

Научная статья

УДК 631.45

DOI: 10.18384/2712-7621-2024-1-55-69

ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА – РАСТЕНИЯ» ПОЙМЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ Г. КРАСНОЯРСКА

Орбан Е. С.¹, Шарафутдинов Р. А.²

¹ Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79, Российская Федерация;
E-mail: liz.orban@mail.ru; ORCID: 0009-0004-7471-5823

² Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79, Российская Федерация;
E-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru; ORCID: 0000-0002-0282-9133

Поступила в редакцию 18.07.2023

После доработки 03.11.2023

Принята к публикации 15.12.2023

Аннотация

Цель. Выявить особенности распределения химических элементов в системе «почва – растения» пойменных ландшафтов крупного промышленного г. Красноярск.

Процедура и методы. В образцах почв и растений методом атомно-эмиссионного спектрального анализа с индуктивно-связанной плазмой было установлено валовое содержание химических элементов¹. Для полученных результатов был рассчитан коэффициент накопления, показывающий характер внутреннего перераспределения химических элементов в системе «почва – растение», составлены ряды биологического накопления для 12 участков, расположенных в пределах низкой поймы р. Енисей г. Красноярск.

Результаты. Проведён эколого-геохимический анализ пойменных ландшафтов г. Красноярск. Определены основные закономерности распределения химических элементов в растительном и почвенном покровах, оценён вклад экзогенного поступления элементов. Выявлена гипераккумуляция Hg, Mn, Mo, S, Se, Zn представителями рода *Salix*. Отмечено, что S вносит наиболее значимый вклад в загрязнение почв и растительности пойменных ландшафтов.

Теоретическая и/или практическая значимость. Выявлено количественное соотношение химических элементов, определяющих уровень техногенной нагрузки, стабильности функционирования экосистем, отражены значимость сохранения и роль пойменных ландшафтов в городской среде. Полученная информация важна для принятия возможных управленческих решений при планировании хозяйственной деятельности в пределах пойменных ландшафтов урбанизированной территории.

Ключевые слова: биологическое накопление, пойменные почвы, техногенное загрязнение, тяжёлые металлы, урбанизированные территории

© СС ВУ Орбан Е. С., Шарафутдинов Р. А., 2024.

¹ Цветков Г. М. Количественный химический анализ почв: Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Центр Исследования и Контроля Воды. М. 1998. С. 31. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98.

Original Research Article

CHEMICAL ELEMENTS IN THE «SOIL – PLANTS» SYSTEM OF FLOODPLAIN LANDSCAPES IN THE CITY OF KRASNOYARSK

E. Orban¹, R. Sharafutdinov²

¹ Siberian Federal University,

pr. Svobodny 79, Krasnoyarsk 660041, Russian Federation;

E-mail: liz.orban@mail.ru; ORCID: 0009-0004-7471-5823

² Siberian Federal University,

pr. Svobodny 79, Krasnoyarsk 660041, Russian Federation;

E-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru; ORCID: 0000-0002-0282-9133

Received 18.07.2023

Revised 03.11.2023

Accepted 15.12.2023

Abstract

Aim. Identification of the distribution of chemical elements in the system «soil–plants» floodplain landscapes of the large industrial city of Krasnoyarsk.

Procedure and methods. In soil and plant samples by inductively coupled plasma atomic emission spectral analysis, the total content of chemical elements was determined. For the results obtained the accumulation coefficient showing the nature of the internal redistribution of chemical elements in the system «soil–plant» was calculated, a series of biological accumulation for 12 sites located within the low floodplain of the Yenisei River in Krasnoyarsk was compiled.

Results. A ecological-geochemical analysis of the floodplain landscapes of the city of Krasnoyarsk was carried out. The basic regularities of the distribution of chemical elements in vegetation and soil cover are determined, the contribution of exogenous elements is estimated. Hyperaccumulation of Hg, Mn, Mo, S, Se, Zn by representatives of the genus *Salix* was revealed. It is noted that S makes the most significant contribution to the pollution of soils and vegetation of floodplain landscapes.

Research implications. Significance of the study lies in identifying the quantitative ratio of chemical elements determining the level of technogenic load and stability of ecosystems functioning. The findings reflect the importance of preservation and role of floodplain landscapes in urban environment. The information obtained is also valuable for making possible management decisions when planning economic activities within the floodplain landscapes of an urbanized territory.

Keywords: biological accumulation, fluvisols, technogenic pollution, heavy metals, urbanized territories

Введение

Город – это взаимосвязанные экосистемы, в которых урбанизация является главным фактором их трансформации. Характерная для Красноярска высокая техногенная нагрузка вызывает опасения по отношению к процессам, определяющим функционирование экосистем. При этом экологические функции поймен-

ных ландшафтов выполняют важную роль в городе, являясь депонирующей средой; трансформируют потоки техногенных веществ, обеспечивая связывание и удержание многих химических элементов. Однако в последние годы отмечается деградация пойм рек в результате деятельности человека, в связи с чем выявление основных закономерностей в системе «почва –

растение» пойменных ландшафтов, выступающих в качестве индикатора загрязнения окружающей среды, представляет высокий интерес для исследования.

Изучаемые нами территории находятся в зоне плоскостного смыва под воздействием различных загрязнителей, основными из которых выступают уличная дорожная сеть и автотранспорт, а также, в зависимости от расположения поймы, свой вклад вносят выбросы промышленных предприятий и сбросы сточных вод.

Отбор проб почв и растительности осуществлялся в период завершения вегетации в первой декаде октября 2021 года на 12 участках, расположенных в пределах низкой поймы, приподнятых относительно уреза р. Енисей на 0,15–0,5 м, в черте г. Красноярск

(рис. 1). Почвенные образцы были отобраны по 2 горизонтам в диапазоне глубин 0–5 и 5–24 см¹. В общей сложности было отобрано 24 почвенных и 36 растительных проб.

Современная эволюция изученных пойменных ландшафтов в значительной степени определяется режимом работы Красноярской ГЭС. В городской черте в пределах островной и береговой пойм р. Енисей явно выделяются 5 геоморфологических уровней: бечевник, низкая (молодая), средняя и высокая (зрелая) пойма, надпойменная аккумулятивная терраса высотой 5,5 м, местами техногенного происхождения.

Работа паводкового потока и волновой процесс на фоне постоянных колебаний уровня реки в результате суточного регулирования стока



Рис. 1 / Fig. 1. Схема района исследования и расположения пунктов отбора проб / Scheme of the study area and locations of the sampling points

Источник: составлено авторами

¹ ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: издание официальное: утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19 декабря 1984 г. №4731: дата введения 1986-01-0 // М: Стандартинформ. 2008. С. 3.

Красноярской ГЭС обеспечивают активную переработку бечевника за пределами зон эрозионной тени и отсутствие даже примитивных почв. Переработка осуществляется и в холодное время года по причине наличия незамерзающей полыньи. До постройки ГЭС в маловодный зимний период сброс воды составлял 800–900 м³/с. В настоящее время эволюция низких элементов осуществляется в гидрологических условиях, обеспеченных сбросом воды на Красноярской ГЭС в диапазоне 1800–2000 м³/с. При сбросах свыше 3 500 м³/с частично затопляется средняя пойма. При уровнях сброса на ГЭС до 6 500 м³/с частично затопляется высокая пойма, а при значениях 8 000 м³/с и более – частично затопливается современная поверхность островов Татышев, Отдыха и др.

Все изученные пробы аллювиальных почв характеризовались лёгким гранулометрическим составом с содержанием фракций физической глины (<0.01 мм) в диапазоне от 1 до 18%, величиной рН от 4,9 до 7,9. Содержание органического вещества было различным, значения для слоисто-аллювиальных почв – от 0,4 до 5,9%, серогумусовых – от 3,7 до 6,6%, темnogумусовых – от 6,7 до 13,4%, аллювиально-перегнойно глеевых – от 15,3 до 18,6%.

Аллювиальные почвы в пределах города характеризуются высоким уровнем загрязнения. По отношению к фоновым почвам низкой поймы, формирующимся выше по течению р. Енисей г. Красноярск, в почвах урбанизированной территории фиксируются положительные аномалии для: As – в 2,8 раз, Cd – в 2 раза, Cu – в 6,8 раз, Mn – в 2,5 раза, Pb – в 5,5 раз, S – в 1,9 раз, Zn – 4,3 раза.

В качестве образцов растительного материала на каждом участке были взяты пробы ствольной древесины с корой и ливы *Salix viminilis*, *S. Alba* как типичных представителей пойменных ландшафтов, составляющих основную биомассу исследуемой местности. В травянистом покрове преобладали семейства *Poaceae* (*Phleum pratense*, *Phalaroides arundinacea*, *Calamagrostis epigejos*, *Poa trivialis*, *P. Palustris*, *Calamagrostis langsdorffii*, *Elytrigia repens*, *Phleum pratense*, *Bromopsis inermis*) и *Cyperaceae* (*Carex acuta*, *C. curraica*, *C. dioica*, *C. vesicaria*, *C. cespitosa*, *C. rhynchophysa*) (рис. 2). Общее проективное покрытие напочвенного покрова составляет 60–80%, за исключением участков поймы, переходных к бечевнику, где оно значительно снижается. На всех исследуемых участках представлены естественные грунты, сохранившие типичное для слоистых аллювиальных толщ стратиграфическое строение.

21 марта 2023 г., в период максимального накопления и незадолго до периода снеготаяния, была взята общая проба снежного покрова (точка 7 на рис. 1) в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05-85¹ методом конверта. Масса сборной пробы составила 4,5 кг. Участок снегового опробования располагался в зоне значительного антропогенного воздействия, обеспечиваемого

¹ ГОСТ 17.1.5.05-85. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков: межгосударственный стандарт : введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 25 марта 1985 г. №774: дата введения 1986-07-01 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008297> (дата обращения 19.06.2023).



Рис. 2 / Fig. 2. Общий вид поверхности 5 участка. Левый берег р. Енисей, о. Татышев / General view of the surface of the 5th section. The left bank of the Yenisei River, Tatyshhev Island

Источник: фото автора

аэрогенным и гидрогенным переносом загрязняющих веществ с крупной автомагистрали на поверхность поймы.

Закономерности накопления и распределения перемещения химических элементов в системе «почва – растения»

В пробах почвы, растительности и снега с помощью метода атомно-эмиссионного спектрального анализа с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре ICAP-PRO X DUO и ртутно-гидридной приставки HVG1 было установлено содержание валовых форм химических элементов, в пробе снега – подвижных форм. В ходе исследования для расчёта биоаккумуляции нами были выбраны 12 химических элементов, представляющих наибольший интерес и высокие значения соотношений.

Представители рода *Salix* не случайно используются для фиторемедиации, т. к. характеризуются большим объёмом биомассы, развитой корневой системой, а также интенсивным поглощением различных химических элементов [19, с. 22–27]. В данном случае были взяты образцы *Salix viminalis* и *S. Alba*, наиболее часто встречающиеся на исследуемой территории. Их сорбционная способность неоднократно изучена [18, с. 95; 23, р. 68–77], однако комплексный анализ для пойменных ландшафтов г. Красноярска ранее не проводился, именно поэтому они представляют особый интерес для изучения.

Было рассмотрено как поглощение химических элементов, так и их внутреннее перераспределение, а на основании полученных результатов атомно-эмиссионного спектрального

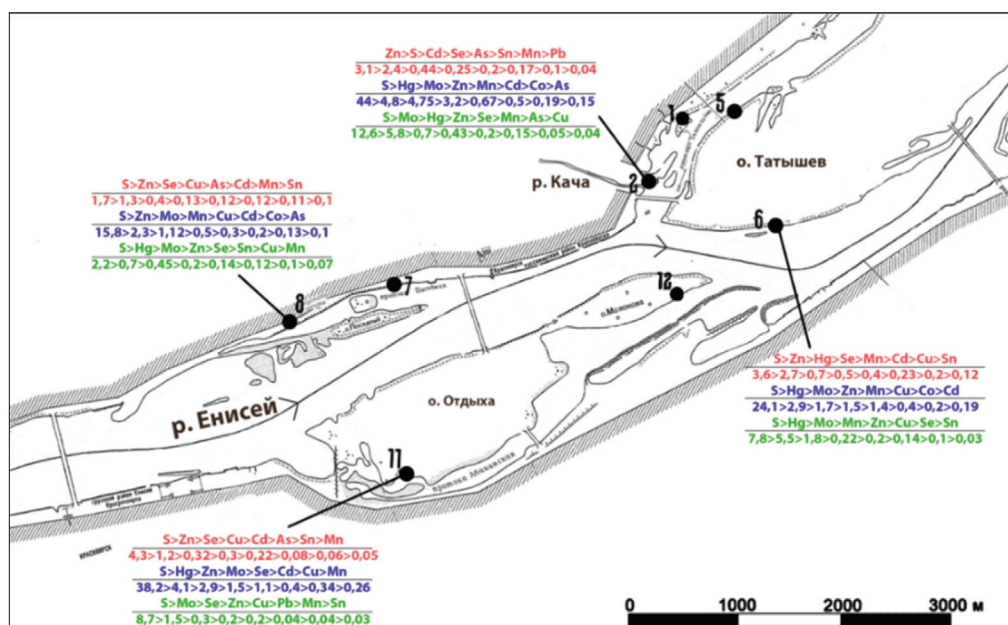
анализа для проб почвы и растительности был рассчитан коэффициент накопления (K_n).

K_n – отношение концентрации элемента в воздушно-сухой массе растения (мг/кг) к концентрации валовой формы соединений элемента в почве (мг/кг).

В дальнейшем при установлении особенностей перемещения химических элементов были составлены ряды биологического накопления и построены геохимические карты, характеризующие специфику различных участков, в зависимости от уровня загрязнения почв и геохимических условий, которые позволяют оценить экологические риски в случае увеличения техногенного давления. На рисунке 3

представлен фрагмент карты с более высокими концентрациями химических элементов.

Все, кроме 12 выбранных элементов, характеризуются показателем рассеяния или слабым биологическим накоплением. Исходя из полученных коэффициентов была составлена градация по интенсивности поглощения химических элементов (табл. 1). На ней видно, что энергичное и сильное накопление происходит лишь для *Hg*, *Mo*, *S*. Значения варьируются в зависимости от геоморфологического расположения, определяющего специфику гидрологического режима, и близости к источникам техногенного воздействия. Так, наиболее высокая концентрация *S* (мг/кг) зафиксирована в приустье-



Условные обозначения:

красный – древесина;

синий – листва;

зеленый – унос

Рис. 3 / Fig. 3. Ряды биологического накопления / Rows of biological accumulation

Источник: составлено авторами

Таблица 1 / Table 1

Интенсивность биологического накопления химических элементов /
Intensity of biological accumulation of chemical elements

Объект	Биологическое накопление			Биолог. поглощение
	Энергичного (100–10)	Сильного (10–5)	Слабого (5–1)	Среднего (1–0,1)
Листва	Mo, S	Hg, S	Hg, Mn, Mo, S, Se, Zn	As, Cd, Co, Cu, Hg, Mn, Mo, Pb, Se, Sn, Zn
Древесина			Hg, S, Se, Zn	As, Cd, Cu, Hg, Mn, Mo, S, Se, Sn, Zn
Укос	S	Hg, Mo, S	Hg, Mo, S	As, Cu, Hg, Mn, Mo, S, Se, Sn, Zn

Источник: составлено авторами по: Авессаломова И. А. Геохимические показатели при изучении ландшафтов. М., 1987. 108 с.

вом комплексе р. Кача, впадающей в р. Енисей и характеризующейся очень высоким уровнем загрязнения.

Традиционно считается, что листва более богата зольными элементами, нежели древесина, в данном случае это подтверждается при сравнении полученных концентраций по каждой из фракций, также это заметно по количеству тех элементов, которые вовлечены в процесс биогенной миграции.

Установлено, что в древесине содержание Mo находится на очень низком уровне и не зависит от его содержания в листе и почве. Это связано с тем, что данный элемент накапливается в быстро вегетирующих частях растений [20, р. 1–2; 22, р. 149–150]. Несмотря на то, что Mo в исследуемых пробах почвы не превышал установленных кларков [9, с. 9], его Kn в листе был >1 в 9 случаях, достигая значения 4,8.

Дополнительно в воздушно-сухих пробах растительного материала было определено соотношение химических элементов, осаждённых поступлением на поверхность растительного материала вследствие поступления из атмосферы и привноса с паводковыми

водами. Произведена многократная промывка растительных образцов в деионизированной воде с последующим определением элементного состава (рис. 4). Исходя из полученных данных заметно, что основная масса химических веществ в растительность поступает путём поглощения из почвы, в то время как экзогенная составляющая, оседающая на ней, в большинстве случаев незначительна. Так как пробы отбирались в конце вегетационного периода, та часть, которая поступила через устьичный аппарат эпидермиса листовых пластин, полностью или частично уже была поглощена растениями. При этом заметно, что значения для As выделяются и в исследованных пробах составляют 50%, это обусловлено его высокой летучестью AsH₃, AsCl₃, AsF₃, As₂O₃ и растворимостью As₂O₃ в воде в сравнении с другими элементами¹.

Снежный покров, наряду с почвенным, выступает в качестве депонирующей среды для загрязняющих

¹ Макрыгина В. А. Геохимия отдельных элементов: учебное пособие. Новосибирск: Гео, 2011. С. 193.

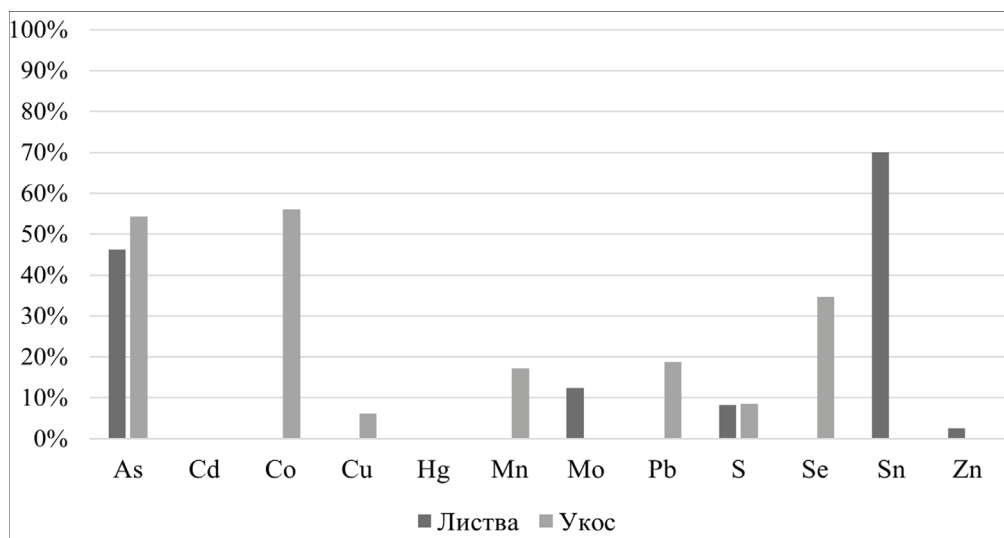


Рис. 4 / Fig. 4. Доля химических элементов в пробах растительности после обработки деионизированной водой, % / The proportion of chemical elements in vegetation samples after treatment with deionized water, %

Источник: составлено авторами

веществ, поступающих из атмосферы. Химический состав снеготалой воды для рассматриваемых элементов, без учёта твёрдой составляющей, продемонстрировал, что с твёрдыми атмосферными осадками в зимний период на поверхность поймы в значимых концентрациях поступают подвижные формы *Си* (0,0045 мг/дм³), *Мп* (0,0139 мг/дм³), *Зп* (0,0056 мг/дм³), *С* (1,2 мг/дм³). Поступление подвижных форм прочих химических элементов незначительно.

Для Красноярска характерны значительные выбросы по *С* (превышения более 5ПДК¹), а диоксид серы является одним из основных веществ, которые вносят значительный вклад в общий уровень загрязнения атмосферы города. При этом *С* может усваиваться

растениями преимущественно из почвенного раствора в виде сульфата. А в пределах урбанизированных территорий именно выбросы диоксида серы в атмосферу являются основным её источником попадания в почву. Во многих работах отмечается [2; 13], что основным источником *С* в районах, где не применяются серные удобрения (гипс, сульфаты калия, магния, аммония), стали только атмосферные осадки, приносящие окислы серы, выбрасываемые тепловыми электростанциями, работающие на твёрдом и жидком топливе и металлургические предприятия [1, с. 19] и выхлопными газами автомобилей и ДВС [14, с. 50]. Превышение ПДК для *С* в пробе снега подтверждает это. К тому же неоднократно доказано, что в большинстве российских городов превышение концентраций по *С* в топливе, в особенности в дизельном, является распространённой причиной загрязнения

¹ Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2021 году». Красноярск. 2022. С. 234–235.

[10, с. 3]. Наряду с этим была отмечена высокая газопоглотительная способность растениями рода *Salix* по отношению к SO_2 в работах других авторов [4, с. 9, 18; 21, р. 74–80]. Усреднённые концентрации химических элементов в растениях (табл. 2) в нашем случае показывают, что минимум 10% массы *S*, полученной в ходе химического анализа, поступает аэрогенным путём, оседая на листовой пластинке и укосе. В почвенных образцах превышения ПДК достигали 1 606 мг/кг (10ПДК). Большая вариативность *Kn* установлена для листы от 3,5 до 44, укоса – от 0,45 до 12,6 и древесины – от 0,36 до 4,29.

Наряду с *S* активное биологическое поглощение отчётливо прослеживается и для *Hg*. Ртуть является одним из самых токсичных веществ, негативно воздействующих на организм из-за своего концентрационного эффекта. Источником *Hg* в Красноярске могут быть: отработанные газы автотранспорта, выбросы с ТЭЦ, а также то, что более 80% частного сектора отапливается путём сжигания ископаемого топлива¹. В целом, на данный момент недостаточно оценено поступление её от техногенных источников в канализационные системы городов, в осадках сточных вод может концентрироваться до 1015 т ртути (в масштабах РФ) [6, с. 5]. Активнее всего *Hg* накапливается в укосе со значениями от 0 до 5,5 и в листе – от 0 до 4,8.

¹ Постановление администрации города Красноярска от 7 декабря 2022 г. № 1100 «Об утверждении Комплексной программы по переводу частных домовладений с угольного отопления на более экологичные виды отопления, в том числе электроотопление, в городе Красноярске на 2022–2024 годы» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/405889905/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения: 06.01.2024).

Также в образцах древесины и листья активно поглощается *Se*. Он является биогенным рассеянным микроэлементом, необходимым для жизнедеятельности человека и животных, а также является антагонистом *As*, *Cd*, *Cu*, *Pb*, *Zn*, однако в больших концентрациях он токсичен. Красноярский край относится к селено-дефицитным провинциям [17, с. 17], его высокое содержание в изучаемых ландшафтах может быть связано с лёгким гранулометрическим составом, большим содержанием гумуса, адсорбированием глинистыми минералами, в особенности оксидами железа [16, с. 100], имеющим в данных почвах значительные концентрации.

Поступление в пойменные почвы Красноярска *Zn* наряду с *Cu* в значительной степени связано с продуктами износа частей автомобильного транспорта [15, с. 133–134], работой промышленных предприятий и автономными источниками теплоснабжения. *Zn* имеет похожие *Kn* во всех изучаемых образцах древесины и листья, находясь в промежутке от 1 до 2, изредка не достигая 1 и превышая 2, в укосе не отмечено его высокое содержание.

Для определения тесноты связи между элементами в исследуемых почвах и растительности был рассчитан линейный коэффициент парной корреляции Пирсона. Установлена тесная связь для *Co:Mn* ($r=0,606$) > *Co:Cu* ($r=0,505$), т. к. отмечается высокая степень ассоциации марганцевыми конкрециями *Co*, *Cu*, вследствие образования большого числа оксидов и гидроксидов марганца, которые имеют малые размеры кристаллов и большую площадь поверхности [8, с. 327–328].

Выявлены парагенетические ассоциации, отражающие общий источник поступления, в частности: $As:Mn$ ($r=0,769$) > $As:Cd$ ($r=0,641$) > $As:Co$ ($r=0,599$). Это может быть связано с тем, что данные элементы могут одновременно выделяться в результате газозоодушных выбросов и эксплуатацией автотранспорта [11, с. 9; 12, с. 732]. Также установлена значимая теснота связи для $Cu:Pb$ ($r=0,735$) > $Cu:Zn$ ($r=0,704$) > $Cu:Cd$ ($r=0,531$), данные элементы, по нашему мнению, входят в состав резиновой смеси автомобильных шин (Zn , Cu , Cd), а также в продукты износа автомобильного дорожного комплекса [11, с. 9; 12, с. 731]. Так как дорожное пространство является значимым источником загрязнения, то заметная и высокая зависимость прослеживается и между $Pb:Zn$ ($r=0,876$) > $Pb:Cu$ ($r=0,735$) > $Pb:Sn$ ($r=0,649$) > $Pb:Mn$ ($r=0,505$), их поступление также связано с износом различных частей агрегатов автомобильного транспорта, в частности подшипников, тормозных колодок, антифрикционных присадок и выбросов выхлопных газов [3, с. 80, 83–84, 88].

Корреляционное взаимодействие в системе «почва – растения» указывает на то, что, несмотря на значимые концентрации S в почве, она имеет специфический механизм поступления в растительный покров. Связи данного элемента характеризуются недостоверными значениями либо же демонстрируют достоверную обратную корреляцию, например, для $S:Sn$ ($r=-0,754$) > $S:Ti$ ($r=-0,734$) > $S:As$ ($r=-0,727$) > $S:Cu$ ($r=-0,721$), на наш взгляд, это обусловлено тем, что в почвенном покрове она присутствует в слабо доступных формах.

Для большинства тяжёлых металлов почва является основным источником поступления в растения, при высоких концентрациях они вовлекаются в биологический круговорот, вызывая различные заболевания, нарушая физиологические процессы, поступление необходимых микроэлементов. При этом превышение санитарных норм в почвенных образцах было установлено для Cu (90ДК), As (6,85ОДК), Cd (5,2ОДК), Zn (12,5ОДК), Mn (1,13ПДК), Pb (3,5ОДК)¹, при их сравнении и Kn , прослеживается, что для As , Cd , Cu , Pb активное накопление в почве не приводит к таковым в растениях, они в незначительном количестве вовлекаются в биологический круговорот и слабо доступны для растительности.

Ранее уже была отмечена активная аккумуляция представителями рода *Salix* различных веществ; проведённые исследования, в т. ч. и на пойменных почвах, также это доказывают [5, с. 118; 7, с. 979–989]. В нашем случае виды *Salix viminalis*, *S. Alba* можно отнести к организмам-концентраторам для Mo , Hg , S , Zn , демонстрирующих наличие биогеохимического барьера и формирование биогеохимических аномалий в пойменных ландшафтах г. Красноярск.

Заключение

Проведён комплексный анализ для пойменных ландшафтов г. Краснояр-

¹ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». М.: ЦЕНТРМАГ, 2022. С. 300–303.

ска, в результате которого установлены основные закономерности перемещения химических элементов в системе «почва – растение». Рассчитан коэффициент накопления, он имеет широкий интервал варьирования, особенно для *Hg*, *Mo*, *S*.

В большинстве случаев отмечается тенденция к формированию естественного биогеохимического барьера для 6 (*Hg*, *Mn*, *Mo*, *S*, *Se*, *Zn*) из 12 (*As*, *Cd*, *Co*, *Cu*, *Hg*, *Mn*, *Mo*, *Pb*, *S*, *Se*, *Sn*, *Zn*) рассмотренных нами элементов. Вовлекая их в биологический круговорот, растительный покров выполняет санитарную функцию на пути миграции химических элементов.

Выявленная гипераккумуляция *Hg*, *Mn*, *Mo*, *S*, *Se*, *Zn* представителями рода *Salix* показывает высокий уровень техногенного загрязнения пойменных ландшафтов, являющихся неотъемлемой и незаменимой частью города.

Полученные ряды биологического накопления указывают на формирование биогеохимических аномалий. На основании сравнения санитарных нормативов и *Kn* сделан вывод, что для ряда элементов повышенные концентрации в почвах не всегда приводят к образованию доступных форм для растительности.

Определены основные парагенетические ассоциации, демонстрирующие источники поступления и взаимоотношения химических элементов в почвенном покрове и системе «почва – растения», в частности для *As:Mn>As:Cd>As:Co* (газовоздушные выбросы и эксплуатация автотранспорта), *Cu:Pb>Cu:Zn>Cu:Cd* (состав резиновой смеси автомобильных

шин, продукты износа автомобильного дорожного комплекса) и *Pb:Zn>Pb:Cu>Pb:Sn>Pb:Mn* (подшипники, тормозные колодки, антифрикционные присадки и выбросы выхлопных газов автотранспорта). Таким образом, можно полагать, что важную роль в поступлении поллютантов в пойменные ландшафты играет автотранспорт.

Исследование смывов с растительного материала вследствие поступления из атмосферы и привноса с паводковыми водами позволило определить элементный состав, вследствие чего можно утверждать, что в ряде случаев в растительность экзогенным путём поступает до 70% от общего объёма загрязнения, однако для большинства химических элементов основным источником остаётся почва. С использованием эколого-геохимического изучения снежного покрова установлены приоритетные загрязнители атмосферного воздуха (*Cu*, *Mn*, *Zn*, *S*).

Парагенетические ассоциации между химическими элементами демонстрируют, что основными источниками поступления являются продукты износа автомобильного дорожного комплекса (*Pb*, *Zn*, *Cu*, *Sn*, *Mn*, *Cd*, *Co*, *As*).

Отмечено, что *S* вносит значительный вклад в загрязнение почв и растительности пойменных ландшафтов, является доминантой в этом и активно накапливается в биомассе. Несмотря на то, что южная часть Красноярского края, включающая в себя Красноярскую агломерацию, относится к селенодефицитным провинциям, выявлены повышенные концентрации *Se* в растительном и почвенном покрове.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов В. С. Диоксид серы и основные источники загрязнения атмосферы диоксидом серы // Научный журнал (электронный научный журнал). 2017. № 6–1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dioksid-sery-i-osnovnye-istochniki-zagryazneniya-atmosfery-dioksidom-sery> (дата обращения: 26.12.2023).
2. Аристархов А. Н. Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международный сельскохозяйственный журнал. 2016. № 5. С. 39–47.
3. Совершенствование материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания / Т. А. Болсуновская, Н. П. Бурковская, Н. В. Севостьянов, И. Ю. Ефимочкин // Труды ВИАМ. 2020. № 1. С. 78–91. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91
4. Бухарина И. Л.; Двоеглазова А. А. Биозкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. Ижевск: Удмуртский университет, 2010. 184 с.
5. Гуляева У. А. О концентрировании стронция растениями // Биогеохимия – научная основа устойчивого развития и сохранения здоровья человека: сборник статей. Т. 1 / под ред. Л. В. Переломова, В. В. Ермакова. Тула, 2019. С. 116–119.
6. Дмитриев А. А. Ртутные загрязнения // Военные знания. 2007. № 11. С. 2–8.
7. Концентрирование металлов растениями рода *Salix* и их значение при выявлении кадмиевых аномалий / В. В. Ермаков, Н. С. Петрунина, С. Ф. Тютиков, В. Н. Данилова, С. Д. Хушвахтова, А. П. Дегтярев, Е. В. Кречетова // Геохимия. 2015. № 11. С. 978–990. DOI: 10.7868/S0016752515110023
8. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / пер. Д. В. Гричук, Е. П. Янина. М.: Мир, 1989. 439 с.
9. Касимов Н. С., Власов Д. В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия: География. 2015. № 2. С. 7–17.
10. Инструментальные средства для выявления контрафактных нефтепродуктов по содержанию серы / М. Г. Клековкина, И. В. Минин, О. В. Минин, Г. В. Шувалов, О. А. Ясырова // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. № 1. С. 101–106.
11. Лазеба А. В., Лёвкин Н. Д. Распространение тяжелых металлов в зоне движения автотранспорта // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2014. № 3. С. 9–16.
12. Марцев А. А., Селиванов О. Г., Трифонова Т. А. Оценка почвы придорожной территории автодороги Р72 по содержанию тяжёлых металлов и мышьяка // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 7. С. 730–735. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-7-730-735
13. Нагорный В. Д., Расунайву Н. А. Влияние серы на содержание пигментов в листьях и накопление сухого вещества растениями картофеля в условиях вегетационного опыта // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2016. № 3. С. 7–15. DOI: 10.22363/2312-797X-2016-3-7-15
14. Неверова О. А. Особенности накопления серы и азота деревьями различных экологических зон города Кемерово // Современные наукоемкие технологии (электронный научный журнал). 2008. № 8. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=24128> (дата обращения: 02.05.2023).
15. Орбан Е. С., Шарафутдинов Р. А. Источники загрязнения пойменных почв урбанизированных территорий тяжелыми металлами // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов: сб. мат-ов / под ред. С. А. Ляшко. СПб.: Печатный цех, 2022. С. 127–135. DOI: 10.34755/IROK.2022.21.35.012
16. Побилат А. Е., Волошин Е. И. Особенности содержания селена в системе почва – растение (обзор) // Вестник КрасГАУ. 2020. № 11. С. 98–105.

17. Решетник Л. А., Парфенова Е. О. Биогеохимическое и клиническое значение селена для здоровья человека // Микроэлементы в медицине. Серия: Клиническая медицина. 1999. № 3. С. 16–22.
18. Чернышенко О. В. Особенности использования поглотительной способности древесных растений в современных фитотехнологиях // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2018. № 4. С. 92–98. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-4-92-98
19. Шихова Н. С. Биогеохимические критерии оценки экологической эффективности видов в городском озеленении // Вестник ДВО РАН. Серия: Биологические науки. 2022. № 2. С. 17–36. DOI: 10.37102/0869-7698_2022_222_02_2
20. Bittner F. Molybdenum metabolism in plants and crosstalk to iron // *Frontiers in Plant Science*. 2014. Vol. 5 no. 28. P. 1–6. DOI: 10.3389/fpls.2014.00028
21. Esbrí J. M., Cacovean H., Higuera P. Usage Proposal of a common urban decorative tree (*Salix alba* L.) to monitor the dispersion of gaseous mercury: A case study from Turda (Romania) // *Chemosphere*. 2018. Vol. 193. P. 74–81. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.11.007
22. Michopoulos P. Molybdenum in forests – a short review // *Global NEST Journal*. 2020. Vol. 22. № 2. P. 147–152. DOI: 10.30955/gnj.003309
23. Mleczek M., Waliszewska B., Magdziak Z., Szostek M., Rutkowski P., Zborowska M., Niedzielski P., *Salix viminalis* L. – A highly effective plant in phytoextraction of elements // *Chemosphere*. 2018. Vol. 212. P. 67–78. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.08.055

REFERENCES

1. Akimov V. S. [Sulfur dioxide and the main sources of atmospheric pollution with sulfur dioxide]. In: *Nauchnyy zhurnal (elektronnyy nauchnyy zhurnal)* [Scientific journal (electronic scientific journal)], 2017, no. 6–1. Abstract at: <https://cyberleninka.ru/article/n/dioksid-sery-i-osnovnye-istochniki-zagryazneniya-atmosfery-dioksidom-sery> (accessed: 26.12.2023).
2. Aristarkhov A. N. [Sulfur in agroecosystems of Russia: monitoring the content in soils and the effectiveness of its application]. In: *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural Journal], 2016, no. 5, pp. 39–47.
3. Bolsunovskaya T. A., Burkovskaya N. P., Sevostyanov N. V., Efimochkin I. Yu. [Improvement of materials for sliding bearings of internal combustion engines]. In: *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2020, no. 1, pp. 78–91. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91
4. Bukharina I. L.; Dvoeglazova A. A. *Bioekologicheskiye osobennosti travyanistykh i drevesnykh rasteniy v traditsionnykh nasazhdeniyakh* [Bioecological features of herbaceous and woody plants in urban plantings]. Izhevsk, Udmurtskiy universitet Publ., 2010. 184 p.
5. Gulyaeva U. A. [On the concentration of strontium by plants]. In: Perelomova L. V., Ermakova V. V. *Biogekhimiya – nauchnaya osnova razvitiya i sokhraneniya zdorov'ya cheloveka* [Biogeochemistry – the scientific basis of sustainable development and preservation of human health. Vol. 1]. Tula, 2019, pp. 116–119.
6. Dmitriev A. A. [Mercury pollution]. In: *Voyennyye znaniya* [Military knowledge], 2007, no. 11, pp. 2–8.
7. Ermakov V. V., Petrunina N. S., Tyutikov S. F., Danilova V. N., Khushvakhtova S. D., Degtyarev A. P., Krechetova E. V. [Concentration of metals by plants of the genus *Salix* and their significance in identifying cadmium anomalies]. In: *Geokhimiya* [Geochemistry], 2015, no. 11, pp. 978–990. DOI: 10.7868/S0016752515110023
8. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace elements in soils and plants* (Rus. ed.: Grichuk D. V., Yasnina E. P., trans. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p.).

9. Kasimov N. S., Vlasov D. V. [Clarks of chemical elements as standards of comparison in ecogeochemistry]. In: *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya: Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Series: Geography], 2015, no. 2, pp. 7–17.
10. Klekovkina M. G., Minin I. V., Minin O. V., Shuvalov G. V., Yasyrova O. A. [Tools for identifying counterfeit petroleum products by sulfur content]. In: *Interexpo Geo-Siberia*, 2017, no. 1, pp. 101–106.
11. Lazeba A. V., Levkin N. D. [Distribution of heavy metals in the traffic zone]. In: *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [Izvestia of Tula State University. Geosciences], 2014, no. 3, pp. 9–16.
12. Martsev A. A., Selivanov O. G., Trifonova T. A. [Assessment of soil on the roadside area of the P72 highway for the content of heavy metals and arsenic]. In: *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation], 2022, vol. 101, no. 7, pp. 730–735. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-7-730-735
13. Nagorny V. D., Rasuanaivo N. A. [The influence of sulfur on the content of pigments in leaves and the accumulation of dry matter by potato plants under conditions of growing experience]. In: *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo* [Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University. Series: Agronomy and animal husbandry], 2016, no. 3, pp. 7–15. DOI: 10.22363/2312-797X-2016-3-7-15
14. Neverova O. A. [Features of accumulation of sulfur and nitrogen by trees of various ecological zones of the city of Kemerovo]. In: *Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2008, no. 8. Abstract at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=24128> (accessed: 02.05.2023).
15. Orban E. S., Sharafutdinov R. A. [Sources of pollution of floodplain soils of urban areas with heavy metals]. In: Lyashko S. A., ed. *Aktualnyye problemy nauki i obrazovaniya v usloviyakh sovremennykh vyzovov* [Current problems of science and education in the context of modern challenges]. St. Petersburg, Pechatnyy tsekh Publ., 2022, pp. 127–135. DOI: 10.34755/IROK.2022.21.35.012
16. Pobilat A. E., Voloshin E. I. [Peculiarities of selenium content in the soil-plant system (review)]. In: *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2020, no. 11, pp. 98–105.
17. Reshetnik L. A., Parfenova E. O. [Biogeochemical and clinical significance of selenium for human health]. In: *Mikroelementy v meditsine. Seriya: Klinicheskaya meditsina* [Trace elements in medicine. Series: Clinical medicine], 1999, no. 3, pp. 16–22.
18. Chernyshenko O. V. [Features of the use of the absorptive capacity of woody plants in modern phytotechnologies]. In: *Vestnik MGUL – Lesnoy vestnik* [Bulletin of the Moscow State University of Forestry – Forest Bulletin], 2018, no. 4, pp. 92–98. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-4-92-98
19. Shikhova N. S. [Biogeochemical criteria for assessing the ecological effectiveness of species in urban landscaping]. In: *Vestnik DVO RAN. Seriya: Biologicheskiye nauki* [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Series: Biological Sciences], 2022, no. 2, pp. 17–36. DOI: 10.37102/0869-7698_2022_222_02_2
20. Bittner F. Molybdenum metabolism in plants and crosstalk to iron. In: *Frontiers in Plant Science*, 2014, vol. 5, no. 28, pp. 1–6. DOI: 10.3389/fpls.2014.00028
21. Esbri J. M., Cacovean H., Higuera P. Usage Proposal of a common urban decorative tree (*Salix alba* L.) to monitor the dispersion of gaseous mercury: A case study from Turda (Romania). In: *Chemosphere*, 2018, vol. 193, pp. 74–81. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.11.007
22. Michopoulos P. Molybdenum in forests – a short review. In: *Global NEST Journal*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 147–152. DOI: 10.30955/gnj.003309
23. Mleczek M., Waliszewska B., Magdziak Z., Szostek M., Rutkowski P., Zborowska M., Niedzielski P., *Salix viminalis* L. – A highly effective plant in phytoextraction of elements. In: *Chemosphere*, 2018, vol. 212, pp. 67–78. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.08.055

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Орбан Елизавета Сергеевна – магистрант кафедры экологии и природопользования Института экологии и географии Сибирского федерального университета;
e-mail: liz.orban@mail.ru

Шарафутдинов Руслан Азлямович – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры экологии и природопользования Института экологии и географии Сибирского федерального университета;
e-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elizaveta S. Orban – Master's Degree Student, Department of Ecology and Nature Management, Institute of Ecology and Geography, Siberian Federal University;
e-mail: liz.orban@mail.ru

Ruslan A. Sharafutdinov – PhD (Geography), Assoc. Prof., Department of Ecology and Nature Management, Institute of Ecology and Geography, Siberian Federal University;
e-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Орбан Е. С., Шарафутдинов Р. А. Химические элементы в системе «почва – растения» пойменных ландшафтов г. Красноярск // Географическая среда и живые системы. 2024. № 1. С. 55–69.

DOI: 10.18384/2712-7621-2024-1-55-69

FOR CITATION

Orban E. S., Sharafutdinov R. A. Chemical elements in the «soil – plants» system of floodplain landscapes in the city of Krasnoyarsk. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2024, no. 1, pp. 55–69.

DOI: 10.18384/2712-7621-2024-1-55-69