

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СТАРИЦЫ РЕКИ СОК

© 2023

Прохорова Н.В., Макарова Ю.В., Романов И.Н., Бугров С.В.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
(г. Самара, Российская Федерация)

Аннотация. В статье анализируется динамика накопления тяжелых металлов (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb) и металлоидов (As, Se) в донных отложениях слабопроточной старицы р. Сок, образовавшейся в результате создания Саратовского водохранилища и расположенной в пределах Красноглинского района г. Самара. Исследование проводилось в 2021 и 2022 гг. В старице реки были заложены четыре пробные площади; контролем служила пробная площадь, выделенная в Саратовском водохранилище, в непосредственной близости от старицы. Количественное определение содержания тяжелых металлов и металлоидов в донных отложениях осуществляли методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Полученные результаты показали, что в каждый период исследований складываются специфические условия, отражающиеся на аккумуляции изучаемых элементов в донных отложениях старицы. На эти процессы влияют: местоположение пробной площади в старице, степень проточности, характер весеннего паводка, антропогенная трансформация и особенности зарастания площади *Typha angustifolia* L. Для всех пробных площадей, расположенных в старице, более высокие концентрации большинства анализируемых элементов были выявлены в 2022 г. Особенно активно тяжелые металлы и металлоиды накапливались в донных отложениях пробной площади 4, расположенной в старице за искусственной дамбой и отличающейся самой слабой проточностью. Почвенный покров г. Самара оказывает слабое и умеренное влияние на количественные характеристики металлоаккумуляции в донных отложениях старицы. По сравнению с контролем в донных отложениях всех старичных пробных площадей изучаемые элементы накапливались более активно, что подтверждает аккумулятивный характер речных стариц разной степени замкнутости.

Ключевые слова: тяжелые металлы; металлоиды; донные отложения; старица; река Сок; Саратовское водохранилище; город Самара.

THE DYNAMICS OF HEAVY METALS AND METALLOIDS ACCUMULATION IN OXBOW BOTTOM SEDIMENTS OF THE SOK RIVER

© 2023

Prokhorova N.V., Makarova Yu.V., Romanov I.N., Bugrov S.V.

Samara National Research University (Samara, Russian Federation)

Abstract. The article analyzes the dynamics of heavy metals (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb) and metalloids (As, Se) accumulation in the bottom sediments of the low-flow oxbow of the Sok River. This oxbow was formed as a result of the Saratov reservoir creation and located within the Krasnoglinsky District of the Samara city. The study was conducted in 2021 and 2022. Four trial plots were established in the oxbow of the river; the control plot was a sample area allocated in the Saratov reservoir, in the immediate vicinity of the oxbow. The quantitative determination of heavy metals and metalloids content in bottom sediments was carried out using inductively coupled plasma spectrometry. The results obtained showed that specific conditions arise in each research period that affect the studied elements accumulation in the oxbow bottom sediments. These processes are influenced by the location of the sample plot in the oxbow, the flow degree, the spring flood nature, the anthropogenic transformation and the overgrowth of *Typha angustifolia* L. For all sample plots located in the oxbow, higher concentrations of most of analyzed elements were detected in 2022. Heavy metals and metalloids accumulated especially actively in the bottom sediments of sample plot 4, located in the oxbow behind an artificial dam and characterized by the weakest flow. The soil cover of Samara city possesses weak and moderate effect on the quantitative characteristics of metal accumulation in the oxbow bottom sediments. Compared to the control, the studied elements accumulated more actively in the bottom sediments of all oxbow sample areas, which confirms the accumulative nature of river oxbow of varying degrees of isolation.

Keywords: heavy metals; metalloids; bottom sediments; oxbow; Sok River; Saratov reservoir; Samara city.

Введение

Интерес экологов к пресноводным поверхностным водоемам (рекам, озерам, водохранилищам) определяется выраженной способностью водоемов к аккумуляции вещества, в том числе различных токсикантов. Многочисленными исследованиями показано, что в таких аккумулятивных системах наиболее активное депонирование химических соединений происходит в донных осадках [1, р. 20; 2; 3, р. 211–212;

4, с. 15]. Особенно интенсивно водоемы загрязняются в черте города, где к природным источникам химических элементов и их соединений подключаются многочисленные техногенные источники. Эколого-геохимическая оценка донных отложений водоемов урбанизированной среды актуальна и в теоретическом, и в практическом аспекте, так как позволяет выявлять интенсивность и масштабы техногенного загрязнения природной среды города [5, с. 255].

Донные отложения, обладая ярко выраженными депонирующими свойствами, представляют собой эффективный индикатор качества воды и почвенного покрова окружающей водоём ландшафтов, а также состава и особенностей процесса разрушения горных пород для обширных водосборных площадей. В условиях города донные отложения позволяют в ходе прикладных эколого-геохимических исследований выявлять наиболее значимые техногенные источники загрязнения окружающей среды, а также разнообразие загрязнителей [6, с. 23].

Поступление загрязняющих веществ в водоемы и затем в донные отложения осуществляется миграцией из почв, соподчиненных водотоков и с аэральным переносом. Если источником загрязняющих веществ для конкретного водоёма являются почвы, то они в большей степени переносятся водой в виде растворов, а также с твёрдым или дисперсным обломочным материалом. Привнесение вещества в донные осадки воздушным путем менее значимо из-за водного барьера. В конечном итоге донные отложения в основном формируются в результате абиотических эрозионных процессов, деятельности живых организмов в водной среде и техногенных процессов [5, с. 255–256; 7, с. 14–15]. При этом донные отложения признаны чувствительным индикатором загрязнения как водной среды, так и окружающих ландшафтов [8, с. 37].

Среди загрязнителей, аккумулирующихся в донных отложениях городских водоёмов, наибольший интерес представляют тяжелые металлы и металлоиды, источники которых в промышленных городах многочисленны и разнообразны [8, с. 37–38; 9, с. 60; 10, р. 288].

Водные экосистемы и их донные отложения выполняют важные функции в процессах миграции различных химических элементов, включая тяжелые металлы и металлоиды. Анализ этих процессов позволяет получить важную информацию для оценки загрязнённости водоемов и прилегающих к ним территорий. Донные отложения активно сорбируют химические элементы из воды водоема, на что указывает очень высокие коэффициенты накопления – до 10000 [11, с. 366; 12, р. 793]. При этом обогащение донных отложений тяжелыми металлами и металлоидами создает реальную угрозу для живых организмов аквальных комплексов [13, р. 21; 14, р. 5454].

Несмотря на очевидность существования проблемы техногенного, в том числе и полиметаллического, загрязнения донных отложений пресноводных водоемов в промышленно развитых регионах нашей страны, их эколого-геохимические и токсикологические особенности, масштабы и степень воздействия на водные экосистемы изучены весьма фрагментарно и требуют внимания экологов, биогеохимиков и токсикологов [15, с. 107; 16, с. 640].

Поверхностные пресноводные объекты разного типа широко распространены на территории Самарской области, в том числе в урбанизированной среде. Довольно много таких объектов на территории г. Самары: в основном это замкнутые поверхностные искусственные водоемы – пруды, но, кроме них, к западной части города, к волжскому склону примыкает Саратовское водохранилище с впадающими в него реками Самара и Сок и их многочисленными старицами.

Целью настоящего исследования является оценка динамики накопления тяжёлых металлов и металлоидов в донных отложениях слабопроточной старицы р. Сок, расположенной в Красноглинском районе г. Самары.

Материалы и методы исследования

Сооружение каскада гидроэлектростанций с крупными водохранилищами на р. Волге существенным образом изменило облик ландшафтов её водосборного бассейна. Поменялась структура русел малых рек, впадающих в р. Волгу, возникли новые водотоки, а также многочисленные старицы [17]. Одна из таких стариц с момента создания Саратовского водохранилища образовалась на участке старого русла р. Сок, расположенного ниже современного места впадения реки в водохранилище в Красноглинском районе г. Самары. Изучаемый водный объект с начала своего формирования и до настоящего времени испытывает сильную антропогенную нагрузку и претерпевает заметную эколого-геохимическую трансформацию [18, с. 186]. Расположение этой старицы и сохранившаяся, хотя и ограниченная, связь с Саратовским водохранилищем определяют ценность данного водного объекта в качестве натурной модели для изучения процессов миграции и накопления тяжёлых металлов и металлоидов в донных отложениях ее участков, различающихся по экологическим условиям.

В пределах старицы р. Сок были заложены 4 пробные площади (1–4), контрольная пробная площадь (5к) находилась вне старицы в пределах прибрежной зоны Саратовского водохранилища (рис. 1).

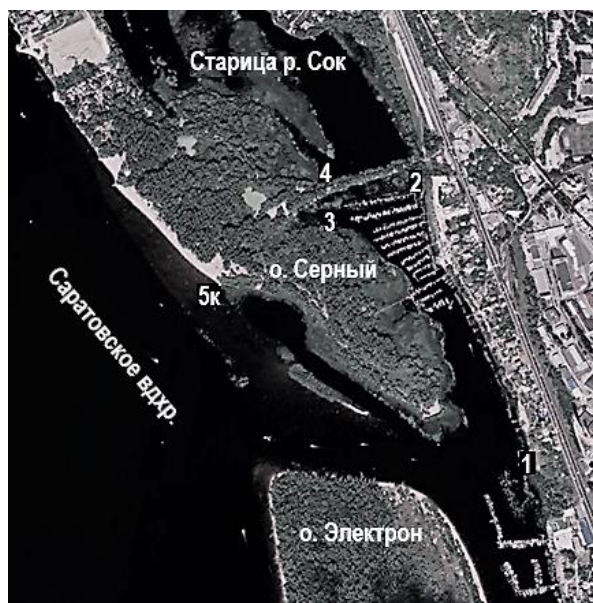


Рисунок 1 – Местоположение старицы р. Сок и изучаемых пробных площадей

Пробная площадь 1 (ПП 1) располагается на месте заброшенного пляжа, который в рипальной зоне зарастает рогозом узколистым (*Typha angustifolia* L.). К западу от площади находится о. Электрон. Пробная площадь лежит ниже остальных пробных площадей по течению и находится на стыке старицы и воложки Серной, где сообщаются водные массы Саратовского водохранилища и старицы.

Пробная площадь 2 (ПП 2) представляет собой место впадения ручья в старицу, находящееся в непосредственной близости к нижней по течению дамбе и

рядом с лодочной станцией. В приливно-отливной части эта пробная площадь полностью занята хорошо развитой популяцией *Typha angustifolia*.

Пробная площадь 3 (ПП 3) располагается вблизи о. Серный (внутренний берег острова – это берег старицы). К северу от этого места и выше по течению находится мост с протокой, к востоку – лодочная станция. Рогоз узколистный произрастает здесь вдоль всей прибрежной полосы, образуя обширные заросли.

Пробная площадь 4 (ПП 4) находится вплотную к дамбе, примерно в 15 м от протоки, под мостом. По кромке берега местами встречаются только молодые популяции *Typha angustifolia*, появившиеся относительно недавно. Однако в 30 м от этой пробной площади идёт очень широкая отмель, десятилетиями зараставшая рогозом. Данный процесс ускорился в последние годы и уже привёл к обмелению единственной протоки под мостом, что делает эту пробную площадь практически непроточной большую часть года.

Пробная площадь 5 (ПП 5к) расположена на Красноглинском пляже в Саратовском водохранилище. *Typha angustifolia* имеет локальный характер произрастания, но в последнее время этот вид активно разрастается вдоль прибрежной полосы. Данная пробная площадь была выбрана в качестве контрольной, так как располагается за пределами старицы в при-

брежной зоне Саратовского водохранилища. Здесь наблюдается наиболее быстрое течение, которое способствует заиливанию участка и активизирует миграцию загрязнителей.

В осенний период 2021 и 2022 гг. на каждой пробной площади были отобраны пробы донных отложений согласно установленным в гидрологии требованиям [19]. Определение содержания тяжелых металлов (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb) и металлоидов (As, Se) в отложениях проводили методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [20].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ особенностей накопления тяжелых металлов и металлоидов в донных отложениях старицы р. Сок осуществляли на основе показателей среднего содержания химических элементов в пробах площадей (табл. 1). Данные по пробным площадям 1–4, расположенным в старице реки, сравнивали между собой и с данными по контрольной пробной площади 5к, находящейся в Саратовском водохранилище, а также с концентрациями элементов в донных отложениях Саратовского водохранилища, полученными И.И. Томилиной с соавторами [15, с. 112] и принятыми нами за фоновые.

Таблица 1 – Среднее содержание тяжелых металлов и металлоидов в донных отложениях старицы р. Сок и Саратовского водохранилища в 2021–2022 гг., мг/кг воздушно-сухой массы

Химический элемент	Номер пробной площади					Саратовское водохранилище [15, с. 112]
	1	2	3	4	5к	
V	12,33	22,00	17,24	33,77	7,92	–
	16,83	36,88	19,61	34,42	10,17	
Cr	8,37	7,44	12,22	13,68	5,75	21,6
	9,06	11,92	13,21	11,79	7,88	
Mn	63,66	89,56	116,21	664,91	92,06	649,9
	92,20	155,40	523,00	470,65	86,30	
Co	3,05	2,24	4,18	3,57	2,34	4,7
	3,00	3,19	3,91	2,54	2,39	
Ni	10,20	0,0	5,7	0,3	11,4	7,70
	9,72	7,66	14,04	12,0	7,61	
Cu	3,38	7,04	5,26	15,06	1,29	5,8
	4,58	14,76	6,46	12,28	1,38	
Zn	25,86	49,20	22,82	48,54	9,22	16,8
	15,41	72,65	20,20	48,83	8,94	
As	0,83	0,66	1,45	4,11	0,68	–
	0,91	0,93	3,03	4,11	1,03	
Se	0,00	0,00	0,06	0,72	0,00	–
	0,00	0,00	0,08	0,27	0,00	
Rb	0,90	1,06	1,84	2,16	0,45	–
	2,10	4,45	3,73	4,39	1,50	
Sr	10,14	30,21	12,69	83,95	5,72	–
	23,88	58,60	24,60	102,25	9,77	
Cd	0,07	0,11	0,09	0,33	0,05	0,1
	0,07	0,14	0,09	0,23	0,04	
Pb	2,49	6,41	2,13	6,84	1,41	4,8
	8,92	9,81	2,38	18,11	1,03	
Суммарное содержание	141,28	215,93	201,89	877,94	138,29	–
	186,68	376,39	634,34	721,87	138,04	

Примечание. Для каждого химического элемента верхний показатель – содержание в донных отложениях в 2021 г., нижний показатель – в 2022 г.

Сравнительный анализ показал, что для ПП 1 выше фоновых значений в 1,5–2 раза концентрации Ni в донных отложениях в 2021 и 2022 гг., Zn в 2021 г., Pb в 2022 г.; содержание остальных химических элементов ниже их фоновых значений (табл. 1). В донных осадках ПП 2 выше фоновых концентрации Cu, Cd, Pb и, особенно, Zn (в 3–4 раза) на протяжении всего периода исследования. ПП 3 характеризовалась превышениями фоновых показателей по Ni и Cu в 2022 г., Zn в 2021 и 2022 гг. В донных отложениях ПП 4 было установлено очень слабое превышение над фоновыми показателями по содержанию Mn в 2021 г., более значимые превышения (в 2–3 раза) выявлены по Ni в 2022 г., Cu и Zn в 2021 и 2022 гг. Ни на одной из четырёх пробных площадей в старице р. Сок не выявлены концентрации Co и Cr, превышающие фоновые показатели для донных отложений Саратовского водохранилища.

В 2021 и 2022 гг. среднее содержание Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Cd и Pb в донных отложениях контрольной ПП 5к было ниже, чем в Саратовском водохранилище в целом. Исключение составил только Ni в 2021 г. (табл. 1).

Следует отметить, что содержание V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb, As и Se в донных отложениях части Саратовского водохранилища, примыкающей к территории г. Самары, а также содержание V, As, Se, Rb и Sr в донных отложениях Саратовского водохранилища в целом ранее установлены не были.

С целью оценки динамики накопления тяжелых металлов и металлоидов в донных отложениях старицы р. Сок в исследуемый период, было проведено сравнение полученных количественных данных за 2021 и 2022 гг. по каждой пробной площади (табл. 1).

В донных отложениях ПП 1 большая часть изучаемых элементов (V, Cr, Mn, Cu, As, Rb, Sr, Pb) накапливалась в 2022 г. Осенью 2021 г. более высокие концентрации в донных отложениях этой пробной площади были характерны только для Ni и Zn (в 1,5–3 раза). Равные концентрации были выявлены для Co и Cd. Se в период проведения исследования не обнаружен.

В донных осадках ПП 2 в 2022 г. все исследуемые элементы накапливались в больших концентрациях, чем в 2021 г. Как и на ПП 1, не был обнаружен Se.

Донные отложения ПП 3 также характеризовались более высокими концентрациями большинства анализируемых элементов в 2022 г. Исключение составили Co и Zn. Концентрации Cd оказались одинаковыми в 2021 и 2022 гг.

ПП 4 проявила иную динамику накопления тяжёлых металлов и металлоидов в донных отложениях. Максимальные концентрации большинства элементов (Cr, Mn, Co, Cu, Se, Sr, Cd) были установлены в 2021 г. В 2022 г. более высокие концентрации показаны только для V, Ni, Rb и Pb. Содержание Zn и As не различалось.

В донных отложениях контрольной пробной площади в Саратовском водохранилище также была выявлена своя динамика накопления металлов и металлоидов. В 2021 г. более высокие концентрации были установлены для Mn, Ni, Zn, Cd и Pb, в 2022 г. – для V, Cr, Cu, As, Rb и Sr. Одинаковые концентрации были характерны для Co, а Se не был выявлен в донных отложениях этой пробной площади ни в 2021, ни в 2022 гг.

Таким образом, для донных отложений пробных площадей с 1 по 3 были характерны более высокие концентрации большинства анализируемых элементов в 2022 г., а для ПП 4 – в 2021 г. На контрольной пробной площади примерно половина элементов более активно накапливалась в 2021 г., а другая половина – в 2022 г. Se не был обнаружен в донных отложениях площадью 1, 2 и 5; на пробных площадях 4 и, особенно, 3 его концентрация была низкой.

Показателен анализ суммарного накопления тяжёлых металлов и металлоидов в донных отложениях изучаемых пробных площадей (табл. 1). На пробных площадях 1–3 и 5к в 2021 и 2022 гг. суммарное содержание анализируемых химических элементов в донных отложениях было ниже, чем на ПП 4. На площадях 1–3 элементы интенсивнее накапливались в 2022 г. по сравнению с 2021 г.; на ПП 4 наблюдался обратный процесс. Особенности аккумуляция химических элементов в донных отложениях старицы р. Сок в 2022 г. являются следствием нетипично затяжного и высокого половодья в Саратовском водохранилище. Поднятие уровня воды в старице в 2022 г. привело к тому, что рядом с ПП 4, на дамбе под мостом образовалась и просуществовала на месяц дольше обычного протока, соединяющая основную старицу реки с ее нижней по течению частью. Тяжелые металлы и металлоиды вместе с донными осадками подхватывались течением и переносились по протоке с ПП 4 на ПП 3. Остаточные количества токсикантов достигали расположенной ниже по течению ПП 1, а также от ПП 3 частично относились в сторону, к ПП 2.

На хорошо промываемой течением Саратовского водохранилища контрольной пробной площади 5к суммарное содержание тяжелых металлов и металлоидов в донных отложениях уступало их содержанию на старичных пробных площадях, при этом сохраняясь неизменным на протяжении 2021 и 2022 гг. (табл. 1).

Основной поток загрязнителей поступает в водные объекты и их донные отложения в результате миграции из почв водосборных бассейнов. В этом плане интересна связь аккумуляции тяжелых металлов и металлоидов в донных осадках с их содержанием в почвах ландшафтов, примыкающих к водоему. В нашем случае – это почвы г. Самары, среднее содержание химических элементов в гумусовом горизонте которых устанавливалось нами методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в период 2018–2021 гг. На основе этих групп числовых данных были рассчитаны коэффициенты концентрации химических элементов (Kc) и составлены геохимические ряды [21, с. 53], позволяющие оценить содержание элементов в донных отложениях пробных площадей (табл. 2). В представленных рядах величина $Kc < 1$ свидетельствует о рассеянии химического элемента в донных отложениях, $Kc > 1$ – о его накоплении.

Из таблицы 2 следует, что в 2021 г. в донных отложениях старичных пробных площадей 1–3 и контрольной площади 5к на берегу Саратовского водохранилища наблюдалось рассеяние всех анализируемых тяжелых металлов и металлоидов по сравнению с почвами г. Самары; отличительной особенностью ПП 4 стало слабое и умеренное накопление V, Cd, As, Sr, Mn и Se. В 2022 г. накопление V, As, Sr и Mn на ПП 4 сохранилось. В этом же году к числу накоп-

ливающихся элементов стали относиться V и Sr на ПП 2, а также As и Mn на ПП 3. В целом рассчитанные коэффициенты концентрации демонстрируют повышение содержания тяжелых металлов и металлоидов в донных отложениях старицы р. Сок и Саратовского водохранилища в 2022 г. по сравнению с 2021 г. Также становится очевидным, что почвы г. Самары в небольших и умеренных количествах поставляют тяжелые металлы и металлоиды в старицу р. Сок и сообщаемое с ней Саратовское водохранилище. При этом в донных отложениях водохранилища химические элементы закрепляются плохо вследствие достаточно высокой скорости течения воды. Проточность на 1, 2 и 3 пробных площадях в старице обуславливает зачастую низкое содержание химических элементов в донных осадках. ПП 4 расположена в старице за дамбой, окружающие ее участки суши интенсивно зарастают розогом, про-

точность практически отсутствует, поэтому в донных отложениях этой площади происходит накопление химических элементов на протяжении всего периода наблюдения.

Сравнение полученных нами числовых данных по содержанию тяжелых металлов и металлоидов в донных осадках ПП 5к, расположенной на участке Саратовского водохранилища, со средними (фоновыми) данными по Саратовскому водохранилищу в целом [15] показало, что они, как правило, достаточно близки. Это обстоятельство позволяет использовать показатели ПП 5к в качестве фоновых для расчета коэффициентов концентрации элементов в донных отложениях пробных площадей в старице р. Сок с последующим построением соответствующих геохимических рядов (табл. 3). При этом из группы учитываемых элементов выпадает Se, так как в донных отложениях ПП 5к он обнаружен не был.

Таблица 2 – Геохимические ряды донных отложений пробных площадей, построенные с учетом среднего содержания химических элементов в гумусовом горизонте почв г. Самары

Номер пробной площади	Геохимический ряд донных отложений	
	2021 год	2022 год
1	Se (0) – Rb (0,09) – Pb (0,12) – Cu (0,13) – Mn (0,22) – Cd (0,26), Zn (0,26) – Sr (0,27) – As (0,35) – V (0,39) – Ni (0,43) – Cr (0,44) – Co (0,50)	Se (0) – Zn (0,16) – Cu (0,17) – Rb (0,21) – Cd (0,26) – Mn (0,32) – As (0,39) – Ni (0,41) – Pb (0,42) – Cr (0,48) – Co (0,49) – V (0,54) – Sr (0,63)
2	Se (0), Ni (0) – Rb (0,11) – Cu (0,26) – As (0,28) – Pb (0,30) – Mn (0,31) – Co (0,37) – Cr (0,39) – Cd (0,41) – Zn (0,50) – V (0,70) – Sr (0,80)	Se (0) – Ni (0,32) – As (0,39) – Rb (0,45) – Co (0,52), Cd (0,52) – Mn (0,54) – Cu (0,55) – Cr (0,63) – Zn (0,74) – <u>V (1,18)</u> – <u>Sr (1,55)</u>
3	Pb (0,10) – Rb (0,18) – Se (0,21) – Cu (0,20) – Zn (0,23) – Ni (0,24) – Cd (0,33) – Sr (0,34) – Mn (0,40) – V (0,55) – As (0,61) – Cr (0,65) – Co (0,69)	Pb (0,11) – Zn (0,20) – Cu (0,24) – Se (0,29) – Cd (0,33) – Rb (0,37) – Ni (0,59) – V (0,63) – Co (0,64) – Sr (0,65) – Cr (0,70) – <u>As (1,28)</u> – <u>Mn (1,81)</u>
4	Ni (0,01) – Rb (0,22) – Pb (0,32) – Zn (0,49) – Cu (0,56) – Co (0,59) – Cr (0,72) – <u>V (1,08)</u> – <u>Cd (1,22)</u> – <u>As (1,74)</u> – <u>Sr (2,22)</u> – <u>Mn (2,30)</u> – <u>Se (2,57)</u>	Co (0,42) – Rb (0,44) – Cu (0,46) – Zn (0,49) – Ni (0,51) – Cr (0,62) – Pb (0,85), Cd (0,85) – Se (0,96) – <u>V (1,10)</u> – <u>Mn (1,63)</u> – <u>As (1,74)</u> – <u>Sr (2,70)</u>
5к	Se (0) – Cu (0,05), Rb (0,05) – Pb (0,07) – Zn (0,09) – Sr (0,15) – Cd (0,19) – V (0,26) – As (0,29) – Cr (0,30) – Mn (0,32) – Co (0,38) – Ni (0,48)	Se (0) – Cu (0,05), Pb (0,05) – Zn (0,09) – Rb (0,15), Cd (0,15) – Sr (0,26) – Mn (0,30) – Ni (0,32) – V (0,33) – Co (0,39) – Cr (0,42) – As (0,44)

Примечание. Подчеркнуты накапливающиеся в донных отложениях химические элементы.

Таблица 3 – Геохимические ряды донных отложений старичных пробных площадей, построенные с учетом среднего содержания химических элементов в донных отложениях контрольной пробной площади 5к на Саратовском водохранилище

Номер пробной площади	Геохимический ряд донных отложений	
	2021 год	2022 год
1	Mn (0,69) – Ni (0,89) – <u>Co (1,30)</u> – <u>Cd (1,40)</u> – <u>Cr (1,46)</u> – <u>V (1,56)</u> – <u>Sr (1,77)</u> , Pb (1,77) – <u>Rb (2,00)</u> – <u>Cu (2,62)</u> – <u>Zn (2,80)</u>	As (0,88) – <u>Mn (1,07)</u> – <u>Cr (1,15)</u> – <u>Co (1,26)</u> – <u>Ni (1,28)</u> – <u>Rb (1,40)</u> – <u>V (1,65)</u> – <u>Zn (1,72)</u> – <u>Cd (1,75)</u> – <u>Sr (2,44)</u> – <u>Cu (3,32)</u> – <u>Pb (8,66)</u>
2	Ni (0) – Co (0,96) – Mn (0,97), As (0,97) – <u>Cr (1,23)</u> – <u>Cd (2,2)</u> – <u>Rb (2,35)</u> – <u>V (2,78)</u> – <u>Sr (5,28)</u> – <u>Zn (5,34)</u> – <u>Cu (5,46)</u> – <u>Pb (5,62)</u>	As (0,90) – <u>Ni (1,01)</u> – <u>Co (1,33)</u> – <u>Cr (1,51)</u> – <u>Mn (1,80)</u> – <u>Sr (2,52)</u> – <u>Rb (2,97)</u> – <u>Cd (3,50)</u> – <u>V (3,63)</u> – <u>Zn (8,13)</u> – <u>Pb (9,52)</u> – <u>Cu (10,70)</u>
3	Ni (0,50) – <u>Mn (1,26)</u> – <u>Pb (1,51)</u> – <u>Co (1,79)</u> – <u>Cd (1,80)</u> – <u>Cr (2,13)</u> , As (2,13) – <u>V (2,18)</u> – <u>Sr (2,22)</u> – <u>Zn (2,48)</u> – <u>Cu (4,08)</u> – <u>Rb (4,09)</u>	<u>Co (1,64)</u> – <u>Cr (1,68)</u> – <u>Ni (1,84)</u> – <u>V (1,93)</u> – <u>Cd (2,25)</u> – <u>Zn (2,26)</u> – <u>Pb (2,31)</u> – <u>Rb (2,49)</u> – <u>Sr (2,52)</u> – <u>As (2,94)</u> – <u>Cu (4,68)</u> – <u>Mn (6,06)</u>
4	Ni (0,03) – <u>Co (1,53)</u> – <u>Cr (2,38)</u> – <u>V (4,26)</u> – <u>Rb (4,80)</u> – <u>Pb (4,85)</u> – <u>Zn (5,26)</u> – <u>As (6,00)</u> – <u>Cd (6,60)</u> – <u>Mn (7,22)</u> – <u>Cu (11,67)</u> – <u>Sr (14,68)</u>	<u>Co (1,06)</u> – <u>Cr (1,50)</u> – <u>Ni (1,58)</u> – <u>Rb (2,97)</u> – <u>V (3,38)</u> – <u>As (3,99)</u> – <u>Mn (5,45)</u> – <u>Zn (5,46)</u> – <u>Cd (5,75)</u> – <u>Cu (8,90)</u> – <u>Sr (10,47)</u> – <u>Pb (17,58)</u>

Примечание. Подчеркнуты накапливающиеся в донных отложениях химические элементы.

Представленные в таблице 3 геохимические ряды убедительно свидетельствуют в пользу того, что донные осадки изучаемой старицы р. Сок накапливают большинство химических элементов по сравнению с примыкающей к старице частью Саратовского водохранилища. Так, на ПП 1 аккумулируются все химические элементы, кроме Mn, Ni в 2021 г. и As в 2022 г. Величины Kc особенно значимы для Cu и Zn (2,62 и 2,80 соответственно) в 2021 г., для Sr, Cu и Pb (2,44–8,66) в 2022 г.

Те же элементы рассеиваются в донных отложениях ПП 2. В 2021 г. здесь активнее других накапливаются Cd, Rb, V, Sr, Zn, Cu и Pb (Kc от 2,2 до 5,62), в 2022 г. – Sr, Rb, Cd, V, Zn, Pb и Cu (Kc от 2,52 до 10,70). Особенно выражено концентрирование в донных осадках Zn, Pb, Cu.

На пробных площадях 3 и 4 в период 2021–2022 гг. аккумулировались все анализируемые тяжёлые металлы и металлоиды, за исключением Ni в 2021 г. На ПП 4 в 2022 г. превышение содержания Cu в донных отложениях относительно ПП 5к доходило до 11 раз, Sr – до 14 раз, Pb – до 17 раз.

Таким образом, коэффициенты концентрации, рассчитанные относительно показателей содержания тяжёлых металлов и металлоидов в донных отложениях контрольной площади 5к, достоверно указывают на то, что изучаемая старица р. Сок представляет собой аккумулятивную геохимическую и биогеохимическую систему с максимальными показателями концентрирования на пробной площади 4, расположенной за искусственной дамбой и практически лишенной проточности.

Заключение

Оценка временной и пространственной динамики накопления тяжёлых металлов и металлоидов в донных отложениях старицы р. Сок, расположенной в пределах Красноглинского района г. Самары, выявила особенности этого процесса. На пробных площадях 1–3 в старице, обладающих определенной проточностью, максимальное накопление большинства анализируемых тяжёлых металлов и металлоидов в донных отложениях отмечено в 2022 г. по сравнению с 2021 г. На пробной площади 4 элементы накапливались активнее в 2021 г. В контроле (пробная площадь 5к) примерно половина анализируемых элементов имела максимальные концентрации в 2021 г., другая половина – в 2022 г. Эти различия связаны с местоположением пробных площадей, миграционной способностью изучаемых элементов, характером весеннего паводка, антропогенным влиянием и степенью зарастания площадей макрофитами (*Typha angustifolia* L.).

Почвенный покров г. Самары оказывает слабое и умеренное влияние на количественные характеристики металлоаккумуляции в донных отложениях старицы. По сравнению с фоновым (контрольным) участком, донные отложения на пробных площадях в старице р. Сок характеризуются средней и высокой степенью аккумуляции тяжёлых металлов и металлоидов, подтверждая тезис о том, что не только замкнутые, но и слабопроточные старицы малых рек, испытывающие техногенное воздействие урбосреды, являются аккумулятивными геохимическими и биогеохимическими системами.

Список литературы:

1. MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.O. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2000. Vol. 39, iss. 1. P. 20–31. DOI: 10.1007/s002440010075.
2. Deckere E., Cooman W., Florus M., Devroede-Vander Linder M.P. Characterizing the sediments of Flemish Watercourses: a Manual produced by TRIAD. Brussel: AMINAL-Department Water, 2000. 110 p.
3. De Haas E.M., van Haaren R., Kraak M.H.S., Admiraal W. Analyzing the causes for the persistence of chironomids in polluted sediments // Archiv für Hydrobiologie. 2005. Vol. 162. P. 211–228. DOI: 10.1127/0003-9136/2005/0162-0211.
4. Зиганшин И.И. Донные отложения озёр Республики Татарстан: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23. Ярославль, 2005. 24 с.
5. Капитонова О.А., Шалавина В.С., Алтынцев А.В. Содержание тяжёлых металлов в макрофитах рыбохозяйственных прудов СГУП «Рыбхоз «Пихтовка» (Удмуртская республика) // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 1. С. 255–260.
6. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С. Особенности геохимии донных отложений речной сети полуострова Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 4, вып. 40. С. 23–36. DOI: 10.31431/1816-5524-2018-4-40-23-37.
7. Даувальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2012. 245 с.
8. Кулданбаев Н.К. Почвы и донные отложения как индикатор загрязнения территории (аналитический обзор) // Медицина Кыргызстана. 2010. № 8. С. 36–38.
9. Ершова Е.Ю. Тяжёлые металлы в донных отложениях Куйбышевского водохранилища // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 1. С. 59–65.
10. Alemdaroglu T., Onur E., Erkan F. Trace metal levels in surface sediments of Lake Manyas, Turkey and tributary rivers // International Journal of Environmental Studies. 2003. № 60. P. 287–298.
11. Новиков В.В., Пучков М.Ю., Зволинский В.П., Локтионова Е.Г. Пространственно-временная динамика распределения тяжёлых металлов в донных отложениях Волгоградского водохранилища // Фундаментальные исследования. 2013. № 6–2. С. 366–370.
12. Zeng H., Wu J. Heavy metal pollution of lakes along the mid-lower reaches of the Yangtze River in China: intensity, sources and spatial patterns // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2013. Vol. 10, iss. 3. P. 793–807. DOI: 10.3390/ijerph10030793.
13. Harikrishnan N., Ravisankar R., Suresh Gandhi M., Kanagasabapathy K.V., Prasad M.V.R., Satapathy K.K. Heavy metal assessment in sediments of east coast of Tamil Nadu using energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy // Radiation Protection and Environment. 2017. Vol. 40, iss. 1. P. 21–26. DOI: 10.4103/rpe.rpe_67_16.
14. Xu Y., Wu Y., Han J., Li P. The current status of heavy metal in lake sediments from China: pollution and ecological risk assessment // Ecological and Evolution. 2017. Vol. 7, iss. 14. P. 5454–5466. DOI: 10.1002/ece3.3124.
15. Томилина И.И., Гапеева М.В., Ложкина Р.А. Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волга по показателям токсичности и химического состава // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 107–127. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0015.
16. Томилина И.И., Ложкина Р.А., Гапеева М.В. Токсичность донных отложений Рыбинского водохранилища по многолетним данным биотестирования. Сооб-

щение 1. Токсикологические исследования // Биология внутренних вод. 2021. № 6. С. 640–650. DOI: 10.31857/s0320965221060188.

17. Особенности пресноводных экосистем малых рек Волжского бассейна / Т.Д. Зинченко [и др.]; под ред. Г.С. Розенберга, Т.Д. Зинченко. Тольятти: Кассандра, 2011. 322 с.

18. Романов И.Н., Макарова Ю.В., Прохорова Н.В. Эколого-биогеохимические особенности донных отложений и рогоза узколистного в условиях старицы реки Сок // Экология родного края: проблемы и пути их решения: мат-лы XVIII всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч. 24–25 апреля 2023 г., г. Киров. Кн. 1 / отв. ред.

Т.Я. Ашихмина. Киров: Вятский государственный университет, 2023. С. 185–190.

19. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: ИПК Издательство стандартов, 1980. 7 с.

20. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. М.: Центр исследования и контроля воды, 2005. 28 с.

21. Макарова Ю.В., Прохорова Н.В. Биогеохимия: практикум. Самара: Самарский университет, 2012. 84 с.

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<p>Прохорова Наталья Владимировна, доктор биологических наук, профессор кафедры экологии, ботаники и охраны природы; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (г. Самара, Российская Федерация). E-mail: natali.prokhorova.55@mail.ru.</p> <p>Макарова Юлия Владимировна, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии, ботаники и охраны природы; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (г. Самара, Российская Федерация). E-mail: aconithum@yandex.ru.</p> <p>Романов Илья Николаевич, аспирант кафедры экологии, ботаники и охраны природы; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (г. Самара, Российская Федерация). E-mail: ilya.romanov.eco@yandex.ru.</p> <p>Бугров Сергей Вячеславович, аспирант кафедры экологии, ботаники и охраны природы; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (г. Самара, Российская Федерация). E-mail: sergey25101993@mail.ru.</p>	<p>Prokhorova Nataliya Vladimirovna, doctor of biological sciences, professor of Ecology, Botany and Nature Protection Department; Samara National Research University (Samara, Russian Federation). E-mail: natali.prokhorova.55@mail.ru.</p> <p>Makarova Yulia Vladimirovna, candidate of biological sciences, associate professor of Ecology, Botany and Nature Protection Department; Samara National Research University (Samara, Russian Federation). E-mail: aconithum@yandex.ru.</p> <p>Romanov Ilya Nikolaevich, postgraduate student of Ecology, Botany and Nature Protection Department; Samara National Research University (Samara, Russian Federation). E-mail: ilya.romanov.eco@yandex.ru.</p> <p>Bugrov Sergey Vyacheslavovich, postgraduate student of Ecology, Botany and Nature Protection Department; Samara National Research University (Samara, Russian Federation). E-mail: sergey25101993@mail.ru.</p>

Для цитирования:

Прохорова Н.В., Макарова Ю.В., Романов И.Н., Бугров С.В. Динамика накопления тяжёлых металлов и металлоидов в донных отложениях старицы реки Сок // Самарский научный вестник. 2023. Т. 12, № 4. С. 93–99. DOI: 10.55355/snv2023124114.