнительно малочисленными [Otyukova, 2009; Gatti et al., 2018; Башинский, Осипов, 2019; Katsman et al., 2020]. При этом весьма мало исследований, в которых проведена пространственная оценка влияния бобровых сооружений малых рек на распределение ТМ. В этой связи на примере двух малых рек лесостепной зоны возвышенного востока Русской равнины выполнен анализ распределения ТМ в их донных отложениях, накопленных под влиянием бобровой деятельности. Полученные результаты имеют практическое значение для оценки экологического состояния и прогнозирования влияния деятельности бобров на гидрохимические характеристики малых рек, бассейны которых интенсивно освоены человеком.

Территория исследования

Полевые работы проводились летом-осенью 2022 г. в бассейнах рек Морквашинка и Морквашка (правые притоки р. Волга) (рис. 1), различающихся протяженностью, площадью бассейна и степенью антропогенной преобразованности их водосборов (табл. 1). Выбор этих рек обусловлен тем, что их долины типичны в геоморфологическом отношении не только для исследуемого региона, но и для всего севера Приволжской возвышенности [Бутаков, 1991]. Общая длина реки Морквашинка, по данным ГНСС-съемки, составляет 16,2 км (вместе с сухой долиной в верховьях – 16,6 км), а реки Морквашка – 7,4 км (7,8 км) [Sharifullin et al., 2023]. Строительство каскада антропогенных прудов в верховьях р. Морквашинка и водозабор для частных домохозяйств привели к значительному снижению стока воды, особенно в период летне-осенней межени. Немаловажную роль в сокращении стока играет высокое испарение с поверхности бобровых прудов. Все это приводит к обособлению в русле реки сухих участков, а появление стока в русле в летнюю межень связано с небольшими боковыми притоками, разгружающими подземные воды.

Для р. Морквашинка характерна асимметрия склонов долины. Правый склон почти на всем протяжении крутой и высокий, левый – более пологий. Долина р. Морквашка относительно симметрична. Бассейны исследуемых рек сложены породами верхней перми, перекрытыми толщей делювиально-солифлюкционных суглинков. В исследуемых речных бассейнах распространены тяжелосуглинистые

и глинистые серые лесные остаточно-карбонатные почвы (табл. 1). Донные отложения рек и приводораздельные почвы в целом характеризуются однородным гранулометрическим составом с преобладанием (более 69–75 %) фракции физической глины (< 0,01 мм) (табл. 2).

Коренная растительность представлена липово-дубовыми лесами с примесью клена, бука, вяза (40 % общей площади водосбора на реке Морквашинка и 60 % – на реке Морквашка) [Ермолаев и др., 2007]. Бассейны рек сильно изменены деятельностью человека, что выражается в высокой распаханности и частичной урбанизации (город Иннополис в бассейне р. Морквашка), высокой плотности сельских и дачных поселений. В настоящее время поймы рек в результате активной деятельности бобров сильно зарастают ивой, и лишь отдельные их участки используются как пастбища и сенокосы.

Бобры в исследуемых реках, по нашим наблюдениям и опросу местных жителей, появились в конце 2000-х годов. Согласно предыдущим исследованиям [Sharifullin et al., 2023; Gusarov et al., 2024], суммарная протяженность запруженного бобровыми плотинами русла р. Морквашинка составляет 7,98 км (48 %), естественного (свободного от бобровой

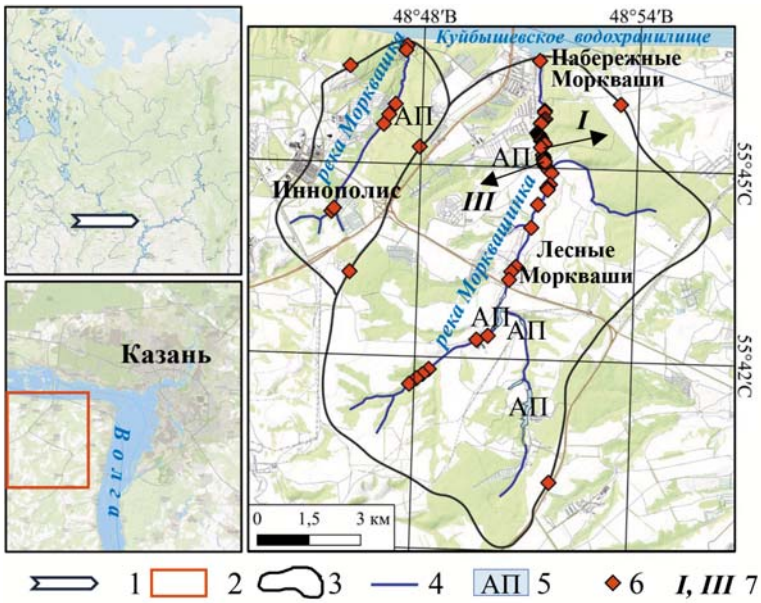


Рис. 1. Изученные реки и их расположение на Русской равнине:

1 – расположение исследуемой территории в европейской части России, 2 – на участке резкого поворота реки Волги у города Казани; 3 – границы бассейнов рек, 4 – водотоки, 5 – антропогенные пруды, 6 – места отбора проб на водоразделе и в руслах рек, 7 – местоположение прудов *I, III*

Fig. 1. The studied rivers and their location on the Russian Plain:

1 – location of the study area in the European part of Russia, 2 – in the section of the sharp turn of the Volga River near Kazan, 3 – borders of the river basins, 4 – watercourses, 5 – man-made ponds, 6 – sampling sites on the watershed and in the river channels, 7 – the location of pond *I, III*

Таблица 1. Некоторые характеристики изученных малых рек и их бассейнов

Table 1. Some characteristics of the studied small rivers and their basins

Реки Rivers	*L*, км *L*, km	*S*, км² *S*, km²	*H*, м *H*, m	α, %	*Y*, мм *Y*, mm	Ant, %	*F*, %
Морквашка Morkvashka	7,8	20,4	165	1,98	146	3	55
Морквашинка Morkvashinka	16,6	86,9	152	0,92	136	20	43

Примечание. L – длина реки; *S* – площадь бассейна реки; *H* – средняя высота бассейна реки; α – уклон реки; *Y* – средний многолетний годовой слой стока воды в бассейне реки; Ant – доля культивируемых (за исключением заброшенных) земель; *F* – залесенность общей площади бассейна реки.

Note. L – river length; *S* – river basin area; *H* – average river basin elevation; α – river slope; *Y* – average annual water runoff depth in the basins of the rivers; Ant – share of cultivated (excluding abandoned) land, *F* – forest cover of the river basin.

деятельности) – 8,6 км (52 %); на р. Морквашка – 2,05 (26 %) и 5,75 (74 %) км соответственно. На участках с относительно малыми и средними уклонами русла р. Морквашинка бобровой деятельностью охвачено 35 % (от длины каждого участка), а на участках со сравнительно большими уклонами – 0 %; на р. Морквашка – 31 и 0 % соответственно. Общее количество действующих бобровых плотин по всему руслу р. Морквашинка составляет 61 единицу, а по р. Морквашка – 40 единиц. Из них все бобровые плотины расположены на участках русла с относительно малыми (менее 1 %) и средними (1–3 %) уклонами. Средняя плотность плотин на р. Морквашинка – 3,7 ед./км; на р. Морквашка – 5,1 ед./км, изменяясь от 0 до 7,6 ед./км. Наибольшая плотность плотин отмечена на участках русла со средними уклонами.

Методы исследования

Полевые работы

Для выявления локальных фоновых значений концентраций ТМ в бассейнах исследуемых рек летом-осенью 2022 г. были отобраны образцы верхнего слоя почвы на пяти площадках, расположенных на приводораздельных поверхностях (рис. 1). Основными критериями выбора площадок являлись: горизонтальность поверхности почвы как на самой площадке, так и в ее ближайших окрестностях; наличие древесной растительности возрастом не менее 40 лет (как показатель отсутствия распаханности почв и прочей активной хозяйственной деятельности в указанный период), а также отсутствие видимых признаков эрозионного смыва почв. На каждой площадке были отобраны смешанные (по трем точкам на площадке) образцы почв с глубины 0–10 см (исключая лесную подстилку и/или дернину).

После детального обследования двух исследуемых рек [Sharifullin et al., 2023] были выбраны несколько бобровых прудов в верхнем, среднем и нижнем течениях рек для комплексной оценки распределения ТМ в донных отложениях. Образцы последних отбирались в приплотинных частях 27 прудов с помощью ручного пробоотборника (EIJKELKAMP 04.23.SA; внутренний диаметр 3,6 см) с глубины 0–20 см (рис. 1). Дополнительно были отобраны образцы в средней части и в зоне выклинивания подпора (23 пробы, пруды *I–V*), в естественном русле (ниже пруда *I* и в среднем течении) без плотин (21 проба) и приустьевой части рек (2 пробы). Каждый проанализированный образец донных отложений составлен смешением трех проб, отобранных в трех точках из разных частей дна пруда – одна в наносах заиленного русла, две другие – из наносов на правобережной и левобережной затопленной пойме. В пруду *III* с помощью бура Burkle Purkhauer были отобраны керны донных отложений в трех точках, расположенных на расстоянии 2 м друг от друга (в углах равностороннего треугольника). На основе изменения внешних морфологических признаков (окраски и структуры) в кернах были выделены аккумулятивные слои, определена их мощность и глубина залегания. Путем перемешивания образцов из одного слоя (метод квартования), но взятых из разных кернов, были подготовлены интегральные пробы. Всего в ходе полевых работ отобрано 80 образцов почв и донных отложений.

Лабораторные работы

Гранулометрический состав анализировался пипеточным методом по [ГОСТ 12536-2014]. В каждом образце определялось содержание глины (размер частиц менее 5 мкм), ила (5–50 мкм) и песка (50–1000 мкм). Содержание общего органического вещества в отобранных образцах почв и донных отложений определялось методом сухого озоления при температуре 550 °С по [ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.32–02].

Содержание ТМ (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn) в почвах и донных отложениях прудов определялось по [ПНД Ф 16.2.2:2.3.71–2011] путем экстракции 5М HNO_3 (валовые (кислоторастворимые) формы) и ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH = 4,8 (подвижные формы). Концентрацию металлов в растворе измеряли на атомно-абсорбционном спектрофотометре AAnalyst 400 (Perkin Elmer) в пламени ацетилен-воздух.

Статистика

Статистическая обработка данных проводилась в программном приложении XLSTAT 2016.02.28451 для Microsoft Excel и OriginPro 10.2.0.196. Определение величины линейной связи осуществлялось с использованием коэффициента корреляции Спирмена. Для определения влияния факторов на распределение ТМ использовались RDA-тест (Redundancy Analysis) и анализ избыточности. Предварительно проводилось нормирование данных для снижения размерности признакового пространства. Значимость влияния факторов (предикторов) в RDA оценивалась с использованием теста значимости (Permutation Test) и дисперсионного анализа (ANOVA).

Результаты и обсуждение

Гранулометрический состав и содержание органического вещества

Гранулометрический состав донных отложений исследуемых рек в целом однороден (табл. 2), с преобладанием тонкодисперсных фракций. Небольшие изменения наблюдаются вдоль рек: вниз по течению происходит незначительное увеличение песчаных фракций в бобровых прудах с 29 до 46 % на реке Морквашка и с 12 до 27 % на реке Морквашинка. Увеличение доли более грубого материала в нижних течениях обусловлено в том числе размывом крутых берегов, особенно в период половодья и летних паводков. Внутри прудов (рис. 2) по мере приближения к плотинам доля пелитовой фракции практически не изменяется. В профиле донных отложений зоны выклинивания пруда гранулометрический состав весьма однороден; в средней части с глубиной незначительно увеличивается доля песчаной и глинистой фракций, а в приплотинной зоне незначительно уменьшается доля песчаной и увеличивается доля глинистой фракций. Содержание органического вещества в донных отложениях и приповерхностных слоях почв варьируется от 3,8 до 13,7 % соответственно (табл. 3). Также выявлены статистически незначимые различия в содержании органического вещества в бобровых прудах и незарегулированных участках русел рек. В верхнем течении количество органики составило в среднем 7,7–8,6 %, ниже

Таблица 2. Гранулометрический состав (%) донных отложений и почв исследуемых рек и их водосборов
Table 2. Particle size distribution (%) of bottom sediments and soils of the studied rivers and their catchments

Объект исследования Study object		Верхнее течение Upper reaches				Среднее течение Middle reaches				Нижнее течение Lower reaches				Общее для рек Total			
		N	Sd	Sl	Cy	*N*	Sd	Sl	Cy	*N*	Sd	Sl	Cy	*N*	Sd	Sl	Cy
Морквашка Morkvashka	P	2	29	45	26	3	20	44	36	1	46	30	23	6	31	40	29
	C	0	-	-	-	0	-	-	-	1	58	25	17	1	58	25	17
Морквашинка Morkvashinka	P	8	12	52	36	8	21	43	33	28	27	45	28	44	27	46	27
	C	0	-	-	-	2	48	27	25	20	22	47	31	22	25	45	30
Почвы водоразделов Near-water-divide surface soils	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	19	57	24

Примечание. P – пруды, C – русло, *N* – количество образцов, Sd – песок, Sl – ил, Cy – глина.
Note. P – ponds, C – channel, *N* – number of samples, Sd – sand, Sl – silt, Cy – clay.

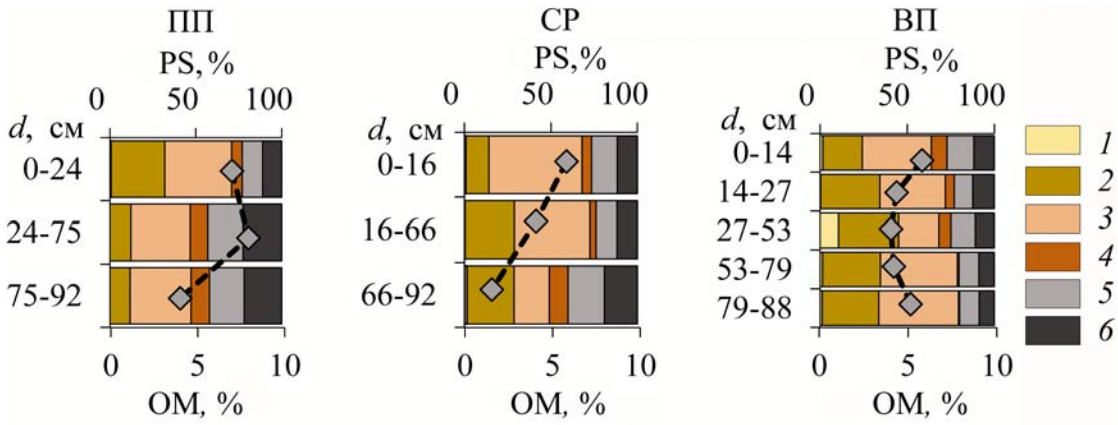


Рис. 2. Изменение гранулометрического состава и содержание органического вещества в донных отложениях внутри бобрового пруда *III*.

Здесь, в табл. 5 и на рис. 3: ПП – приплотинная часть, СР – средняя часть, ВП – зона выклинивания подпора. PS – размерные фракции, OM – общее содержание органического вещества, *1* – 1–0,25 мм, *2* – 0,25–0,05 мм, *3* – 0,05–0,01 мм, *4* – 0,01–0,005 мм, *5* – 0,005–0,001 мм, *6* – < 0,001 мм

Fig. 2. Changes in grain size distribution and organic matter content of bottom sediments within beaver pond *III*.

Here and in Tab. 5, and in Fig. 3: ПП – at the beaver dam, СР – in the middle section, ВП – in the pond wedging zone. PS – grain size, OM – total organic matter content, *1* – 1–0.25 mm, *2* – 0.25–0.05 mm, *3* – 0.05–0.01 mm, *4* – 0.01–0.005 mm, *5* – 0.005–0.001 mm, *6* – < 0.001 mm

по течению оно уменьшалось до 5,0–5,8 % в прудах и 3,2–3,8 % в руслах. Внутри прудов (рис. 2) содержание органического вещества в целом сохраняется на более или менее близком уровне. С глубиной в профиле отложений зоны выклинивания подпора пруда количество органики практически не изменяется, однако в средней и приплотинной частях прудов наблюдается слабая тенденция к его снижению.

Содержание тяжелых металлов в донных отложениях

Содержание валовых и подвижных форм ТМ в донных отложениях бобровых прудов на различных участках русла рек представлено в табл. 4. Анализ полученных результатов позволяет в целом отметить равномерное распределение всех исследованных металлов по продольному

Таблица 3. Содержание органического вещества в донных отложениях и почвах водоразделов исследуемых рек
Table 3. Organic matter content in bottom sediments and near-water-divide surface soils of the studied rivers

Объект исследования Study object		Верхнее течение Upper reaches		Среднее течение Middle reaches		Нижнее течение Lower reaches		Общее для рек Total	
		N	OM, %	*N*	OM, %	*N*	OM, %	*N*	OM, %
Морквашка Morkvashka	P	2	8,9 ± 5,8	3	6,9 ± 1,1	1	3,2	6	6,9 ± 2,3
	C	0	-	0	-	1	3,8	1	3,8
Морквашинка Morkvashinka	P	8	7,7 ± 0,9	8	6,2 ± 0,4	27	5,8 ± 0,6	43	6,2 ± 0,5
	C	0	-	2	4,8 ± 3,5	20	5,0 ± 0,9	22	5,0 ± 0,7
Почвы водоразделов Near-water-divide surface soils	-	-	-	-	-	-	-	5	13,7 ± 2,7

Примечание. P – бобровые пруды, C – естественное русло без плотин, *N* – количество образцов, OM – общее содержание органического вещества.

Note. P – beaver ponds, C – natural channel without dams, *N* – number of samples, OM – total organic matter content.

Таблица 4. Концентрация ТМ в донных отложениях бобровых прудов исследуемых рек на разных участках русла
Table 4. Heavy metals concentration in bottom sediments of the beaver ponds at different sections of the rivers channels

Участки течения River reaches	Cd	Pb	Co	Cu	Ni	Zn	Cr	Mn
Валовое содержание, мг/кг Total content, mg/kg								
Нижнее Lower	0,24 ± 0,05	13,5 ± 1,3	6,5 ± 0,8	14,6 ± 1,3	29,0 ± 1,3	26,2 ± 1,4	12,5 ± 2,1	320,8 ± 8,6
Среднее Middle	0,26 ± 0,07	13,2 ± 2,5	8,9 ± 1,8	16,4 ± 2,1	35,9 ± 3,7	35,9 ± 3,0	22,6 ± 4,2	284,7 ± 73,1
Верхнее Upper	0,30 ± 0,13	10,7 ± 1,4	9,1 ± 1,5	14,4 ± 1,3	31,4 ± 2,3	36,1 ± 3,9	17,7 ± 2,8	386 ± 54,7
В целом Total	0,25 ± 0,04	13,0 ± 1,0	7,3 ± 0,7	14,9 ± 1,0	30,5 ± 1,3	29,4 ± 1,7	15 ± 1,7	325,6 ± 36,4
Подвижные формы, мг/кг Mobile forms, mg/kg								
Нижнее Lower	0,04 ± 0,02	3,7 ± 0,5	0,8 ± 0,1	0,8 ± 0,2	2,1 ± 0,3	0,8 ± 0,2	0,3 ± 0,05	101,7 ± 10
Среднее Middle	0,07 ± 0,05	2,6 ± 0,8	0,9 ± 0,2	0,7 ± 0,5	2,9 ± 0,5	1,1 ± 0,5	0,5 ± 0,2	103,6 ± 27
Верхнее Upper	0,08 ± 0,05	2,5 ± 0,7	0,8 ± 0,2	0,3 ± 0,1	2,9 ± 0,3	2,6 ± 1,3	0,4 ± 0,2	108,5 ± 17,9
В целом Total	0,05 ± 0,02	3,3 ± 0,4	0,8 ± 0,1	0,7 ± 0,2	2,3 ± 0,2	1,2 ± 0,3	0,3 ± 0,1	103,1 ± 8,4
Подвижность, % Mobility, %								
Нижнее Lower	16,1 ± 9,1	27,8 ± 3,7	14,2 ± 2,7	5,1 ± 0,7	7,3 ± 1,1	3,3 ± 0,8	2,2 ± 0,3	34,7 ± 3,7
Среднее Middle	37,6 ± 28,9	21,4 ± 7,3	11,3 ± 4,6	4,3 ± 2,5	8,3 ± 1,8	3,1 ± 1,3	2,3 ± 1,3	37 ± 6,4
Верхнее Upper	40,5 ± 30,5	23,7 ± 6,1	9,5 ± 2,3	2,4 ± 1,2	9,3 ± 1,2	6,8 ± 3	2,5 ± 1,3	28,5 ± 3,7
В целом Total	23,6 ± 9,6	26,1 ± 2,9	12,9 ± 2	4,6 ± 0,7	7,8 ± 0,8	3,8 ± 0,8	2,3 ± 0,4	34 ± 2,9

профилю русла. Незначительные вариации выявлены для валового содержания Co, Zn, Cr, а также для подвижных форм Cd и Zn. Отложения верхних и средних участков водотоков отличаются относительно слабым накоплением указанных металлов в сравнении с их нижним течением. Кроме того, Cd, Pb, Co и Mn характеризуются высокой степенью подвижности в составе отложений, которая выражается в доле металлов, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, от валового их содержания.

Распределение валовых и подвижных форм ТМ в поверхностных отложениях прудов (табл. 5, рис. 3) можно охарактеризовать как равномерное, за исключением Cd и Pb. Так, концентрация Cd в донных отложениях пруда *III* возрастает от верховий к приплотинной части, а Pb, напротив, уменьшается.

Вариации содержания ТМ в кернах отложений бобрового пруда *III* весьма несущественны, за редким исключением. В зоне выклинивания подпора наблюдается слабая тенденция уменьшения концентрации металлов с глубиной, помимо подвижных форм Cr. В средней части пруда содержание валовых форм выровнено, кроме Pb и Mn, для которых характерна тенденция к увеличению содержания в глубоких слоях отложений; схожая картина на данном участке выяв-

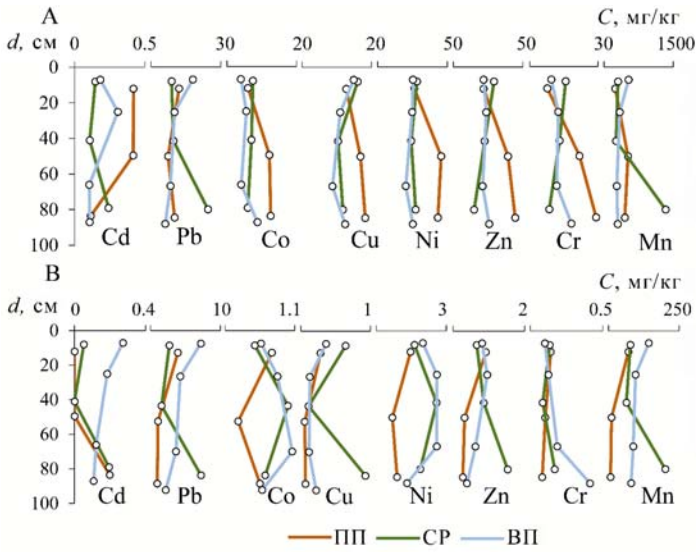


Рис. 3. Изменения концентрации валовых (A) и подвижных (B) форм ТМ в донных отложениях с глубиной на разных участках бобрового пруда *III*

Fig. 3. Concentration variation in the total (A) and mobile (B) forms of heavy metals in bottom sediments with the depth in different parts of beaver pond *III*

Таблица 5. Концентрация ТМ (мг/кг) в верхних слоях донных отложений бобрового пруда *I* (см. рис. 2)

Table 5. Heavy metals concentrations (mg/kg) in near-surface sediments layers of beaver pond *I* (see Fig. 2)

Участок Location	ПП		СР		ВП	
ТМ Heavy metals	Валовое содержание Total content	Подвижные формы Mobile forms	Валовое содержание Total content	Подвижные формы Mobile forms	Валовое содержание Total content	Подвижные формы Mobile forms
Cd	0,16	<0,01	0,15	<0,01	0,19	<0,01
Pb	15,2	4,2	14,6	3,8	14,2	5,1
Co	3,8	0,6	5,1	0,9	4,8	1,2
Cu	13,8	0,9	13,7	0,9	13,6	0,9
Ni	28,3	2,0	28,3	1,8	29,0	1,6
Zn	26,3	0,6	25,4	1,8	26,7	0,7
Cr	11,1	0,2	10,8	0,2	7,8	0,2
Mn	218,2	96,7	231,2	108,1	282,0	142,2

лена и для подвижных форм ТМ. В приплотинной части распределение металлов носит разнонаправленный характер: содержание валовых форм растет с глубиной, подвижных – снижается, кроме Cd. Подобного рода вариации можно объяснить изменением сорбционной способности отложений в отношении металлов в зависимости от их гранулометрического состава и уровней содержания органического вещества в тех или иных разновременных слоях осадка.

Значимое изменение гранулометрического состава, содержания органического вещества и распределения ТМ в отложениях происходит и в зависимости от расстояния от устья исследуемых рек (рис. 4). Содержание валовых форм хорошо коррелирует с содержанием глины/песка, а также органического вещества. В распределении подвижных форм большую роль играет органическое вещество и менее ощутимую – морфометрические характеристики плотин и прудов (особенно для Zn, Cr).

По результатам RDA-теста выявлено, что наименьшие концентрации валовых форм Cd, Co, Zn характерны для прудов, расположенных в нижнем течении рек, с относительно малым содержанием органического вещества в отложениях; Cu, Ni, Cr, Mn – с высоким содержанием песчаных и низким содержанием глинистых фракций (рис. 5, A). Однако статистически значимыми факторами в распределении данных форм являются количество органики ($F = 7{,}02$; $p = 0{,}003$) и глинистых частиц ($F = 11{,}76$; $p = 0{,}001$).

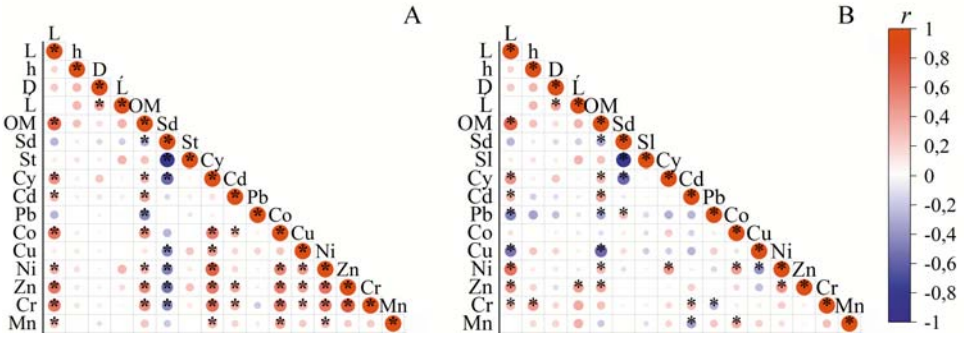


Рис. 4. Корреляционная матрица (коэффициент корреляции Спирмана) содержания валовых (A) и подвижных (B) форм ТМ с гранулометрическим составом, органическим веществом донных отложений прудов, расстоянием от устья и морфометрическими характеристиками плотин и прудов рек Морквашинка и Морквашка.

Здесь и на рис. 5: *r* – коэффициент корреляции, L – расстояние от устья, h – высота плотин, D – длина плотин, Ĺ – длина прудов, OM – содержание органического вещества, Sd – содержание песка, Sl – содержание ила, Cy – содержание глины, * – значимость ($p < 0{,}05$)

Fig. 4. Results of correlation analyses (Spearman's correlation coefficients) of the content of total (A) and mobile (B) forms of heavy metals with the grain size composition, organic matter of pond bottom sediments, the distance from the mouth, and morphometric characteristics of beaver dams and ponds of the Morkvashinka and Morkvashka Rivers.

Here and in Fig. 5: *r* – correlation coefficient, L – distance from the mouth, h – height of dams, D – length of dams, Ĺ – length of ponds, OM – organic matter content, Sd – sand content, Sl – silt content, Cy – clay content, * – significance level ($p < 0.05$)

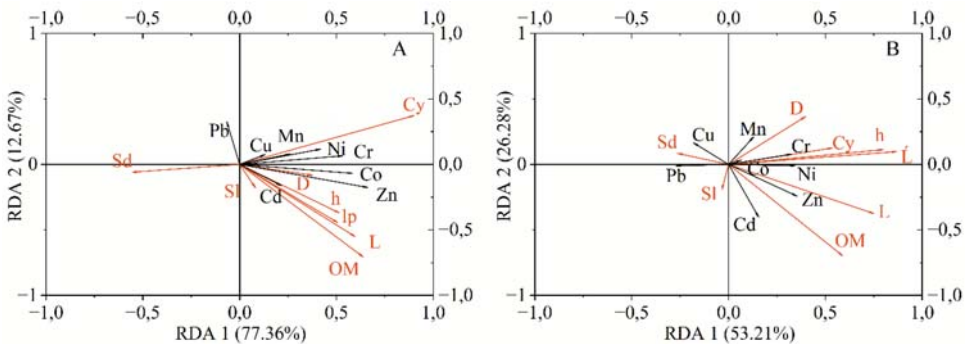


Рис. 5. Результаты RDA-теста: A – валовые и B – подвижные формы тяжелых металлов

Fig. 5. RDA test results: A – total and B – mobile forms of heavy metals

Согласно второй модели (рис. 5, В), распределение подвижных форм ТМ зависит от морфометрических характеристик бобровых прудов и плотин, а также от содержания органического вещества и доли пелитовой фракции. Наибольшие концентрации Ni и Cr характерны для относительно более длинных прудов с высокими и длинными плотинами и высокой долей пелита в осадках, а Zn – для верховьев рек с отложениями, характеризующимися максимальными показателями накопления органического вещества. Статистически значимое влияние получено для следующих факторов: расстояние от устья ($F = 10{,}08$; $p = 0{,}004$), длина плотин ($F = 10{,}00$; $p = 0{,}009$) и прудов ($F = 18{,}85$; $p = 0{,}001$), содержание органического вещества ($F = 3{,}54$; $p = 0{,}048$).

Установлено, что донные отложения исследуемых рек характеризуются незначительным накоплением Cd (табл. 6, рис. 6). Концентрация таких элементов, как Co, Cr, Pb, сопоставима, а Cu, Ni, Zn, Mn – ниже их содержания в почвах водоразделов. В целом в донных отложениях бобровых прудов концентрации валовых форм ТМ сопоставимы с содержанием их в осадках на участках с естественным руслом. Статистически значимые различия выявлены только для Pb ($p = 0{,}003$) и Cu ($p = 0{,}018$).

Содержание подвижных форм Pb, Co, Ni, Cu, Cr и Mn в донных отложениях значительно выше (в среднем в 10 раз), а концентрации Cd и Zn сопоставимы или незначительно выше, чем в почвах плакорных территорий Предволжья Республики Татарстан [Иванов, 2023] (табл. 6, рис. 7). Статистически значимые различия между концентрациями металлов в отложениях прудов и естественного русла отсутствуют, за исключением Cd ($p < 0{,}0001$) и Pb ($p = 0{,}031$).

Оценка уровня содержания ТМ в донных отложениях рек Морквашка и Морквашинка и расположенных на них прудов в основном показала отсутствие превышений региональных фоновых концентраций [Региональные..., 2019] для валовых форм. Что касается подвижных форм металлов, то в половине и более образцов выявлены превышения содержания Pb, Co, Ni в среднем в 1,1–1,5 раза (рис. 8). Максимальные уровни накопления металлов в донных отложениях р. Морквашинка характерны

Таблица 6. Содержание кислоторастворимых и подвижных форм ТМ в почвах Предволжья Республики Татарстан, мг/кг [Иванов, 2023]

Table 6. The content of acid-soluble and mobile forms of heavy metals in the soils of Pre-Volga region of the Republic of Tatarstan, mg/kg [Ivanov, 2023]

ТМ Heavy metals	Cd	Pb	Co	Cu	Ni	Zn	Cr	Mn
Валовое содержание Total content	0,33	12,1	11,8	16,1	22,4	45,2	24,8	435,5
Подвижные формы Mobile forms	0,08	0,72	0,07	0,17	0,49	0,63	0,11	14,2

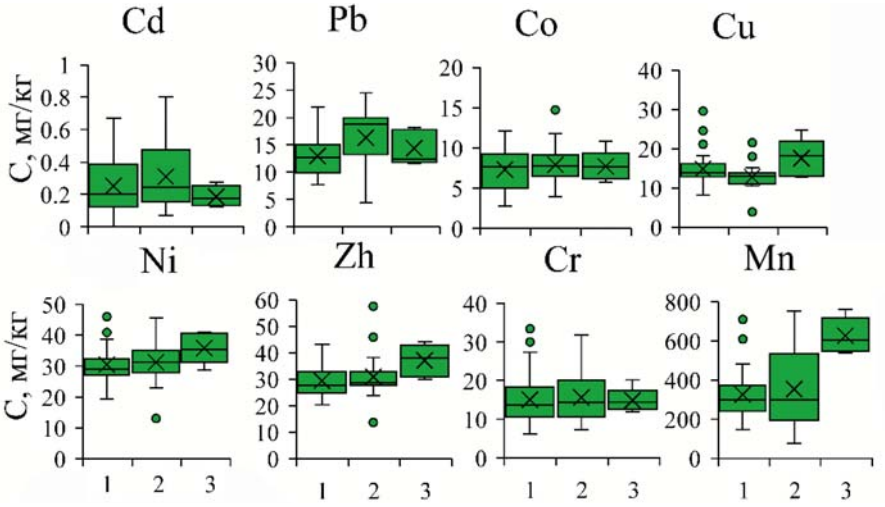


Рис. 6. Содержание валовых форм ТМ в донных отложениях бобровых прудов (1), участков с естественным руслом (2) и в приводораздельных почвах (3)

Fig. 6. Total heavy metals content in the bottom sediments of the beaver ponds (1), in natural channel sections (2), and in near-water-divide surface soils (3)

для бобровых прудов, расположенных в среднем ее течении, в непосредственной близости или ниже села Лесные Моркваши, а также у федеральной трассы Р-241 и в верховьях реки на месте разрушенных антропогенных прудов. На р. Морквашка превышения регионального фона подвижных форм металлов в отложениях отмечены в верховьях, ниже участка впадения правого притока, пересекающего федеральную трассу М-7, и в нижнем течении, где расположены дачные массивы, поселок Пустые Моркваши и город Иннополис.

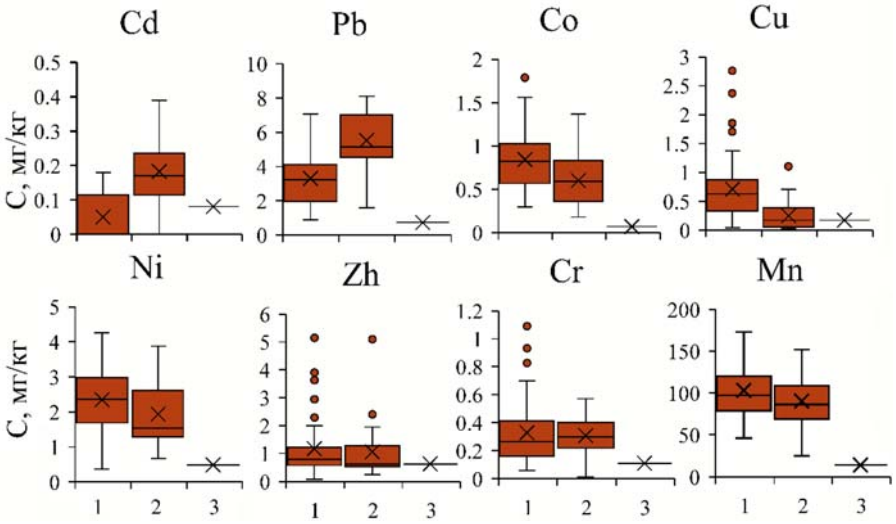


Рис. 7. Содержание подвижных форм ТМ в донных отложениях бобровых прудов (1), на участках с естественным руслом (2) и в приводораздельных почвах (3)

Fig. 7. Heavy metals mobile forms content in the bottom sediments of the beaver ponds (1), in natural channel sections (2), and in near-water-divide surface soils (3)

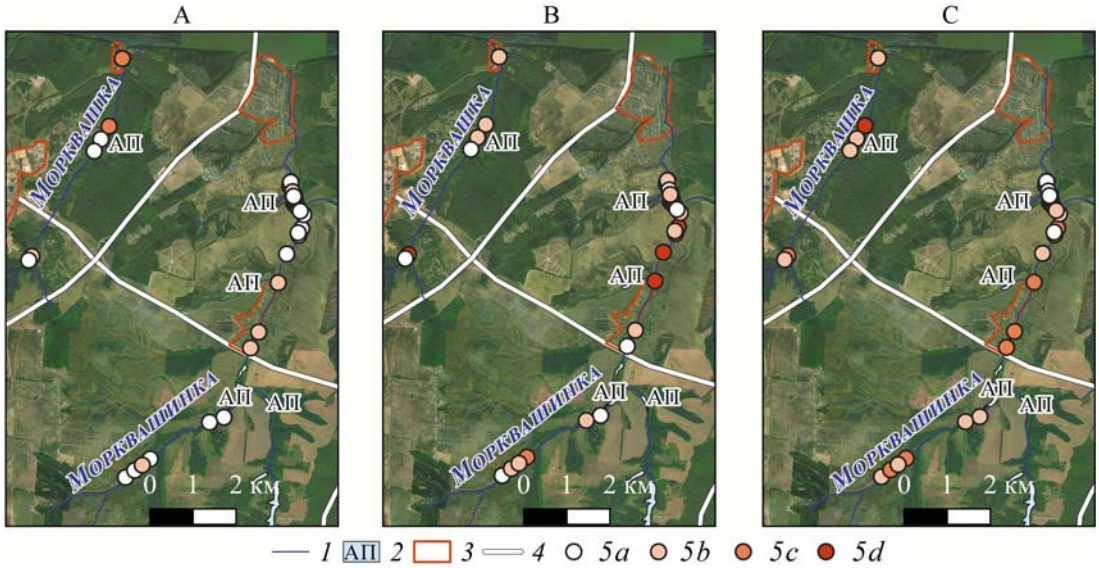


Рис. 8. Бобровые пруды с различным уровнем загрязнения донных отложений подвижными формами Pb (A), Co (B) и Ni (C):

1 – речная сеть, *2* – антропогенные пруды, *3* – населенные пункты, *4* – федеральные трассы, *5* – превышения концентрации подвижных форм ТМ относительно фоновых значений в донных отложениях рек и водохранилищ Республики Татарстан (*a* – не превышает, *b* – в 1,5 раза, *c* – в 1,5–2 раза, *d* – в 2–3 раза)

Fig. 8. Beaver ponds with different levels of bottom sediments contamination with mobile forms of Pb (A), Co (B), and Ni (C):

1 – river network, *2* – man-made ponds, *3* – settlements, *4* – federal highways, *5* – exceeded concentration of mobile forms of heavy metals relative to the background values of bottom sediments in rivers and reservoirs of the Republic of Tatarstan (*a* – does not exceed, *b* – by 1.5 times, *c* – by 1.5–2 times, *d* – by 2–3 times)

Заключение

Изучение состава донных отложений бобровых прудов малых рек Морквашинка и Морквашка, расположенных на крайнем севере Приволжской возвышенности Русской равнины, позволило оценить уровень содержания в них валовых и подвижных форм ТМ. Верхние и средние участки водотоков отличаются несколько более высоким содержанием валовых форм Co, Zn и Cr, а также подвижных форм Cd и Zn по сравнению с нижним течением. Выявлена высокая степень подвижности таких элементов, как Cd, Pb, Co и Mn. Наиболее важными факторами в распределении валовых ТМ являются расстояние от устья, гранулометрический состав, содержание органического вещества, а также длина плотин и прудов. Установлено, что концентрация валовых форм Cd незначительно, а подвижных форм Pb, Co, Ni, Cu, Cr, Mn в несколько раз (иногда и на порядок величины) выше их содержания в почвах водоразделов. В целом в донных отложениях бобровых прудов концентрации валовых форм ТМ сопоставимы с содержанием их в осадках на участках с естественным руслом без плотин. Более чем в половине исследованных образцов отложений выявлены превышения фонового содержания, в среднем в 1,1–1,5 раза, подвижных форм Pb, Co и Ni.

Литература

Башинский И. В., Осипов В. В. Скорость осаждения и химический состав взвешенного вещества в бобровых водоемах на территории заповедника «Приволжская лесостепь» (Европейская Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. Т. 4, № 3. С. 54–66. doi: 10.24189/ncr.2019.046

Бутаков Г. П. От Казани до устья Свияги // Средняя Волга / Ред. А. П. Дедков. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1991. С. 41–48.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

Ермолаев О. П., Игонин М. Е., Бубнов А. Ю., Павлова С. В. Ландшафты Республики Татарстан. Региональный ландшафтно-экологический анализ / Под ред. О. П. Ермолаева, Казань: Слово, 2007. 411 с.

Иванов Д. В. Фоновое содержание загрязняющих веществ в депонирующих средах: методология нормирования и оценка уровня загрязненности почв и донных отложений на региональном уровне: Дис. … докт. геогр. наук. Казань, 2023. 296 с.

Иванов М. М., Голосов В. Н., Иванова Н. Н. Баланс наносов и миграция 137Cs в зоне чернобыльского загрязнения: опыт и итоги исследований в бассейне р. Плавы, Тульская область // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54, №. 1. С. 55–73. doi: 10.31857/S294917892301005X

ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.32-02. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания сухого и прокаленного остатка в твердых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях гравиметрическим методом.

ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами.

Региональные нормативы «Фоновое содержание тяжелых металлов в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан» (утв. Приказом Министерства экологии и природных ресурсов РТ от 27.03.2019).

Шарифуллин А. Г., Гусаров А. В. Особенности современных эрозионно-аккумулятивных процессов на серых лесных почвах ложбин малого водосбора Республики Татарстан // Почвоведение. 2022. №. 1. С. 133–144. doi: 10.31857/S0032180X22010117

Шарифуллин А. Г., Гусаров А. В., Голосов В. Н. Современный тренд эрозионно-аккумулятивных процессов в малом распаханном водосборе, Республика Татарстан // Геоморфология. 2018. № 3. С. 93–108. doi: 10.7868/S0435428118030082

Bason C. W., Kroes D. E., Brinson M. M. The effect of beaver ponds on water quality in rural coastal plain streams // Southeast. Nat. 2017. Vol. 16, no. 4. P. 584–602. doi: 10.1656/058.016.0408

Błędzki L. A., Bubier J. L., Moulton L. A., Kyker-Snowman T. D. Downstream effects of beaver ponds on the water quality of New England first- and second-order streams // Ecohydrology. 2011. Vol. 4, no. 5. P. 698–707. doi: 10.1002/eco.163

Brazier R. E., Puttock A., Graham H. A., Auster R. E., Davies K. H., Brown C. M. L. Beaver: Nature's ecosystem engineers // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. 2021. Vol. 8, no. 1. e1494. doi: 10.1002/wat2.1494

Butler D. R., Malanson G. P. The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams // Geomorphology. 2005. Vol. 71, no. 1–2. P. 48–60. doi: 10.1016/j.geomorph.2004.08.016

Cafaro P. Reducing human numbers and the size of our economies is necessary to avoid a mass extinction and share Earth justly with other species // Philosophia. 2022. Vol. 50, no. 5. P. 2263–2282. doi: 10.1007/s11406-022-00497-w

Çevik F., Göksu M. Z. L., Derici O. B., Fındık Ö. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses // Environ. Monit. Assess. 2009. Vol. 152, no. 1–4. P. 309–317. doi: 10.1007/s10661-008-0317-3

Čiuldienė D., Vigricas E., Belova O., Aleinikovas M., Armolaitis K. The effect of beaver dams on organic carbon, nutrients and methyl mercury distribution in impounded waterbodies // Wildl. Biol. 2020. Vol. 3. P. 1–8. doi: 10.1111/wlb.00678

Crist E., Mora C., Engelman R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection // Science. 2017. Vol. 356, no. 6335. P. 260–264. doi: 10.1126/science.aal201

Devito K. J., Dillon P. J., Lazerte B. D. Phosphorus and nitrogen retention in five Precambrian shield wetlands // Biogeochem. 1989. Vol. 8, no. 3. P. 185–204. doi: 10.1007/BF00002888

Dietrich M., Ayers J. Geochemical partitioning and possible heavy metal(loid) bioaccumulation within aquaculture shrimp ponds // Sci. Total Environ. 2021. Vol. 788. Art. 147777. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147777

Dinis M. L., Fiúza A., Góis J., de Carvalho J. S., Meira Castro A. C. Assessment of natural radioactivity, heavy metals and particulate matter in air and soil around a coal-fired power plant – An integrated approach // Atmosphere. 2021. Vol. 12, no. 11. P. 1433. doi: 10.3390/atmos12111433

Du Laing G., Rinklebe J., Vandecasteele B., Meers E., Tack F. M. G. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review // Sci. Total Environ. 2009. Vol. 407, no. 13. P. 3972–3985. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.025

Duan L., Song J., Xu Y., Li X., Zhang Y. The distribution, enrichment and source of potential harmful elements in surface sediments of Bohai Bay, North China // J. Hazard. Mater. 2010. Vol. 183, no. 1–3. P. 155–164. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.005

Egemose S., Sønderup M. J., Grudinina A., Hansen A. S., Flindt M. R. Heavy metal composition in stormwater and retention in ponds dependent on pond age, design and catchment type // Environ. Technol. 2015. Vol. 36, no. 8. P. 959–969. doi: 10.1080/09593330.2014.970584

Fletcher D. E., Lindell B. E., Lindell A. H., Stankus P. T., Fletcher N. D., McArthur J. V., Seaman J. C. Basins, beaver ponds, and the storage and redistribution of trace elements in an industrially impacted coastal plain stream on the Savannah River Site, SC, USA // Environ. Int. 2019. Vol. 133. Art. 105174. doi: 10.1016/j.envint.2019.105174

Gatti R. C., Callaghan T. V., Rozhkova-Timina I., Dudko A., Lim A., Vorobyev S. N., Kirpotin S. N., Pokrovsky O. S. The role of Eurasian beaver (*Castor fiber*) in the storage, emission and deposition of carbon in lakes and rivers of the River Ob flood plain, western Siberia // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 644. P. 1371–1379. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.042

Ghrefat H., Yusuf N. Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan // Chemosphere. 2006. Vol. 65, no. 11. P. 2114–2121. doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.06.043

Gimeno-García E., Andreu V., Boluda R. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils // Environ. Pollut. 1996. Vol. 92, no. 1. P. 19–25. doi: 10.1016/0269-7491(95)00090-9

Goldhaber S. B. Trace element risk assessment: essentiality vs. toxicity // Regul. Toxicol. Pharmacol. 2003. Vol. 38, no. 2. P. 232–242. doi: 10.1016/S0273-2300(02)00020-X

Gołdyn B., Chudzińska M., Barałkiewicz D., Celewicz-Gołdyn S. Heavy metal contents in the sediments of astatic ponds: Influence of geomorphology, hydroperiod, water chemistry and vegetation // Ecotoxicol. Environ. Safety. 2015. Vol. 118. P. 103–111. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.04.016

Green K. C., Westbrook C. J. Changes in riparian area structure, channel hydraulics, and sediment yield following loss of beaver dams // J. Ecosyst. Manag. 2009. Vol. 10, no. 1. P. 68–79. doi: 10.22230/jem.2009v10n1a412

Gusarov A. V., Sharifullin A. G., Beylich A. A., Lisetskii F. N. Features of the distribution of beaver dams and ponds along small rivers: The Volga-Kama Region, European Russia // Hydrology. 2024. Vol. 11, no. 4. P. 53. doi: 10.3390/hydrology11040053

Hostetler C. E., Kincaid R. L., Mirando M. A. The role of essential trace elements in embryonic and fetal development in livestock // Vet. J. 2003. Vol. 166, no. 2. P. 125–139. doi: 10.1016/S1090-0233(02)00310-6

Hou D., O'Connor D., Igalavithana A. D., Alessi D. S., Luo J., Tsang D. C. W., Sparks D. L., Yamauchi Y., Rinklebe J., Ok Y. S. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability // Nat. Rev. Earth Environ. 2020. Vol. 1, no. 7. P. 366–381. doi: s43017-020-0061-y

Jacob J. M., Karthik C., Saratale R. G., Kumar S. S., Prabakar D., Kadirvelu K., Pugazhendhi A. Biological approaches to tackle heavy metal pollution: a survey of literature // J. Environ. Manag. 2018. Vol. 217. P. 56–70. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.03.077

Jiao W., Ouyang W., Hao F., Lin C. Anthropogenic impact on diffuse trace metal accumulation in river sediments from agricultural reclamation areas with geochemical and isotopic approaches // Sci. Total Environ. 2015. Vol. 536. P. 609–615. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.118

Kalvīte Z., Lībiete Z., Kļaviņš I., Bārdule A., Bičkovskis K. The impact of beaver dam removal on the chemical properties of water in drainage ditches in peatland forests // Scand. J. Forest Res. 2021. Vol. 36, no. 1. P. 1–14. doi: 10.1080/02827581.2020.1855364

Katsman E. A., Suzdaleva A. L., Osipov V. V, Bashinskiy I. V. Concentrations of biogenic compounds in forest-steppe water bodies and streams inhabited by beavers (*Castor fiber* L.) // Russ. J. Biol. Invas. 2020. Vol. 11. P. 31–40. doi: 10.1134/S2075111720010063

Klotz R. L. Influence of beaver ponds on the phosphorus concentration of stream water // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1998. Vol. 55, no. 5. P. 1228–1235. doi: 10.1139/f97-318

Klotz R. L. Reduction of high nitrate concentrations in a Central New York State Stream impounded by beaver // Northeast. Nat. 2010. Vol. 17, no. 3. P. 349–356. doi: 10.1656/045.017.0301

Larsen A., Larsen J. R., Lane S. N. Dam builders and their works: Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems // Earth-Sci. Rev. 2021. Vol. 218. P. 103623. doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103623

Law A., McLean F., Willby N. J. Habitat engineering by beaver benefits aquatic biodiversity and ecosystem processes in agricultural streams // Freshwat. Biol. 2016. Vol. 61, no. 4. P. 486–499. doi: 10.1111/fwb.12721

Leclerc A., Laurent A. Framework for estimating toxic releases from the application of manure on agricultural soil: National release inventories for heavy metals in

2000–2014 // Sci. Total Environ. 2017. Vol. 590–591. P. 452–460. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.117

Levanoni O., Bishop K., Mckie B. G., Hartman G., Eklöf K., Ecke F. Impact of beaver pond colonization history on methylmercury concentrations in surface water // Environ. Sci. Technol. 2015. Vol. 49, no. 21. P. 12679–12687. doi: 10.1021/acs.est.5b03146

Mertz W. The essential trace elements // Science. 1981. Vol. 213, no. 4514. P. 1332–1338. doi: 10.1126/science.7022654

Mora C. Revisiting the environmental and socio-economic effects of population growth: a fundamental but fading issue in modern scientific, public, and political circles // Ecol. Soc. 2014. Vol. 19, no. 1. Art. 38. doi: 10.5751/ES-06320-190138

Naz S., Fazio F., Habib S. S., Nawaz G., Attaullah S., Ullah M., Hayat A., Ahmed I. Incidence of heavy metals in the application of fertilizers to crops (wheat and rice), a fish (Common carp) pond and a human health risk assessment // Sustainability. 2022. Vol. 14, no. 20. Art. 13441. doi: 10.3390/su142013441

Neumayer M., Teschemacher S., Schloemer S., Zahner V., Rieger W. Hydraulic modeling of beaver dams and evaluation of their impacts on flood events // Water. 2020. Vol. 12, no. 1. Art. 300. doi: 10.3390/w12010300.

N'guessan Y. M., Probst J. L., Bur T., Probst A. Trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France): Where do they come from? // Sci. Total Environ. 2009. Vol. 407, no. 8. P. 2939–2952. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.12.047

Nyssen J., Pontzeele J., Billi P. Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: Example from the Chevral in the Ourthe Orientale basin, Ardennes, Belgium // J. Hydrol. 2011. Vol. 402, no. 1–2. P. 92–102. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.008

Otyukova N. G. Some aspects of the hydrochemical regime of a small river under the conditions of zoogenic disturbance // Water Resources. 2009. Vol. 36. P. 604–609. doi: 10.1134/S0097807809050133

Pollock M. M., Lewallen G., Woodruff K., Jordan C. E., Castro J. M. The beaver restoration guidebook: Working with beaver to restore streams, wetlands, and floodplains, version 2.0 / United States Fish and Wildlife Service. 2017.

Puttock A., Graham H. A., Carless D., Brazier R. E. Sediment and nutrient storage in a beaver engineered wetland // Earth Surf. Process. Landf. 2018. Vol. 43, no. 11. P. 2358–2370. doi: 10.1002/esp.4398

Sharifullin A. G., Gusarov A. V., Lavrova O. A., Beylich A. A. Channel gradient as a factor in the distribution of beaver dams and ponds on small rivers: A case study in the Northern extremity of the Volga Upland, the East European Plain // Water. 2023. Vol. 15, no. 13. Art. 2491. doi: 10.3390/w15132491

Stout T. L., Majerova M., Neilson B. T. Impacts of beaver dams on channel hydraulics and substrate characteristics in a mountain stream // Ecohydrology. 2017. Vol. 10, no. 1. Art. 1767. doi: 10.1002/eco.1767

Tokar' E., Kuzmenkova N., Rozhkova A., Egorin A., Shlyk D., Shi K., Hou X., Kalmykov S. Migration features and regularities of heavy metals transformation in fresh and marine ecosystems (Peter the Great Bay and Lake Khanka) // Water. 2023. Vol. 15, no. 12. Art. 2267. doi: 10.3390/w15122267.

Wang M., Zhang H. Accumulation of heavy metals in roadside soil in urban area and the related impacting factors // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2018. Vol. 15, no. 6. P. 1064. doi: 10.3390/ijerph15061064

Washington H., Kopnina H. Discussing the silence and denial around population growth and its environmental impact. How do we find ways forward? // World. 2022. Vol. 3, no. 4. P. 1009–1027. doi: 10.3390/world3040057

Wei B., Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China // Microchem. J. 2010. Vol. 94, no. 2. P. 99–107. doi: 10.1016/j.microc.2009.09.014

Wohl E. Landscape-scale carbon storage associated with beaver dams // Geophys. Res. Lett. 2013. Vol. 40, no. 14. P. 3631–3636. doi: 10.1002/grl.50710

Wohl E. Legacy effects of loss of beavers in the continental United States // Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16, no. 2. Art. 25010. doi: 10.1088/1748-9326/abd34e

Wu X., Probst A. Influence of ponds on hazardous metal distribution in sediments at a catchment scale (agricultural critical zone, S-W France) // J. Hazard. Mater. 2021. Vol. 411. Art. 125077. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125077

Zhuang P., Zou B., Li N. Y., Li Z. A. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: implication for human health // Environ. Geochem. Health. 2009. Vol. 31. P. 707–715. doi: 10.1007/s10653-009-9248-3

References

Bashinskii I. V., Osipov V. V. Sedimentation rate of suspended matter and its chemical composition in beaver water bodies in the Privolzhskaya Lesostep State Nature Reserve (European Russia). *Nat. Conserv. Res.* 2019;4(3):54–66. (In Russ.). doi: 10.24189/ncr.2019.046

Bason C. W., Kroes D. E., Brinson M. M. The effect of beaver ponds on water quality in rural coastal plain streams. *Southeast. Nat.* 2017;16(4):584–602. doi: 10.1656/058.016.0408

Błędzki L. A., Bubier J. L., Moulton L. A., Kyker-Snowman T. D. Downstream effects of beaver ponds on the water quality of New England first- and second-order streams. *Ecohydrology*. 2011;4(5):698–707. doi: 10.1002/eco.163

Brazier R. E., Puttock A., Graham H. A., Auster R. E., Davies K. H., Brown C. M. L. Beaver: Nature's ecosystem engineers. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water.* 2021;8(1):e1494. doi: 10.1002/wat2.1494

Butakov G. P. From Kazan to the mouth of the Sviyaga River. *Srednyaya Volga = Middle Volga.* Kazan: Kazan. Univ.; 1991. P. 41–48. (In Russ.)

Butler D. R., Malanson G. P. The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams. *Geomorphology*. 2005;71(1–2):48–60. doi: 10.1016/j.geomorph.2004.08.016

Cafaro P. Reducing human numbers and the size of our economies is necessary to avoid a mass

extinction and share Earth justly with other species. *Philosophia*. 2022;50(5):2263–2282. doi: 10.1007/s11406-022-00497-w

Çevik F., Göksu M. Z. L., Derici O. B., Fındık Ö. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses. *Environ. Monit. Assess.* 2009;152(1–4):309–317. doi: 10.1007/s10661-008-0317-3

Čiuldienė D., Vigricas E., Belova O., Aleinikovas M., Armolaitis K. The effect of beaver dams on organic carbon, nutrients and methyl mercury distribution in impounded waterbodies. *Wildl. Biol*. 2020;3:1–8. doi: 10.1111/wlb.00678

Crist E., Mora C., Engelman R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science*. 2017;356(6335):260–264. doi: 10.1126/science.aal201

Devito K. J., Dillon P. J., Lazerte B. D. Phosphorus and nitrogen retention in five Precambrian shield wetlands. *Biogeochem*. 1989;8(3):185–204. doi: 10.1007/BF00002888

Dietrich M., Ayers J. Geochemical partitioning and possible heavy metal(loid) bioaccumulation within aquaculture shrimp ponds. *Sci. Total Environ.* 2021;788:147777. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147777

Dinis M. L., Fiúza A., Góis J., de Carvalho J. S., Meira Castro A. C. Assessment of natural radioactivity, heavy metals and particulate matter in air and soil around a coal-fired power plant – An integrated approach. *Atmosphere*. 2021;12(11):1433. doi: 10.3390/atmos12111433

Du Laing G., Rinklebe J., Vandecasteele B., Meers E., Tack F. M. G. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review. *Sci. Total Environ*. 2009;407(13):3972–3985. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.025

Duan L., Song J., Xu Y., Li X., Zhang Y. The distribution, enrichment and source of potential harmful elements in surface sediments of Bohai Bay, North China. *J. Hazar. Mater.* 2010;183(1–3):155–164. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.005

Egemose S., Sønderup M. J., Grudinina A., Hansen A. S., Flindt M. R. Heavy metal composition in stormwater and retention in ponds dependent on pond age, design and catchment type. *Environ. Technol.* 2015;36(8):959–969. doi: 10.1080/09593330.2014.970584

Ermolaev O. P., Igonin M. E., Bubnov A. Yu., Pavlova S. V. Landscapes of the Republic of Tatarstan. Regional landscape-ecological analysis. Kazan: Slovo; 2007. 411 p. (In Russ.)

Fletcher D. E., Lindell B. E., Lindell A. H., Stankus P. T., Fletcher N. D., McArthur J. V., Seaman J. C. Basins, beaver ponds, and the storage and redistribution of trace elements in an industrially impacted coastal plain stream on the Savannah River Site, SC, USA. *Environ. Int.* 2019;133:105174. doi: 10.1016/j.envint.2019.105174

Gatti R. C., Callaghan T. V., Rozhkova-Timina I., Dudko A., Lim A., Vorobyev S. N., Kirpotin S. N., Pokrovsky O. S. The role of Eurasian beaver (*Castor fiber*) in the storage, emission and deposition of carbon in lakes and rivers of the River Ob flood plain, western Siberia. *Sci. Total Environ.* 2018;644:1371–1379. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.042

Ghrefat H., Yusuf N. Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan. *Chemosphere*. 2006;65(11):2114–2121. doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.06.043

Gimeno-García E., Andreu V., Boluda R. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. *Environ. Pollut.* 1996;92(1):19–25. doi: 10.1016/0269-7491(95)00090-9

Goldhaber S. B. Trace element risk assessment: essentiality vs. toxicity. *Regul. Toxicol. Pharmacol*. 2003;38(2):232–242. doi: 10.1016/S0273-2300(02)00020-X

Gołdyn B., Chudzińska M., Barałkiewicz D., Celewicz-Gołdyn S. Heavy metal contents in the sediments of astatic ponds: Influence of geomorphology, hydroperiod, water chemistry and vegetation. *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 2015;118:103–111. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.04.016

GOST 12536-2014; Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. (In Russ.)

Green K. C., Westbrook C. J. Changes in riparian area structure, channel hydraulics, and sediment yield following loss of beaver dams. *J. Ecosyst. Manag*. 2009;10(1):68–79. doi: 10.22230/jem.2009v10n1a412

Gusarov A. V., Sharifullin A. G., Beylich A. A., Lisetskii F. N. Features of the distribution of beaver dams and ponds along small rivers: The Volga-Kama Region, European Russia. *Hydrology*. 2024;11(4):53. doi: 10.3390/hydrology11040053

Hostetler C. E., Kincaid R. L., Mirando M. A. The role of essential trace elements in embryonic and fetal development in livestock. *Vet. J.* 2003;166(2):125–139. doi: 10.1016/S1090-0233(02)00310-6

Hou D., O'Connor D., Igalavithana A. D., Alessi D. S., Luo J., Tsang D. C. W., Sparks D. L., Yamauchi Y., Rinklebe J., Ok Y. S. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nat. Rev. Earth Environ*. 2020;1(7):366–381. doi: s43017-020-0061-y

Ivanov D. V. Background content of pollutants in depositions: methodology and assessment of soil and bottom sediments contamination level at the regional level: DSc (Dr. of Geog.) thesis. Kazan; 2023. 296 p. (In Russ.)

Ivanov M. M., Golosov V. N., Ivanova N. N. The sediment budget and migration of 137Cs in Chernobyl affected area: 30 years of investigations in the Plava River basin, Tula Region. *Geomorfologiya i paleogeografiya = Geomorphology and Paleogeography.* 2023;54(1):55–73. (In Russ.). doi:10.31857/S294917892301005X

Jacob J. M., Karthik C., Saratale R. G., Kumar S. S., Prabakar D., Kadirvelu K., Pugazhendhi A. Biological approaches to tackle heavy metal pollution: a survey of literature. *J. Environ. Manag.* 2018;217:56–70. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.03.077

Jiao W., Ouyang W., Hao F., Lin C. Anthropogenic impact on diffuse trace metal accumulation in river sediments from agricultural reclamation areas with geochemical and isotopic approaches.

Sci. Total Environ. 2015;536:609–615. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.118

Kalvīte Z., Lībiete Z., Kļaviņš I., Bārdule A., Bičkovskis K. The impact of beaver dam removal on the chemical properties of water in drainage ditches in peatland forests. *Scandin. J. Forest Res.* 2021;36(1):1–14. doi: 10.1080/02827581.2020.1855364

Katsman E. A., Suzdaleva A. L., Osipov V. V., Bashinskiy I. V. Concentrations of biogenic compounds in forest-steppe water bodies and streams inhabited by beavers (*Castor fiber* L.). *Russ. J. Biol. Invas.* 2020;11:31–40. doi: 10.1134/S2075111720010063

Klotz R. L. Influence of beaver ponds on the phosphorus concentration of stream water. Can. J. Fisher. Aquat. Sci. 1998;55(5):1228–1235. doi: 10.1139/f97-318

Klotz R. L. Reduction of high nitrate concentrations in a Central New York State Stream impounded by beaver. *Northeast. Nat.* 2010;17(3):349–356. doi: 10.1656/045.017.0301

Larsen A., Larsen J. R., Lane S. N. Dam builders and their works: Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems. *Earth-Sci. Rev*. 2021;218:103623. doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103623

Law A., McLean F., Willby N. J. Habitat engineering by beaver benefits aquatic biodiversity and ecosystem processes in agricultural streams. *Freshwat. Biol.* 2016;61(4):486–499. doi: 10.1111/fwb.12721

Leclerc A., Laurent A. Framework for estimating toxic releases from the application of manure on agricultural soil: National release inventories for heavy metals in 2000–2014. *Sci*. *Total Environ.* 2017;590–591:452–460. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.117

Levanoni O., Bishop K., Mckie B.G., Hartman G., Eklöf K., Ecke F. Impact of beaver pond colonization history on methylmercury concentrations in surface water. *Environ. Sci. Technol*. 2015;49(21):12679–12687. doi: 10.1021/acs.est.5b03146

Mertz W. The essential trace elements. *Science*. 1981;213(4514):1332–1338. doi: 10.1126/science.7022654

Mora C. Revisiting the environmental and socioeconomic effects of population growth: a fundamental but fading issue in modern scientific, public, and political circles. *Ecol. Soc.* 2014;19(1):38. doi: 10.5751/ES-06320-190138

Naz S., Fazio F., Habib S. S., Nawaz G., Attaullah S., Ullah M., Hayat A., Ahmed I. Incidence of heavy metals in the application of fertilizers to crops (wheat and rice), a fish (Common carp) pond and a human health risk assessment. *Sustainability*. 2022;14(20):13441. doi: 10.3390/su142013441

Neumayer M., Teschemacher S., Schloemer S., Zahner V., Rieger W. Hydraulic modeling of beaver dams and evaluation of their impacts on flood events. *Water*. 2020;12(1):300. doi: 10.3390/w12010300

N'guessan Y. M., Probst J. L., Bur T., Probst A. Trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France): Where do they come from? *Sci. Total Environ*. 2009;407(8):2939–2952. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.12.04

Nyssen J., Pontzeele J., Billi P. Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: Example from the Chevral in the Ourthe Orientale basin, Ardennes, Belgium. *J. Hydrol.* 2011;402(1–2):92–102. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.008

Otyukova N. G. Some aspects of the hydrochemical regime of a small river under the conditions of zoogenic disturbance. *Water Resources*. 2009;36:604–609. doi: 10.1134/S0097807809050133

PND F 16.2.2:2.3:3.32-02. Quantitative chemical analysis of soil. Methods for measuring the content of dry and calcined residue in solid and liquid wastes of production and consumption, sediments, sludge, activated sludge, bottom sediments by the gravimetric method. (In Russ.)

PND F 16.2.2:2.3.71-2011. Quantitative chemical analysis of soil. Methods for measuring the mass fraction of metals sewage sludge, sediments, and plant samples using spectral methods. (In Russ.)

Pollock M. M., Lewallen G., Woodruff K., Jordan C. E., Castro J. M. The beaver restoration guidebook: Working with beaver to restore streams, wetlands, and floodplains, version 2.0. United States Fish and Wildlife Service. 2017.

Puttock A., Graham H. A., Carless D., Brazier R. E. Sediment and nutrient storage in a beaver engineered wetland. *Earth Surf. Process. Landf.* 2018;43(11):2358–2370. doi: 10.1002/esp.4398

Regional standards 'Background content of heavy metals in bottom sediments of surface water bodies of the Republic of Tatarstan' (approved by the Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Tatarstan dated 27.03.2019) (In Russ.)

Sharifullin A. G., Gusarov A. V. Contemporary erosion and sedimentation on gray forest soils in hollows of small catchments of the Republic of Tatarstan, European Russia. *Eurasian Soil Sci.* 2022;55:115–125. doi: 10.1134/S1064229322010112

Sharifullin A. G., Gusarov A. V., Golosov V. N. Assessment of contemporary erosion/sedimentation trend within a small cultivated catchment in the Republic of Tatarstan (European Russia). *Geomorfologiya = Geomorphology*. 2018;3:93–108. (In Russ.). doi: 10.7868/S0435428118030082

Sharifullin A. G., Gusarov A. V., Lavrova O. A., Beylich A. A. Channel gradient as a factor in the distribution of beaver dams and ponds on small rivers: A case study in the Northern extremity of the Volga Upland, the East European Plain. *Water*. 2023;15(13):2491. doi: 10.3390/w15132491

Stout T. L., Majerova M., Neilson B. T. Impacts of beaver dams on channel hydraulics and substrate characteristics in a mountain stream. *Ecohydrology*. 2017;10(1):e1767. doi: 10.1002/eco.1767

Tokar' E., Kuzmenkova N., Rozhkova A., Egorin A., Shlyk D., Shi K., Hou X., Kalmykov S. Migration features and regularities of heavy metals transformation in fresh and marine ecosystems (Peter the Great Bay and Lake Khanka). *Water*. 2023;15(12):2267. doi: 10.3390/w15122267

Wang M., Zhang H. Accumulation of heavy metals in roadside soil in urban area and the related

impacting factors. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2018;15(6):1064. doi: 10.3390/ijerph15061064

Washington H., Kopnina H. Discussing the silence and denial around population growth and its environmental impact. How do we find ways forward? *World.* 2022;3(4):1009–1027. doi: 10.3390/world3040057

Wei B., Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchem. J.* 2010;94(2):99–107. doi: 10.1016/j.microc.2009.09.014

Wohl E. Landscape-scale carbon storage associated with beaver dams. *Geophys. Res. Lett.* 2013;40(14):3631–3636. doi: 10.1002/grl.50710

Wohl E. Legacy effects of loss of beavers in the continental United States. *Environ*. *Res. Lett.* 2021;16(2):25010. doi: 10.1088/1748-9326/abd34e

Wu X., Probst A. Influence of ponds on hazardous metal distribution in sediments at a catchment scale (agricultural critical zone, S-W France*). J. Hazard. Mater.* 2021;411:125077. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125077

Zhuang P., Zou B., Li N. Y., Li Z. A. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: implication for human health. *Environ. Geochem. Health*. 2009;31:707–715. doi: 10.1007/s10653-009-9248-3

Поступила в редакцию / received: 10.03.2025; принята к публикации / accepted: 14.03.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шарифуллин Айдар Гамисович

канд. геогр. наук, доцент кафедры ландшафтной экологии Института экологии и природопользования

e-mail: AGSharifullin@kpfu.ru

Гусаров Артем Викторович

канд. геогр. наук, доцент, старший научный сотрудник НИЦ «Цифровая Земля» Института геологии и нефтегазовых технологий

e-mail: avgusarov@mail.ru

Иванов Дмитрий Владимирович

д-р геогр. наук, заместитель директора по научной работе

e-mail: water-rf@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Sharifullin, Aidar

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor of the Department of Landscape Ecology of the Institute of Environmental Sciences

Gusarov, Artyom

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor, Senior Researcher, Digital Earth Research Center of the Institute of Geology and Petroleum Technologies

Ivanov, Dmitry

Dr. Sci. (Geog.), Deputy Director