



ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ РОГОЗОМ УЗКОЛИСТНЫМ (*TYPHA ANGUSTIFOLIA* L.) В СТАРИЦЕ РЕКИ СОК

© 2025

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

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

Аннотация. В статье представлен анализ динамики аккумуляции тяжёлых металлов (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb) и металлоидов (As, Se) в надземных и подземных органах рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.) в условиях слабопроточной старицы р. Сок, сформированной при создании Саратовского водохранилища. Изучаемая старица расположена в границах г. Самары, в её Красноглинском районе, где в период 2021–2022 гг. были проведены полевые исследования и отобраны образцы донных отложений и биомассы рогоза для последующего лабораторного изучения. Для полевых исследований было заложено четыре пробных площади в пределах изучаемой старицы; контролем служила пробная площадь, выделенная в прибрежной зоне Саратовского водохранилища в непосредственной близости от изучаемой старицы. Количественное определение содержания тяжёлых металлов и металлоидов в донных отложениях, корневищах с придаточными корнями, стеблях и листьях рогоза узколистного осуществляли методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Выявлены сезонные и пространственные различия в накоплении тяжёлых металлов и металлоидов рогозом узколистным. Большинство элементов активнее аккумулировалось в корневище с придаточными корнями (Cr, V, Co, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Rb) по сравнению со стеблями и листьями, в которых преобладали Mn, Sr. Практически не выявлялись используемым методом в растительных органах Ni и Se. Полученные данные свидетельствуют о том, что подземные органы *Typha angustifolia* L. являются биогеохимическим барьером для наиболее токсичных тяжёлых металлов и металлоидов в условиях техногенно загрязнённых слабопроточных пресноводных водоёмов.

Ключевые слова: тяжёлые металлы; металлоиды; коэффициент транслокации; макрофиты; рогоз узколистный; подземные органы; надземные органы; донные отложения; старица; река Сок; Саратовское водохранилище; город Самара.

FEATURES OF ACCUMULATION OF HEAVY METALS AND METALLOIDS BY NARROW-LEAVED CATTAIL (*TYPHA ANGUSTIFOLIA* L.) IN THE OXBOW LAKE OF THE SOK RIVER

© 2025

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

Samara National Research University (Samara, Russia)

Abstract. The article presents an analysis of the dynamics of accumulation of heavy metals (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb) and metalloids (As, Se) in the aboveground and underground organs of narrow-leaved cattail (*Typha angustifolia* L.) in the conditions of a slow-flowing oxbow lake of the Sok River, formed during the creation of the Saratov Reservoir. The studied oxbow lake is located within the borders of the city of Samara, in its Krasnoglinsky District, where in 2021–2022 field studies were conducted and samples of bottom sediments and narrow-leaved cattail biomass were collected for subsequent laboratory study. Four sample plots were established within the studied oxbow lake for the field studies; a sample plot allocated in the coastal zone of the Saratov Reservoir, in the immediate vicinity of the studied oxbow lake, served as a control. Heavy metals and metalloids were quantified in bottom sediments, rhizomes with adventitious roots, stems, and leaves of narrow-leaved cattail using inductively coupled plasma spectrometry. Seasonal and spatial differences in the accumulation of heavy metals and metalloids by narrow-leaved cattail were identified. Most elements were more actively accumulated in the rhizome with adventitious roots (Cr, V, Co, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Rb) compared to the stems and leaves, which were dominated by Mn and Sr. Ni and Se were practically not detected by the method used in the plant organs. The obtained data indicate that the underground organs of *Typha angustifolia* L. are a biogeochemical barrier for the most toxic heavy metals and metalloids in technogenically polluted low-flowing freshwater reservoirs.

Keywords: heavy metals; metalloids; translocation coefficient; macrophytes; narrow-leaved cattail; underground organs; aboveground organs; bottom sediments; oxbow; Sok River; Saratov Reservoir; Samara city.

Введение

Пресноводные наземные экосистемы представляют собой огромную ценность для биосферы и человека. Они являются сосредоточием большого объёма пресной воды, поддерживающей жизнеспособность существенной доли водного и материкового биоразнообразия нашей планеты, выступают в качестве местобита-

ния, участвуют в региональных и глобальном круговоротах воды, обеспечивают влагой прилегающие ландшафты, составляют основу водоснабжения для городов и иных поселений человека, аккумулируют огромные массы различных веществ [1, р. 268]. Это далеко не все функции пресноводных наземных экосистем, но и упущенных функций достаточно, чтобы показать актуальность их всестороннего изучения.

В современных условиях постоянной интенсификации добычи полезных ископаемых, активного роста промышленного и сельскохозяйственного производства, развития транспортных систем важнейшей задачей экологов становится оценка аккумулятивной способности пресноводных объектов по отношению к загрязнителям окружающей среды, в том числе тяжёлым металлам и металлоидам [2, р. 2]. Многочисленными исследованиями показано негативное влияние тяжёлых металлов и металлоидов на качество природных поверхностных вод и на пресноводные экосистемы в целом. Опасность полиметаллического загрязнения таких экосистем определяется его консервативностью, то есть неспособностью загрязнителей разлагаться в природных водах, но при этом менять форму присутствия, становиться более доступными для биоты и активно распространяться по трофическим цепям. Основными факторами, определяющими содержание, формы нахождения металлов и металлоидов в пресноводных объектах, являются природные особенности водотока и степень антропогенной нагрузки [3, с. 3, 8].

Для оценки качества воды, степени влияния загрязнения на компоненты водных экосистем, выявления источников загрязнения важна оценка пространственно-временного распределения металлов и металлоидов в таких экосистемах [4, р. 2; 5, с. 3].

Многими авторами подчёркивается важность региональных исследований процессов миграции и аккумуляции тяжёлых металлов и металлоидов в водных экосистемах. Установлена опасность полиметаллического загрязнения донных осадков, приводящего к их биомагнификации в пищевых цепях [1, р. 268; 6, р. 1–2; 7; 8, р. 332; 9, р. 2; 10, р. 2, 12, 15; 11, р. 3603]. Это связано с тем, что донные осадки поверхностных пресноводных объектов (рек, водохранилищ, озёр, прудов) выступают не только средой обитания для биоты, но и мощными аккумуляторами тяжёлых металлов и металлоидов [2, р. 2].

Живые организмы, использующие донные отложения как среду обитания, поглощают из них необходимые питательные вещества вместе с избытком металлов. В этом отношении интересны и важны водные растения-макрофиты, активно аккумулирующие загрязнители и передающие их растительноядным организмам. Это обстоятельство определяет важность макрофитов как объектов экологических исследований, являющихся основой для разработки стратегий очистки водоёмов от загрязнителей, в частности тяжёлых металлов и металлоидов. К одной из таких стратегий относится фиторемедиация [12, р. 221]. Макрофиты создают огромную биомассу, а их мощная корневая система и физиологические особенности позволяют играть ключевую роль в самоочищении воды и донных отложений. При этом следует учитывать и тот факт, что макрофиты при их массовом отмирании и разложении отмершей биомассы возвращают накопленные загрязнители назад в водную среду, способствуя её вторичному загрязнению, эвтрофикации. Поэтому специфика жизнедеятельности макрофитов значительно влияет на флористическое и фаунистическое разнообразие пресноводной экосистемы, определяя её общий экологический баланс [13, р. 71].

Эколого-биогеохимические исследования макрофитов показали, что их способность к аккумуляции тяжёлых металлов и металлоидов зависит как от биологических особенностей водного растения (вида, размера, возрастной структуры ценопопуляции, особенностей вегетационного сезона, принадлежности к определенной экологической группе), так и от природных и техногенных факторов среды обитания. В разных органах растений металлы накапливаются не одинаково, обычно максимальные их концентрации регистрируются в корнях [12, р. 221, 222; 14, р. 421; 15; 16, р. 3, 7, 11, 13–16; 17].

О фиторемедиации водных экосистем на основе использования макрофитов в последнее время много говорят и пишут, подчёркивая, что данная технология не требует высокочувствительного оборудования, доступна и экологически безопасна. Установлено, что особенно эффективно фиторемедиационную функцию выполняют водные растения-гипераккумуляторы тяжёлых металлов и металлоидов, характеризующиеся стрессоустойчивостью к полиметаллическому загрязнению окружающей среды. В разных природных зонах в этом качестве, например, выступают *Sagittaria sagittifolia* L., *Typha latifolia* L., *Ceratophyllum demersum* L., *Calla palustris* L., что требует осуществления региональных исследований в отношении способности макрофитов аккумулировать те или иные химические элементы-загрязнители [4, р. 1, 4, 5; 16, р. 15, 17; 17].

Целью настоящего исследования являлось изучение особенностей аккумуляции тяжёлых металлов и металлоидов в вегетативных органах рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.) в старице р. Сок, расположенной в Красноглинском районе г. Самары.

Материалы и методы исследования

Исследование проводили в пределах водоёма-старицы, образовавшегося на участке старого русла р. Сок при создании Саратовского водохранилища. Старица расположена ниже современного места впадения этой реки в водохранилище в Красноглинском районе г. Самары. Этот водный объект всё время своего существования подвергается сильному антропогенному воздействию. В свое время он был перекрыт самой верхней по течению дамбой, а позднее его частично перекрыли ещё двумя дамбами, расположенными ниже по течению. Последствия этих решений проявляются в значимой эколого-геохимической трансформации его компонентов. Расположение изучаемой старицы в урбосреде и, хотя и ограниченная, но постоянно существующая связь с Саратовским водохранилищем определяют её значимость как модельного натурального объекта для изучения динамики процессов аккумуляции тяжёлых металлов и металлоидов в биомассе рогоза узколистного.

В пределах старицы р. Сок были выделены 4 ключевых участка (пробные площади 1–4), различающихся по экологическим и гидрологическим условиям, а также контрольная пробная площадь 5к за пределами старицы в прибрежной зоне Саратовского водохранилища (рис. 1). Местоположение изучаемых пробных площадей можно представить следующим образом. Пробная площадь 1 (ПП1) располагается на стыке старицы и воложки, протекающей между островами Серный и Электрон. Для неё характерно смешение старичных вод с водами Саратовского водохранилища. Пробная площадь 2 (ПП2) прилегает к нижней по течению дамбе рядом с лодочной станцией. Для пробной площади 3 (ПП3) характерно местоположение возле о. Серный, внутренний берег которого является берегом старицы. Пробная площадь 4 (ПП4) расположена в 15 м от протоки, под мостом, и большую часть вегетационного сезона она остаётся почти непроточной из-за активного разрастания популяции рогоза узколистного и высокого уровня дна протоки под мостом. Для контрольной пробной площади (ПП5к) выбран прибрежный участок вне старицы, примыкающий к Красноглинскому пляжу в Саратовском водохранилище. На всех пробных площадях, включая контрольную пробную площадь, произрастают крупные популяции рогоза узколистного.

Обогащение экосистемы старицы тяжёлыми металлами и металлоидами осуществляется как от природных источников (почвы, атмосферные осадки, локальный, региональный и глобальный атмосферный перенос), так и от техногенных источников. В сложившихся условиях техногенное привнесение тяжёлых металлов и металлоидов в старицу преобладает, его можно связать со следующими источниками: автогазозаправочная станция и карьер по добыче песка (северная часть старицы); дп. Горный (расположен на о. Серный); дачные массивы и жилые поселения – СДНТ «Утёс», СНТ «Энергетик», СТ «Энергетик-2», СДТ «Жилая Самара» и п. 41-й километр (располагаются на континентальном берегу старицы); АЗС «Роснефть» и гостиничный комплекс «Золотая рыбка» (континентальный берег); лодочная станция (расположена в устье старицы); предприятие АО «ГК "Электроцит" – ТМ Самара» (опосредованное влияние).

В октябре 2021 и 2022 гг. параллельно с отбором донных отложений на каждой пробной площади были отобраны вегетативные органы рогоза узколистного (корневище с придаточными корнями, стебель, листья), которые были очищены от компонентов донных отложений, высушены и подготовлены к многоэлементному анализу. Количественное определение концентрации тяжёлых металлов (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb) и металлоидов (As, Se) в органах растений осуществляли методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [18].



Рисунок 1 – Местоположение изучаемых пробных площадей в старице р. Сок и в прибрежной зоне Саратовского водохранилища

Результаты исследования и их обсуждение

Основной путь поступления тяжёлых металлов и металлоидов в подземные и надземные органы рогоза узколистного связан с субстратом – донными отложениями. Особенности накопления анализируемых элементов в донных отложениях старицы р. Сок были выявлены нами ранее и в самом общем виде могут быть охарактеризованы следующим образом. Максимальное накопление большинства элементов было обнаружено в донных отложениях пробных площадей 1–3 в 2022 г., тогда как на пробной площади 4 они активнее аккумулировались в 2021 г. В донных отложениях контрольной пробной площади 5к V, Cr, As, Rb, Sr в более высоких концентрациях накапливались в 2022 г., остальные элементы – в 2021 г. Выявленная временная и пространственная динамика металлоаккумуляции в донных отложениях определяется местоположением пробных площадей, степенью их проточности, миграционной способностью элементов, интенсивностью весеннего паводка, особенностями развития макрофитов на этих пробных площадях и проявлением на каждой из них техногенеза. Показано, что для донных отложений в старице р. Сок в целом характерны более высокие концентрации анализируемых элементов, чем в контроле (Саратовское водохранилище в пределах г. Самары). Это позволяет заключить, что не только замкнутые, но и слабопроточные старицы малых рек, испытывающие загрязняющее влияние урбосреды, представляют собой аккумулятивные геохимические системы.

В этой связи большой интерес вызывает изучение процессов фитоаккумуляции тяжёлых металлов и металлоидов в подобных геохимических системах доминирующими видами макрофитов. Это важно для оценки способности водоёмов к самоочищению, а также использования макрофитов в технологиях фиторемедиации пресноводных экосистем.

В исследуемой старице р. Сок и на контрольной пробной площади доминирующим макрофитом является рогоз узколистный. Для Самарской области эколого-биогеохимические особенности макрофитов на примере рогоза узколистного изучались впервые, поэтому актуальным является сравнение его металлоаккумулирующей способности с таковой для травянистых растений региона (табл. 1).

Таблица 1 – Среднее содержание тяжёлых металлов и металлоидов в надземных и подземных органах *Typha angustifolia* L. в зависимости от условий произрастания в 2021–2022 гг., мг/кг воздушно-сухой массы

Элемент	Год	Старица р. Сок		Саратовское водохранилище		Региональный фон для трав [19, с. 151]
		подземные органы	надземные органы	подземные органы	надземные органы	
Mn	2021	412,58	584,8	701,38	630,08	99,88
	2022	50,19	52,64	33,45	58,21	
Cr	2021	3,52	1,09	0,7	1,07	8,17
	2022	3,69	0,32	3,26	0,16	
V	2021	10,63	1,04	6,01	1,11	23,7
	2022	7,8	1,41	4,26	1,26	
Co	2021	2,62	0,02	9,58	0,07	6,83
	2022	1,46	0,08	1,32	0,09	
Ni	2021	0	0	0	0	7,94
	2022	0,46	0	0	0	
Cu	2021	6,13	0,34	3,13	0	27
	2022	2,67	0,02	0,19	0	
Zn	2021	37,15	10,66	20	11,53	39,28
	2022	24,09	6,62	8,11	6,95	
As	2021	6,81	0,38	20,24	0,23	0,65
	2022	3,18	0,33	5,12	0,7	
Pb	2021	4,09	0,23	0,88	0,14	1,04
	2022	2,17	0,07	0,43	0,08	
Cd	2021	0,14	0,01	0,12	0,005	0,63
	2022	0,09	0,007	0,03	0,01	
Se	2021	0,01	0,09	0	0	0,52
	2022	0	0	0	0	
Sr	2021	48,33	52,15	67,88	29,53	35,49
	2022	46,26	80,86	35,3	82,71	
Rb	2021	1,1	0,29	1,22	1,77	10,56
	2022	2,41	0,72	3,33	1,91	

Анализ данных таблицы 1 показал, что в старице р. Сок и на контрольном участке Саратовского водохранилища большинство анализируемых элементов (Cr, V, Co, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Rb) активнее накапливалось рогозом в подземных органах (корневище с придаточными корнями); в надземных органах (стебель с листьями) были выявлены более высокие концентрации Mn и Sr, за исключением контрольного варианта в 2021 г. Практически не аккумулировались растениями Ni и Se. В надземных органах рогоза узколистного из Саратовского водохранилища не была выявлена Cu. Следует также отметить особенности в накоплении рогозом Mn: его концентрация в фитомассе на порядок выше в 2021 г. по сравнению с 2022 г. и в 1,5–2,0 раза больше максимально возможных нормальных концентраций Mn, установленных по мировым данным для травянистых растений [20, с. 92]. При этом в 2021 г. в донных отложениях высокая концентрация Mn наблюдалась только на пробной площади 4.

Сравнение полученных данных по рогозу с региональными фоновыми концентрациями анализируемых элементов для травянистых растений Самарской области показало, что в 2021 г. для надземных органов рогоза превышение фона было выявлено только по Mn и Sr из старицы р. Сок и по Mn из Саратовского водохранилища. В 2022 г. превышения фоновых концентраций в надземных органах установлены для Sr в старице р. Сок, для Sr и As в Саратовском водохранилище. Поскольку региональные фоновые концентрации были получены для надземных органов травянистых растений, сравнивать их с показателями для подземных органов не вполне корректно.

Анализ количественных данных 2021 г. о содержании тяжёлых металлов и металлоидов в органах рогоза узколистного на пробных площадях в старице р. Сок (ПП1–ПП4) и на контрольной пробной площади на участке Саратовского водохранилища (ПП5к) показал общую закономерность для V, Co, Cu, As, Pb, Cd, максимальные концентрации которых выявлены в корневище с придаточными корнями (табл. 2). Для Mn максимальные концентрации установлены для листьев на пробных площадях 2–5 и для подземных органов на пробной площади 1. Такие элементы, как Cr, Sr, Rb, в основном максимально накапливались в подземных органах рогоза и только на одной из пробных площадей – ПП5к – в стебле. Не выявлен используемым методом в органах растения Ni; Se в малых концентрациях определялся в подземных органах на пробной площади 1 и в листьях на пробной площади 3 (табл. 1 и 2).

Анализ данных 2022 г. показал сходную зависимость: большая часть химических элементов (Cr, V, Co, As, Pb, Cd, Rb) в максимальных концентрациях накапливалась корневищем с придаточными корнями рогоза на всех пробных площадях, включая контрольную (табл. 3). Никель был выявлен в подземных органах растения только на пробных площадях 1 и 3 в старице р. Сок. Селен в растениях рогоза не обнаружен.

Полученные данные позволяют заключить, что подземные органы (корневище с придаточными корнями) являются выраженным биогеохимическим барьером на пути поступления тяжёлых металлов и металлоидов из донных отложений и воды в надземные органы *Typha angustifolia* L. Этот вывод подтверждают и усреднённые данные таблиц 1–3, а также литературные обзорные данные по большой группе дикорастущих и культурных цветковых растений [20, с. 89; 21, с. 29–31, 33, 34; 22, р. 96–118].

Таблица 2 – Особенности максимального накопления тяжёлых металлов и металлоидов в органах *Typha angustifolia* L. в старице р. Сок и на участке Саратовского водохранилища в 2021 г.

Элемент	Орган(-ы)	Пробные площади	Max, мг/кг
Mn	корневище с корнями	ПП1	701,38
	листья	ПП2–ПП5к	1883,98
Cr	корневище с корнями	ПП1–ПП4	5,30
	листья	ПП5к	2,14
V	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	15,10
Co	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	9,58
Ni	–	–	–
Cu	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	10,19
Zn	корневище с корнями	ПП1–ПП3, ПП5к	63,41
	листья	ПП4	15,57
As	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	20,24
Pb	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	9,80
Cd	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	0,22
Se	корневище с корнями	ПП1	0,04
	листья	ПП3	0,75
Sr	корневище с корнями	ПП1, ПП2, ПП5к	67,88
	стебель	ПП4	66,58
	листья	ПП3	60,98
Rb	корневище с корнями	ПП1–ПП4	1,92
	стебель	ПП5к	2,62

Таблица 3 – Особенности максимального накопления тяжёлых металлов и металлоидов в органах *Typha angustifolia* L. в старице р. Сок и на участке Саратовского водохранилища в 2022 г.

Элемент	Орган(-ы)	Пробные площади	Max, мг/кг
Mn	корневище с корнями	ПП4	96,69
	листья	ПП1–ПП3, ПП5к	92,58
Cr	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	5,09
V	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	11,52
Co	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	2,06
Ni	корневище с корнями	ПП1, ПП3	1,38
Cu	корневище с корнями	ПП1–ПП3, ПП5к	5,71
Zn	корневище с корнями	ПП1–ПП4	41,11
	листья	ПП5к	12,61
As	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	7,25
Pb	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	5,63
Cd	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	0,14
Se	–	–	–
Sr	стебель	ПП2–ПП4	123,00
	листья	ПП1, ПП5к	102,70
Rb	корневище с корнями	ПП1–ПП5к	4,07

Корреляционный анализ показал, что средняя и высокая корреляция между содержанием элементов в донных отложениях и подземных органах рогоза характерна для Cr, Co, Pb, Sr (r от 0,53 до 0,75) в 2021 г., для Mn, Co, Ni, Cu, Zn (r от 0,52 до 0,78) в 2022 г. Для остальных анализируемых элементов оба периода исследований значимых корреляций не обнаружили. Данные корреляционного анализа свидетельствуют о том, что в разные вегетационные сезоны разные химические элементы проявляют высокую зависимость накопления в органах рогоза от содержания в донных отложениях. Исключением является Co, который проявлял высокую корреляционную связь накопления в подземных органах растения с его содержанием в донных отложениях вне зависимости от условий вегетационного сезона.

Максимальные показатели содержания Mn в подземных органах и листьях рогоза в 2021 г. в 2–6 раз превосходили максимальный показатель нормы содержания этого элемента в цветковых растениях (20,0–300,0 мг/кг). Содержание Cr, V, Co было на порядок выше максимального предела нормы (0,1–0,5; 0,2–1,5; 0,02–1,00 мг/кг соответственно). Такие элементы, как Cu, Zn, Pb, Cd, Sr укладывались в пределы нормального своего содержания (5,0–30,0; 27,0–150,0; 5,0–10,0; 0,05–0,20; 10,0–1500,0 мг/кг соответственно). Содержание Se в подземных органах рогоза узколистного находилось в пределах нормы, а в листьях – в 3 раза превосходило её (0,03–0,21 мг/кг). Максимальное содержание As на два порядка превышало норму (0,28–0,33 мг/кг), а содержание Rb было на порядок ниже нормы (20,0–70,0 мг/кг).

Максимальные показатели содержания тяжёлых металлов и металлоидов в органах рогоза в 2022 г. имели определенное сходство с показателями 2021 г. Содержание Mn, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Sr в корневище, корнях и листьях вполне укладывалось в соответствующие пределы нормы. Максимальное содержание Cr, V, As было на порядок выше нормальных показателей, а содержание Rb – на порядок ниже. Se не был обнаружен в органах рогоза на всех пробных площадях.

Пределы нормального содержания изучаемых элементов взяты из работ А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас (1989 г.) [20], Р. Баргальи (2005 г.) [21] и уточнены по работе А. Kabata-Pendias (2011 г.) [22].

Оценить перенос тяжёлых металлов и металлоидов из донных отложений в подземные органы растения и из подземных органов в надземные органы позволяет коэффициент транслокации (Ктр). Его значение больше единицы будет свидетельствовать о концентрировании элемента в растительном органе или органах.

Анализ коэффициентов транслокации тяжёлых металлов и металлоидов, отражающих особенности их накопления в подземных органах рогоза узколистного на изучаемых пробных площадях в 2021 г., показал следующее (рис. 2).

На пробной площади 4 корневище с корнями активно аккумулировало только As (Ктр = 2,43); именно на этой пробной площади содержание большинства анализируемых элементов в донных отложениях было самым низким. На пробных площадях 1 и 2 выявлена аккумуляция разной степени интенсивности Mn, Co, Cu, Zn, As, Sr, Cd, Pb. Те же химические элементы, за исключением Co, аккумулировались в подземных органах рогоза из донных отложений на пробной площади 3, но их коэффициенты транслокации были ниже. На контрольной пробной площади 5к в Саратовском водохранилище активно аккумулировались Mn, Co, Cu, Zn, Rb и, особенно, As (Ктр = 30), содержание которого в донных отложениях этой пробной площади было на два порядка ниже, чем в подземных органах растения.

Таким образом подземные органы рогоза в 2021 г. крайне слабо поглощали из субстрата V, Cr и совсем не переносили Ni и Se. При этом в донных отложениях Ni был выявлен в диапазоне от 0,3 до 11,4 мг/кг, Se обнаружен только на двух пробных площадях – третьей (0,06 мг/кг) и четвёртой (0,72 мг/кг).

В 2022 г. в донных отложениях на всех пробных площадях выявили Ni (от 7,60 до 14,03 мг/кг) и на двух пробных площадях Se (ПП3 – 0,08 мг/кг, ПП4 – 0,26 мг/кг), но в подземных органах рогоза узколистного эти элементы в районе проведения исследования практически не были обнаружены.

Анализ транслокации химических элементов из донных отложений в подземные органы растения показал, что на пробных площадях 2 и 4 в подземной фитомассе изучаемые элементы накапливались в концентрациях, существенно уступающих их содержанию в донных отложениях ($K_{тр} < 1$). На пробной площади 1 переносились в растения Zn, As, Sr, Cd ($K_{тр}$ от 1,71 до 2,15). На пробной площади 3 – As и Sr ($K_{тр}$ 2,4 и 2,3 соответственно). На контрольной пробной площади 5к еще более активно аккумулировались As и Sr ($K_{тр}$ 5,02 и 3,61 соответственно), а также Rb ($K_{тр} = 2,23$) (рис. 3).

Для оценки барьерной функции корневища с придаточными корнями рогоза узколистного мы анализировали коэффициенты транслокации изучаемых элементов, отражающие их переход из подземных органов в стебель. В 2021 г. в стебле, как и в подземных органах, рогоза не выявлялись Ni и Se; содержание Cu также находилось ниже предела определения методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (рис. 4). Слабо переходил из подземной фитомассы в стебель Sr на третьей ($K_{тр} = 1,02$) и четвертой ($K_{тр} = 1,67$) пробных площадях. Сравнительно активнее накапливался Rb на контрольной пробной площади 5к ($K_{тр} = 2,15$). Для всех остальных анализируемых элементов (V, Cr, Mn, Co, Zn, As, Cd, Pb) подземные органы рогоза в старице р. Сок и в Саратовском водохранилище были выраженным биогеохимическим барьером, не пропускающим их излишки в стебель.

В 2022 г. подземные органы рогоза узколистного сохранили свою барьерную функцию в отношении металлоида As, большинства тяжелых металлов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) и, кроме того, проявили её в отношении металла Rb на всех изучаемых пробных площадях (рис. 5).

К числу мобильных элементов на обследуемых пробных площадях, включая контрольную, по-прежнему относился Sr: его $K_{тр}$ изменялся от 1,21 единицы на пробной площади 3 до 4,43 единиц на пробной площади 4. Низкую степень мобильности проявлял Mn на пробной площади 1 ($K_{тр} = 1,11$). Элементы Ni, Cu и Se в стебле растений выявлены не были.

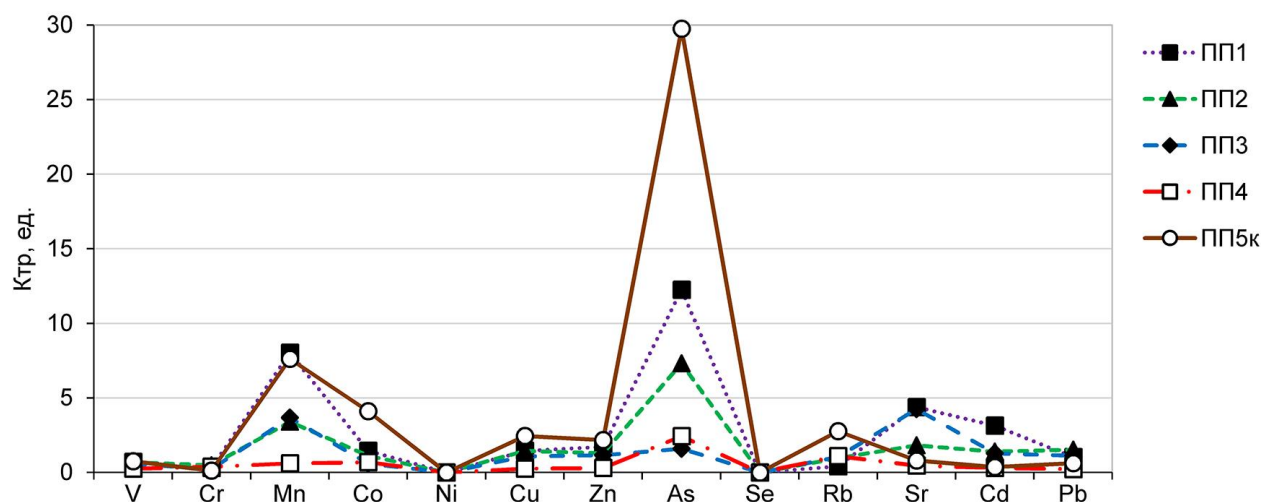


Рисунок 2 – Коэффициенты транслокации, отражающие переход тяжелых металлов и металлоидов из донных отложений в подземные органы *Typha angustifolia* L. на изучаемых пробных площадях в 2021 г.

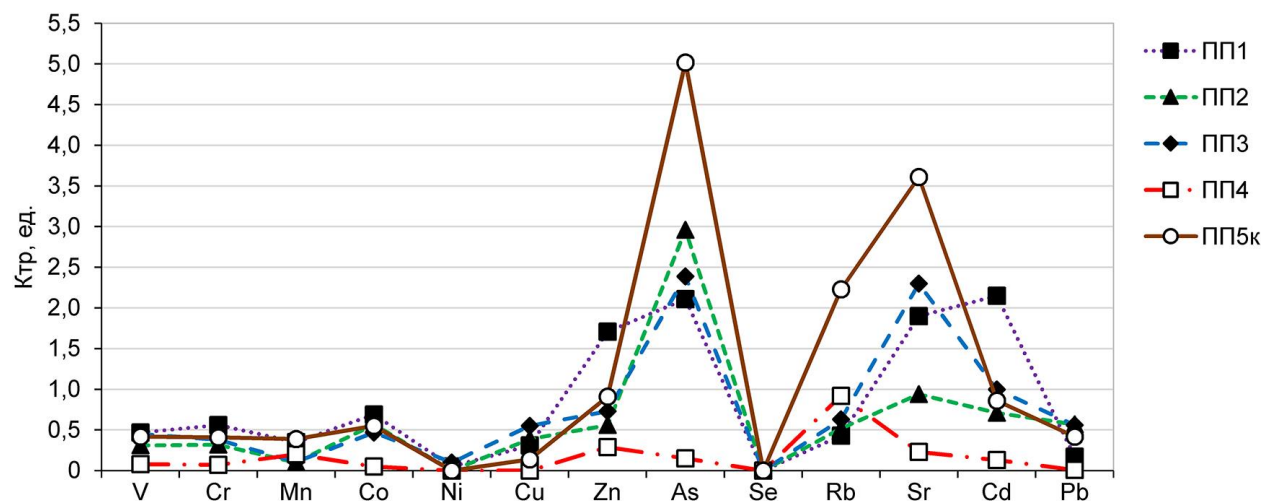


Рисунок 3 – Коэффициенты транслокации, отражающие переход тяжелых металлов и металлоидов из донных отложений в подземные органы *Typha angustifolia* L. на изучаемых пробных площадях в 2022 г.

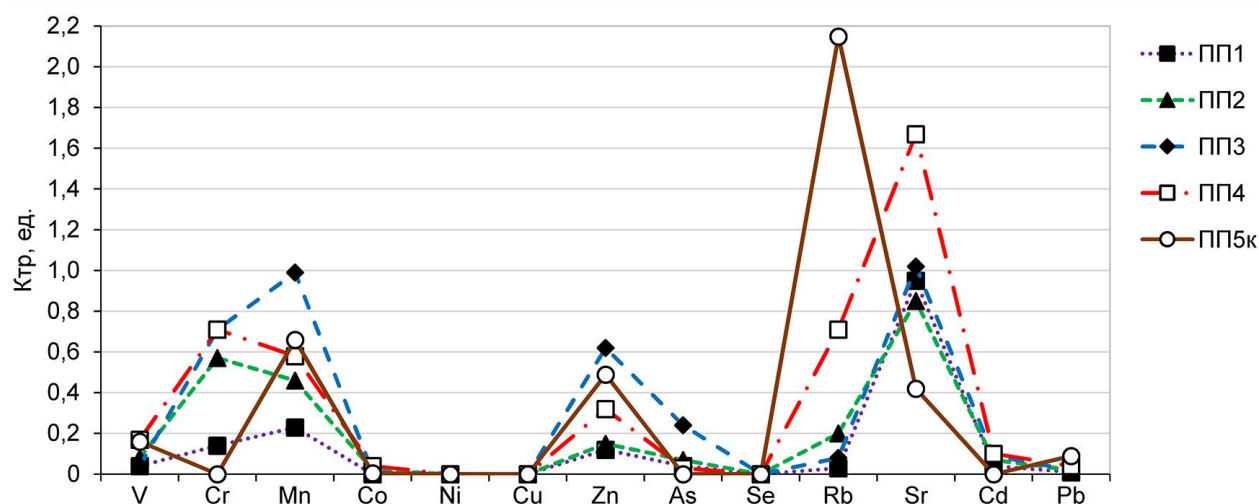


Рисунок 4 – Коэффициенты транслокации, отражающие переход тяжёлых металлов и металлоидов из подземных органов в стебель *Typha angustifolia* L. на изучаемых пробных площадях в 2021 г.

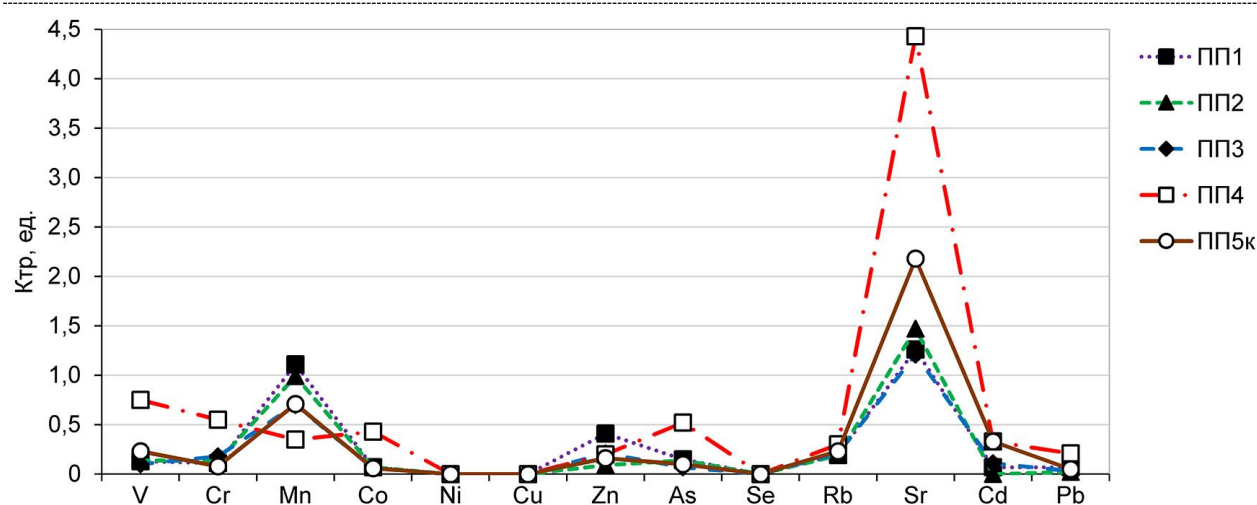


Рисунок 5 – Коэффициенты транслокации, отражающие переход тяжёлых металлов и металлоидов из подземных органов в стебель *Typha angustifolia* L. на изучаемых пробных площадях в 2022 г.

Заключение

В донных отложениях старицы р. Сок в Красноглинском районе г. Самары максимальное содержание большинства анализируемых элементов было установлено на пробных площадях 1–3 в 2022 г., на пробной площади 4 – в 2021 г. Донные отложения на контрольной пробной площади в Саратовском водохранилище, примыкающей к Красноглинскому пляжу, в более высоких концентрациях накапливали Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd и Se в 2021 г., остальные элементы (Cr, V, As, Sr, Rb) – в 2022 г. Сравнительный анализ показал, что донные отложения в старице р. Сок в целом активнее концентрируют тяжёлые металлы и металлоиды, чем на участке Саратовского водохранилища. А значит, изучаемая старица является аккумулятивной геохимической системой.

На этом фоне вследствие обобщения данных за период 2021–2022 гг. следует говорить о более высоких концентрациях Cr, V, Co, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Rb в подземных органах (корневище с придаточными корнями) и Mn, Sr в надземных органах (стебель с листьями) у *Typha angustifolia* L., произрастающего в старице р. Сок и Саратовском водохранилище. Практически не выявлялись методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в растительных органах Ni и Se. В органах растений из Саратовского водохранилища не была обнаружена Cu. Концентрация Mn в подземной и надземной вегетативной массе рогоза была на порядок выше в 2021 г. по сравнению с 2022 г. и в 1,5–2,0 раза превышала максимально возможную нормальную концентрацию для травянистых растений мира.

Среднее содержание Mn и Sr в надземных органах рогоза узколистного в старице р. Сок, а также Mn в надземных органах рогоза на участке Саратовского водохранилища в 2021 г. превышало региональные фоновые значения, установленные для трав на территории Самарской области. В 2022 г. к числу таких химических элементов относились Sr у растений в старице и Sr, As у растений в Саратовском водохранилище.

Анализ содержания тяжёлых металлов и металлоидов в органах рогоза узколистного на каждой отдельно взятой пробной площади показал, что большинство элементов активнее накапливаются в корневище с придаточными корнями (V, Co, Cu, As, Pb, Cd – в 2021 г.; Cr, V, Co, As, Pb, Cd, Rb – в 2022 г.). Это было подтверждено анализом коэффициентов транслокации, которые отличались высокими значениями ($K_{тр} > 1$) для системы «подземные органы / донные отложения» и более низкими значениями для системы «стебель / под-

земные органы». Практически не выявлены в растительных органах Ni и Se; в стебле рогоза с контрольной пробной площади не выявлена Cu. Полученные данные позволяют заключить, что подземные органы *Typha angustifolia* L. является выраженным биогеохимическим барьером на пути поступления тяжёлых металлов и металлоидов из воды и донных отложений в его надземные органы.

Рогоз узколистный в старице р. Сок, донные отложения которой заметно загрязнены тяжёлыми металлами и металлоидами, не проявил себя как их суперконцентратор. Способность этого растительного вида относительно активно аккумулировать большинство изучаемых элементов в подземных органах и не передавать их избыток в надземные органы указывает на его участие в естественных процессах самоочищения водоёмов от избытка тяжёлых металлов и металлоидов. Возможность использования данного макрофита в технологиях фиторемедиации пресноводных экосистем требует дальнейших исследований.

Список источников:

1. Sharma M., Kant R., Sharma A.K. Exploring the impact of heavy metals toxicity in the aquatic ecosystem // International Journal of Energy and Water Resources. 2025. Vol. 9. P. 267–280. DOI: 10.1007/s42108-024-00284-1.
2. Feng W., Tao Y., Liu M., Deng Y., Yang F., Liao H., Li T., Song F., Ngien S.K. Distribution and risk assessment of nutrients and heavy metals from sediments in the world-class water transfer projects // Environmental Sciences Europe. 2024. Vol. 36. P. 1–15. DOI: 10.1186/s12302-024-00970-1.
3. Шулькин В.М. Тяжёлые металлы в речных и прибрежно-морских экосистемах: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.36. Владивосток, 2007. 38 с.
4. Parida T., Riyazuddin Sh., Kolli S.K., Chakraborty A., Srinivas N., Kundu P., Bhattacharya S., Seth Ch.Sh., Biswas J.K. Phytoremediation of heavy metal(loid)s with integral involvement of the endogenous metal-chelators: present state-of-the-art and future prospect // Discover Environment. 2024. Vol. 2. P. 1–15. DOI: 10.1007/s44274-024-00170-x.
5. Папина Т.С. Эколого-аналитическое исследование распределения тяжёлых металлов в водных экосистемах бассейна р. Обь: автореф. дис. ... д-ра хим. наук: 03.00.16, 02.00.02. М., 2004. 43 с.
6. Khan K., Younas M., Yaseen M., Sher H., Maryam A., Ibrahim S.M., Adnan A., Ali A., Fawad M., Khan A.Z., Khan N., Shah I.A. Heavy metals pollution in riverine sediments: distribution, source, and environmental implications // Environmental Monitoring and Assessment. 2025. Vol. 197. P. 1–15. DOI: 10.1007/s10661-025-13623-4.
7. Zhang J., Yang T., Wang N., Luo X., Li H., Liao Y. Health risk assessment of heavy metals in wild fish and seasonal variation and source identification of heavy metals in sediments: a case study of typical urban river in Xi'an, China // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. P. 8898–8916. DOI: 10.1007/s11356-023-31693-0.
8. Tereshchenko N.N., Chuzhikova-Proskurnina O.D., Proskurnin V.Yu., Hiep N.T. Heavy metals and metalloids in water and bottom sediments in the rivers in the Can Gio Biospheric Reserve, Vietnam // Water Resources. 2023. Vol. 50. P. 330–343. DOI: 10.1134/s009780782302015x.
9. Okafor V.N., Omokpariola D.O., Tabugbo B.I., Okoliko G.F. Ecological and health risk assessments of heavy metals in surface water sediments from Ifite Ogwari community in Southeastern Nigeria // Discover Environment. 2024. Vol. 2. P. 1–16. DOI: 10.1007/s44274-024-00098-2.
10. Nagarajan A., Dharmalingam S.N., Jeyasingh V., Jayaseelan Ch., Vijayaprabakaran K. Heavy metals in core sediments from the western Bay of Bengal: implications on historical pollution, eco-environmental risks, and potential sources // Anthropocene Coasts. 2024. Vol. 7. P. 1–19. DOI: 10.1007/s44218-024-00056-8.
11. Kudryavtseva V.A., Popova T.A., Shigaeva T.D. Influence of seasonal and anthropogenic factors on changes in concentrations of heavy metals in urban water systems // Russian Journal of General Chemistry. 2024. Vol. 94. P. 3602–3610. DOI: 10.1134/s1070363224130218.
12. Bharti S.K., Kumar N., More N.S. Translocations of heavy metals in aquatic macrophytes naturally grown in the riverine ecosystem // Aquatic Macrophytes: Ecology, Functions and Services / ed. by S. Kumar, K. Bauddh, R. Singh, N. Kumar, R. Kumar. Singapore: Springer, 2023. P. 221–235. DOI: 10.1007/978-981-99-3822-3_11.
13. Rawat V., Singh A.K. Environmental and ecological importance of Indian aquatic macrophytes // Aquatic Macrophytes: Ecology, Functions and Services / ed. by S. Kumar, K. Bauddh, R. Singh, N. Kumar, R. Kumar. Singapore: Springer, 2023. P. 71–83. DOI: 10.1007/978-981-99-3822-3_4.
14. Zhukovskaya N., Kavalchik N., Vlasov B. Environmental effect on metals accumulation in aquatic plants of Belarusian lakes and rivers // Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. 4th ed. Cham: Springer, 2024. P. 419–421. DOI: 10.1007/978-3-031-51904-8_92.
15. Mahdavian K. Evaluating the ability of mangrove plants in the Asalouyeh Region for heavy metals removal // Russian Journal of Plant Physiology. 2023. Vol. 70. DOI: 10.1134/s1021443723600198.
16. Nadi A.R., Mohamed E., Kasem A.M.M.A., Ghanem A.E.-M.F.M., Badry M.O. Green solutions for heavy metal pollution in the aquatic environment of the Nile Islands: Cues from some submerged and emergent macrophytes // Water, Air, & Soil Pollution. 2025. Vol. 236. P. 1–21. DOI: 10.1007/s11270-025-07966-4.
17. Petrov D.S., Korotaeva A.E., Pashkevich M.A., Chukaeva M.A. Assessment of heavy metal accumulation potential of aquatic plants for bioindication and bioremediation of aquatic environment // Environmental Monitoring and Assessment. 2022. Vol. 195. DOI: 10.1007/s10661-022-10750-0.
18. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твёрдых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. М.: Центр исследования и контроля воды, 2005. 28 с.

19. Прохорова Н.В. Экологические принципы биогеохимического анализа ландшафтов лесостепного и степного Поволжья: дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.16. Самара, 2005. 496 с.

20. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / пер. с англ. Д.В. Гричука, Е.П. Янина; под ред. Ю.Е. Саета. М.: Мир, 1989. 439 с.

21. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений. Экофизиологический подход к биомониторингу и биовосстановлению / пер. с англ. И.Н. Михайловой. М.: Геос, 2005. 457 с.

22. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th edition. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2011. 533 p.

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

Для цитирования:

Прохорова Н.В., Макарова Ю.В., Романов И.Н. Особенности аккумуляции тяжёлых металлов и металлоидов рогозом узколистным (*Typha angustifolia* L.) в старице реки Сок // Самарский научный вестник. 2025. Т. 14, № 4. С. 39–48. DOI: 10.55355/snv2025144104.