

Научная статья
УДК 58.009
EDN: CJMNUJ
DOI: 10.21285/achb.916



Особенности накопления тяжелых металлов в зеленой массе растений, произрастающих в долине реки Большой Юган Сургутского района Ханты-Мансийского автономного округа – Югры

И.В. Кравченко*, М.А. Мулюкин*✉, Ю.Ю. Петрова*, Л.Ф. Шепелева**

*Сургутский государственный университет, Сургут, Российская Федерация

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Российская Федерация

Аннотация. Изучение особенностей аккумуляции тяжелых металлов растениями в последнее время приобретает все большую актуальность и практическую значимость, поскольку все тяжелые металлы отличаются высокой токсичностью. Влияние загрязнителей на растительный материал обусловлено их аккумуляцией в надземной (зеленые листья, стебли, соцветия) и подземной (корни) частях растений, что приводит к окислительному стрессу, который проявляется высокой генерацией активных форм кислорода. Целью представленного исследования являлось изучение накопления тяжелых металлов (никеля, свинца, хрома, кадмия) в надземной массе растений, произрастающих на территории Сургутского района Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Было отобрано 15 видов растений, наиболее распространенных на территории округа. В изученных фитоценозах были собраны листья растений. Элементный анализ растительного материала выполнен атомно-абсорбционным методом. В зеленой массе канареечника тростниковидного и черноголовки обыкновенной было найдено ~6–7 мг/кг никеля, что ощутимо больше, чем в надземных органах пырея ползучего, подмаренника болотного и подорожника большого. Показано, что в надземной части канареечника тростниковидного и подорожника большого накапливается более 4 мг/кг свинца; осоки пузырчатой, пырея ползучего и подмаренника болотного – ~2–3 мг/кг хрома; пырея ползучего – более 2 мг/кг кадмия. На основании полученных результатов составлены ряды накопления элементов в надземной части пойменных видов растений. Содержание исследуемых тяжелых металлов в надземной фитомассе всех изученных растений, за исключением пырея ползучего, находится в пределах нормы и соответствует предельно допустимой концентрации.

Ключевые слова: надземная фитомасса, никель, свинец, хром, Большой Юган

Финансирование. Исследования проводились в Сургутском государственном университете при финансовой поддержке Департамента образования и молодежной политики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в рамках проекта «Функциональные пищевые продукты и микроинкапсулированные ингредиенты на основе комплекса биологически активных соединений, выделенных из северных растений, выращенных в гидропонике с применением технологии микрклонального размножения (Юграбиофарм)», № 2023-227-28, а также в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 0721-2020-0019.

Для цитирования: Кравченко И.В., Мулюкин М.А., Петрова Ю.Ю., Шепелева Л.Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в зеленой массе растений, произрастающих в долине реки Большой Юган Сургутского района Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 2. С. 245–252. DOI: 10.21285/achb.916. EDN: CJMNUJ.

Heavy metal accumulation in the phytomass of plants in the Bolshoy Yugan River valley, Surgut District, Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra

Inessa V. Kravchenko*, Maxim A. Mulyukin*✉, Yuliya Yu. Petrova*, Ludmila F. Shepeleva**

*Surgut State University, Surgut, Russian Federation

**National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

Abstract. Processes of heavy metal accumulation in plants are increasingly attracting research attention due to the high toxicity of such substances. The pollutants accumulated in the aerial (green leaves, stems, inflorescences) and underground (roots) mass of plants cause oxidative stress associated with the production of reactive oxygen species. In this work, we investigate the accumulation of heavy metals (nickel, lead, chromium, and cadmium) in the aerial mass of plants growing in the Surgut district of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra. In total, leaves from 15 plant species widespread in the studied area were collected for elemental analysis by atomic absorption spectroscopy. About 6–7 mg/kg of nickel was found in the green mass of reed canary grass and heal-all (*Prunella vulgaris*), which exceeds significantly the nickel amount in the aerial mass of couch grass, marsh bedstraw, and broadleaf plantain. The aerial parts of reed canary grass and broadleaf plantain were found to accumulate more than 4 mg/kg of lead, while those of bladder sedge, couch grass, and marsh bedstraw accumulate about 2–3 mg/kg of chromium. More than 2 mg/kg of cadmium was found in couch grass. The results obtained were used to compile series of accumulation of elements in the aerial parts of floodplain plant species. The content of the studied heavy metals in the aerial phytomass of all studied plants, except for couch grass, ranges within standard values, corresponding to their maximum permissible concentrations.

Keywords: aerial phytomass, nickel, lead, chromium, Bolshoy Yugan

Funding. The research was carried out at Surgut State University with the financial support of the Department of Education and Youth Policy of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra within the framework of the project “Functional food products and microencapsulated ingredients based on a complex of biologically active compounds isolated from northern plants grown in hydroponics using micropropagation technology (Ugrabiofarm)”, no. 2023-227-28, as well as within the framework of the state assignments of the Ministry of Education and Science of Russia no. 0721-2020-0019.

For citation: Kravchenko I.V., Mulyukin M.A., Petrova Yu.Yu., Shepeleva L.F. Heavy metal accumulation in the phytomass of plants in the Bolshoy Yugan River valley, Surgut District, Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(2):245-252. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.916. EDN: CJMNUJ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время серьезной экологической проблемой во всем мире является загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами различных объектов природной среды (воздух, почва, вода, растения) [1–5]. Известно, что содержание тяжелых металлов в почвенных и растительных объектах зависит от почвообразующих процессов, техногенного загрязнения, физико-географических особенностей регионов (климатических условий, состава почвообразующих пород и растений). В связи с этим изучение особенностей аккумуляции тяжелых металлов растениями в последнее время приобретает все большую актуальность и практическую значимость [6]. Тяжелые металлы, попадая в водные, почвенные, растительные объекты, включаются в природный круговорот веществ и удаляются очень медленно при выщелачивании, эрозии и аккумуляции различными видами растений. Все тяжелые металлы отличаются высокой токсичностью, а такие, как кадмий и свинец, входят в состав обязательных элементов,

которые необходимо учитывать при проведении экологического мониторинга [6].

Вследствие загрязнения природной среды поллютантами наблюдаются факты угнетения в условиях стресса растительности. У многих видов растений наблюдается нарушение физиолого-биохимических свойств, отмечается задержка роста, развития, нарушаются процессы фотосинтеза, проявляется хлороз, некроз листьев, происходит угнетение корневой системы, уменьшение биомассы и длины корней [6–8]. Влияние поллютантов на растительный материал обусловлено их аккумуляцией в надземной (зеленые листья, стебли, соцветия) и подземной (корни) частях растений [9–11], что приводит к окислительному стрессу, который проявляется высокой генерацией активных форм кислорода [7, 8].

Использование растений для приготовления различных травяных чаев, настоек, сборов из растительного сырья, собранного на загрязненных территориях, может пагубно сказываться на здоровье людей, негативно

влиять на работу всех органов и систем человека¹ [1, 2, 4, 10, 12, 13], поэтому проблема «экологической чистоты» растительного сырья особенно важна и требует тщательного контроля его качества [10, 14].

Изучение реакций растений на загрязнение природной среды тяжелыми металлами является одной из актуальных задач экологического мониторинга, который предполагает в том числе и выявление закономерностей варьирования химического состава растений. Исследования в этой области способны послужить основой для получения сведений, которые в дальнейшем могут быть использованы в фармацевтической, пищевой, косметологической промышленности.

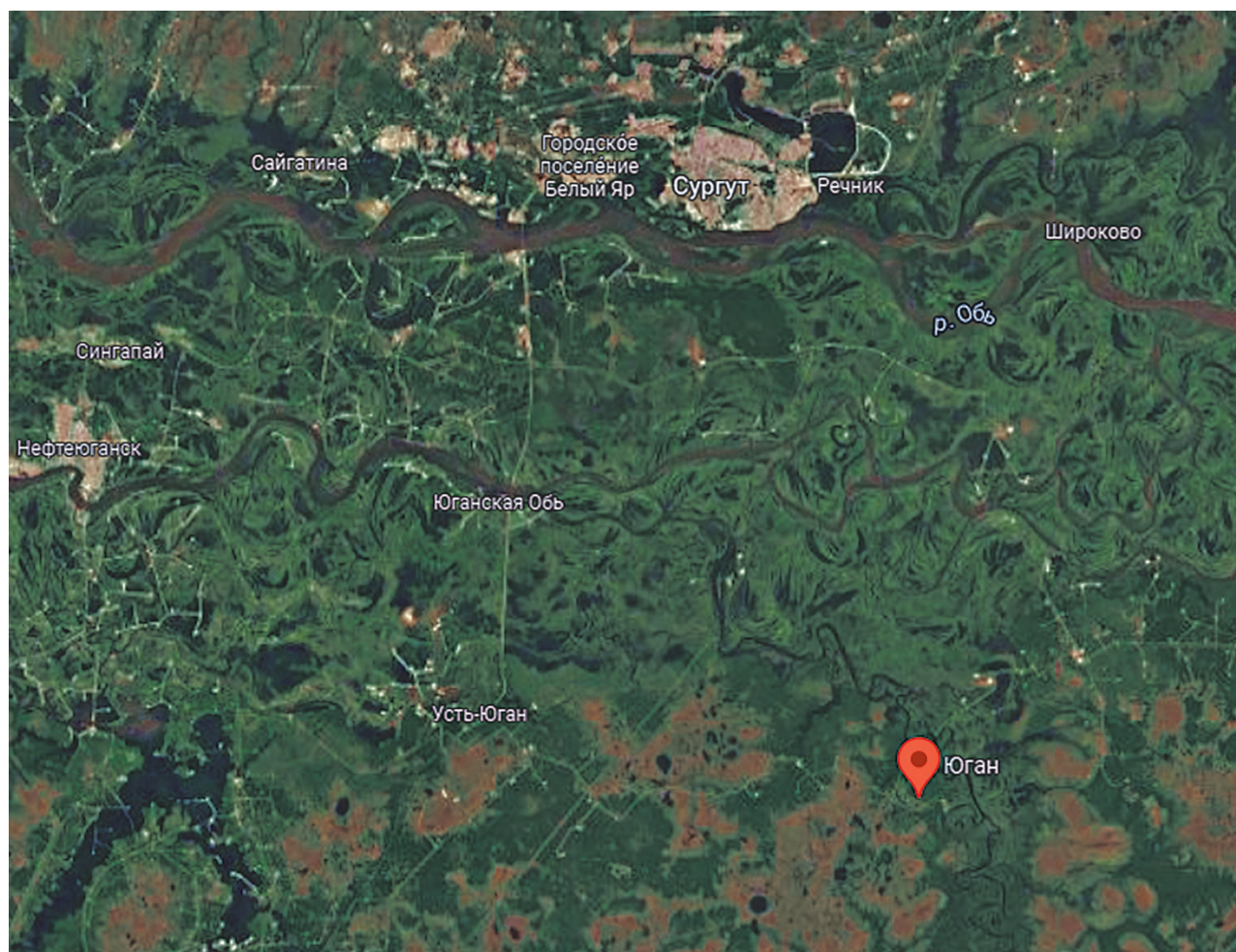
Целью данной работы явилось определение тяжелых металлов (никеля, свинца, хрома, кадмия) в образцах пойменных видов луговых растений Сургутского района Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и выявление особенностей их накопления в исследуемых видах растений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для изучения накопления тяжелых металлов (никеля, свинца, хрома и кадмия) было собрано растительное сырье на территории Сургутского района в окрестностях

деревни Юган Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (рисунок). Листья растений очищали от земли, отмывали в проточной воде. Исследования проводили в высушенном сырье.

Для проведения химического анализа было отобрано 15 видов растений, произрастающих на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в долине реки Большой Юган [15]: осока острая – *Carex acuta* L., канареечник тростниковидный – *Phalaroides arundinacea* L., вероника длиннолистная – *Veronica longifolia* L., лапчатка гусиная – *Potentilla anserina* L., пырей ползучий – *Elytrigia repens* (L.) Nevski., черноплодка обыкновенная – *Prunella vulgaris* L., клевер луговой – *Trifolium pratense* L., подмаренник болотный – *Galium palustre* L., горошек мышиный – *Vicia cracca* L., полынь обыкновенная – *Artemisia vulgaris* L., осока пузырчатая – *Carex vesicaria* L., кипрей узколистный – *Chamaenerion angustifolium* L., щавель воробьиный – *Rumex acetosella* L., подорожник большой – *Plantago major* L., хвощ полевой – *Equisetum arvense* L., которые обладают различными фармакологическими свойствами. Эти виды растений широко распространены на территории округа и находят свое применение в медицине и фитотерапии [16–22].



Местоположение мониторингового участка поймы реки Большой Юган (60.878344° N, 73.689410° E)

Monitoring location of the floodplain section of the Big Yugan River (60.878344° N, 73.689410° E)

¹XII Государственная фармакопея Российской Федерации. Ч. 1. М.: Изд-во Научного центра экспертизы средств медицинского применения, 2008. 704 с.

Объектом исследования служила надземная часть растений. Сырье собирали в 2022 г. во второй половине июля в фазы цветения. Растительный материал сушили воздушно-теньевым методом в хорошо проветриваемом помещении. Измельчение сухого растительного сырья проводили в лабораторной мельнице ЛЗМ-1М («Сибгпроприбор», Россия). Размолотые образцы просеивали через сито с диаметром отверстий 1–2 мм.

Навеску растительного сырья массой 1 г помещали в фарфоровый тигель и далее проводили минерализацию проб в муфельной печи ЭКПС-10 («Смоленское специальное конструкторско-технологическое бюро систем программного управления», Россия) при температуре 550 °С в течение 1,0–1,5 ч. Тигли с полученной золой охлаждали в эксикаторе в течение 1 ч. Навески золы образцов взвешивали на аналитических весах AND GH-200 (AND, Корея) и растворяли в 5 М азотной кислоте для определения общего содержания никеля, свинца, хрома и кадмия атомно-абсорбционным методом при помощи атомно-абсорбционного спектрометра МГА-915МД («Атомприбор», Россия)². Для приготовления градуировочных растворов использовали государственные стандартные образцы кадмия (0,5 г/дм³, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Россия), свинца (1 г/дм³, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Россия), хрома (1 мг/дм³, ООО «Центр стандартных образцов и высокочистых веществ», Россия) и никеля (1 г/дм³, ООО «Центр стандартных образцов и высокочистых веществ», Россия).

Статистическую обработку данных проводили с помощью пакета анализа данных Statistics программы Microsoft Excel. В табл. 1 приведены средние величины со стандартным отклонением.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты определения тяжелых металлов демонстрируют изменчивость и варьирование элементного состава у разных видов изученных растений, что, вероятно, зависит от почвообразующих процессов, техногенного загрязнения, физико-географических особенностей регионов (климатических условий, состава почвообразующих пород и растений) и местопроизрастания [6, 23] (см. табл. 1).

Растения наиболее эффективно накапливают максимальное количество тяжелых металлов из атмосферного воздуха в конце фазы летнего покоя (вторая половина августа). В это время растению требуется минимальное количество питательных веществ, которые оно берет из почвы. Стебли и листья многолетних трав активно накапливают на своей поверхности аэрозоли и мелкодисперсную пыль за счет растительных выделений с образованием слизистой пленки, активно адсорбирующей ионы тяжелых металлов [24].

На основании полученных данных составлены ряды накопления химических элементов, которые показывают, что отдельные виды растений различаются по способности накапливать тяжелые металлы (табл. 2).

Исследования показали, что в большей степени растительное сырье накапливает никель (см. табл. 2). Возможно, это связано с тем, что никель легко извлекается из почв растениями и, пока его концентрация в растительных органах и тканях не достигнет критических значений, темпы поглощения этого элемента положительно коррелируют с содержанием в почвах [23]. Максимальное содержание никеля найдено в чернотравке обыкновенной и составляет 7,45 мг/кг, что в 6,5 раза больше его содержания в пырее ползучем. Сравнение с данными санитарных норм³, государственного стандарта² и литературных источников [6] показало,

Таблица 1. Содержание элементов в надземной части растений, произрастающих в долине реки Большой Юган

Table 1. Element content in the aboveground parts of plants growing in the river Big Yugan valley

Название растения	Содержание тяжелых металлов, мг/кг (n = 3; P = 0,95)			
	Ni	Pb	Cr	Cd
<i>Prunella vulgaris</i>	7,45±0,08	2,25±0,03	1,90±0,02	0,17±0,01
<i>Phalaroides arundinacea</i>	6,16±0,27	4,30±0,19	1,83±0,05	0,68±0,02
<i>Rumex acetosella</i>	5,82±0,04	3,61±0,01	1,85±0,09	1,18±0,05
<i>Carex vesicaria</i>	5,48±0,33	3,84±0,01	2,36±0,32	0,56±0,03
<i>Chamaenerion angustifolium</i>	4,24±0,02	2,16±0,02	1,36±0,05	0,29±0,01
<i>Veronica longifolia</i>	4,04±0,11	2,32±0,15	1,10±0,03	0,27±0,01
<i>Vicia cracca</i>	3,70±0,17	1,19±0,17	1,08±0,05	0,67±0,04
<i>Equisetum arvense</i>	3,31±0,25	1,60±0,08	2,08±0,02	0,71±0,02
<i>Carex acuta</i>	2,72±0,39	1,69±0,06	0,91±0,04	0,75±0,03
<i>Artemisia vulgaris</i>	2,58±0,25	2,43±0,11	2,03±0,06	1,08±0,06
<i>Potentilla anserina</i>	2,30±0,09	2,43±0,15	1,58±0,02	0,77±0,03
<i>Trifolium pratense</i>	2,26±0,02	2,79±0,02	1,08±0,02	0,24±0,01
<i>Plantago major</i>	1,83±0,01	5,73±0,15	1,47±0,00	(0,80±0,03)×10 ⁻¹
<i>Elytrigia repens</i>	1,41±0,03	0,85±0,03	2,81±0,04	2,25±0,05
<i>Galium palustre</i>	1,14±0,01	2,49±0,02	3,04±0,08	0,67±0,04

²ГОСТ 30178-96. Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов. М.: Стандартинформ, 1996. 10 с.

³СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М.: Издательство стандартов, 2002. 180 с.

Таблица 2. Ряды накопления химических элементов в надземной фитомассе растений, произрастающих в долине реки Большой Юган

Table 2. Series of chemical elements accumulation in the aboveground phytomass of plants growing in the river Big Yugan valley

Название растения	Ряды накопления
<i>Prunella vulgaris</i>	Ni > Pb > Cr > Cd
<i>Phalaroides arundinacea</i>	Ni > Pb > Cr > Cd
<i>Rumex acetosella</i>	Ni > Pb > Cr > Cd
<i>Carex vesicaria</i>	Ni > Pb > Cr > Cd
<i>Chamaenerion angustifolium</i>	Ni > Pb > Cr > Cd
<i>Veronica longifolia</i>	Ni > Pb > Cr > Cd
<i>Vicia cracca</i>	Ni > Pb > Cr > Cd
<i>Equisetum arvense</i>	Ni > Cr > Pb > Cd
<i>Carex acuta</i>	Ni > Pb > Cr > Cd
<i>Artemisia vulgaris</i>	Ni > Pb > Cr > Cd
<i>Potentilla anserina</i>	Pb > Ni > Cr > Cd
<i>Trifolium pratense</i>	Pb > Ni > Cr > Cd
<i>Plantago major</i>	Pb > Ni > Cr > Cd
<i>Elytrigia repens</i>	Cr > Cd > Ni > Pb
<i>Galium palustre</i>	Cr > Pb > Ni > Cd

что содержание никеля в исследованных образцах находится в пределах допустимых значений (до 9,0 мг/кг сухого вещества).

Содержание свинца в растениях варьирует под действием различных факторов среды (геохимические аномалии, загрязнения, сезонные поливы, способность генотипов накапливать свинец). Тем не менее естественные уровни содержания свинца в растениях незагрязненных территорий находятся в пределах от 0,1 до 10,0 мг/кг сухой массы (среднее значение 2 мг/кг) [23]. В рядах накопления химических элементов (см. табл. 2) свинец стоит на втором месте и его содержание варьирует от 0,85 до 5,73 мг/кг. Причем максимальное содержание свинца найдено у подорожника большого (см. табл. 1). Вероятно, это можно объяснить тем, что данный вид растений произрастает вблизи дорог и отличается высокой толерантностью к воздействию свинца, а также способен аккумулировать его в больших количествах. В целом содержание свинца в пойменных видах исследованных растений находится в пределах нормы и

не превышает предельно допустимой концентрации (10 мг/кг сухого вещества) [23].

Преимущественное накопление хрома обнаружено в надземной части подмаренника болотного (3,04 мг/кг) и пырея ползучего (2,81 мг/кг), что в 3 раза больше его содержания в осоке острой (0,91 мг/кг). Симптомы токсичности при действии хрома проявляются в увядании надземной фитомассы растений, повреждении корневой системы, хлорозе молодых листьев. В литературе встречаются данные о повышенном содержании хрома в растениях, и это связывают с антропогенными источниками. Средние концентрации хрома 17 мг/кг были выявлены в надземной массе растений, произрастающих вблизи городских улиц, а в золе полыни трехзубчатой, произрастающей в окрестностях завода по производству фосфорных удобрений, данный показатель составил 500 мг/кг [23].

Согласно составленным рядам накопления элементов, кадмий накапливается в растительном материале в меньшей степени (см. табл. 2). Известно, что кадмий не входит в число необходимых для растений элементов, однако он эффективно поглощается как корнями, так и листьями. Поскольку растения легко извлекают кадмий и из почвенных, и из воздушных источников, его концентрация в них быстро возрастает [23]. Подобное наблюдали на примере пырея ползучего, у которого было выявлено максимальное содержание кадмия в надземной части 2,25 мг/кг, что в 13 раз превышает его содержание в растительном сырье черноголовки обыкновенной (см табл. 1). В целом следует отметить, что содержание кадмия в надземной фитомассе всех изученных растений, за исключением пырея ползучего, находится в пределах нормы и соответствует предельно допустимой концентрации (1,0 мг/кг сухой массы) [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показаны особенности аккумуляции тяжелых металлов отдельными видами растений: двукисточник тростниковидный лучше поглощает никель и свинец, черноголовка обыкновенная – никель, подорожник большой – свинец, пырей ползучий – хром и кадмий, подмаренник болотный – хром. Избирательное поглощение этих тяжелых металлов может быть связано с высокой техногенной нагрузкой, так как некоторые виды растений произрастают вблизи дорог и отличаются высокой толерантностью к воздействию никеля и свинца, поэтому способны аккумулировать их в больших количествах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kanwar V.S., Sharma A., Srivastav A.L., Rani L. Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27, no. 36. P. 44835–44860. DOI: 10.1007/s11356-020-10713-3.
2. Okereafor U., Makhatha M., Mekuto L., Uche-Okereafor N., Sebola T., Mavumengwana V. Toxic metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17, no. 7. P. 2204. DOI: 10.3390/ijerph17072204.
3. Chaplygin V., Mandzhieva S., Minkina T., Suschkova S., Kizilkaya R., Gülser C., et al. Sustainability of agricultural and wild cereals to aerotechnogenic exposure // Environmental Geochemistry and Health. 2021. Vol. 43, no. 4. P. 1427–1439. DOI: 10.1007/s10653-019-00411-6.
4. Pujari M., Kapoor D. Heavy metals in the ecosystem: sources and their effects // Heavy Metals in the Environment / eds V. Kumar, A. Sharma, A. Cerdà. Elsevier, 2021. P. 1–7. DOI: 10.1016/B978-0-12-821656-9.00001-8.
5. Yaashikaa P.R., Senthil Kumar P., Jeevanantham S., Saravanan R.A. Review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants // Environmental Pollution. 2022. Vol. 301. P. 119035. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119035.
6. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растения: монография. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.

7. Feki K., Tounsi S., Mrabet M., Mhadhbi H., Brini F. Recent advances in physiological and molecular mechanisms of heavy metal accumulation in plants // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, no. 46. P. 64967–64986. DOI: 10.1007/s11356-021-16805-y.

8. Dinu C., Vasile G.-G., Buleandra M., Popa D.E., Gheorghe S., Ungureanu E.-M. Translocation and accumulation of heavy metals in *Ocimum basilicum* L. plants grown in a mining-contaminated soil // *Journal of Soils and Sediments*. 2020. Vol. 20. P. 2141–2154. DOI: 10.1007/s11368-019-02550-w.

9. Ягодин Б.А., Виноградова С.Б., Говорина В.В. Кадмий в системе почва – удобрения – растения – животные организмы и человек // *Агрохимия*. 1989. N 5. С. 118–130.

10. Chen Y.-G., He H.-L.-S., Huang J.-H., Luo R., Ge H.-Z., Wołowicz A., et al. Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 219. P. 112336. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112336.

11. Ilinskiy A., Vinogradov D., Politaeva N., Badenko V., Ilin I. Features of the phytoremediation by agricultural crops of heavy metal contaminated soils // *Agronomy*. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 127. DOI: 10.3390/agronomy13010127.

12. Alengebawy A., Abdelkhalek S.T., Qureshi S.R., Wang M.-Q. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications // *Toxics*. 2021. Vol. 9, no. 3. P. 42. DOI: 10.3390/toxics9030042.

13. Yang C.-M., Chien M.-Y., Chao P.-C., Huang C.-M., Chen C.-H. Investigation of toxic heavy metals content and estimation of potential health risks in Chinese herbal medicine // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 412. P. 125142. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125142.

14. Vinogradova N., Glukhov A., Chaplygin V., Kumar P., Mandzhieva S., Minkina T., et al. The content of heavy metals in medicinal plants in various environmental conditions: a review // *Horticulturae*. 2023. Vol. 9, no. 2. P. 239. DOI: 10.3390/horticulturae9020239.

15. Определитель растений Ханты-Мансийского автономного округа / под ред. И.М. Красноборова. Новосибирск – Екатеринбург: Баско, 2006. 304 с.

16. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 6: Семейства Butomaceae – Typhaceae / отв. ред. А.А. Буданцев. СПб. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 391 с.

17. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 4. Семейства Caprifoliaceae – Lobeliaceae / отв. ред. А.А. Буданцев. СПб. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 630 с.

18. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 2. Семейства Actinidiaceae – Malvaceae, Euphorbiaceae – Haloragaceae / отв. ред. А.А. Буданцев. СПб. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. 513 с.

19. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 3. Семейства Fabaceae – Apiaceae / отв. ред. А.А. Буданцев. СПб. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 601 с.

20. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 5. Семейства Asteraceae (Compositae). Ч. 1. Роды Achillea – Doronicum / отв. ред. А.А. Буданцев. СПб. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 317 с.

21. Растительные ресурсы России: Компонентный состав и биологическая активность растений. Т. 7. Отделы Lycopodiophyta – Gnepophyta / отв. ред. А.А. Буданцев. СПб. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 333 с.

22. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 1. Семейства Magnoliaceae – Juglandaceae, Ulmaceae, Moraceae, Cannabaceae, Urticaceae / отв. ред. А.А. Буданцев. СПб. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 421 с.

23. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.

24. Kryuchenko N., Zhovinsky E., Paparyga P. Using the bioindication method for determining air pollution by heavy metals // *Geo&Bio*. 2022. Vol. 22. P. 144–149. DOI: 10.15407/gb2211.

REFERENCES

1. Kanwar V.S., Sharma A., Srivastav A.L., Rani L. Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(36):44835–44860. DOI: 10.1007/s11356-020-10713-3.

2. Okereafor U., Makhatha M., Mekuto L., Uche-Okereafor N., Sebola T., Mavumengwana V. Toxic metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(7):2204. DOI: 10.3390/ijerph17072204.

3. Chaplygin V., Mandzhieva S., Minkina T., Sushkova S., Kizilkaya R., Gülser C., et al. Sustainability of agricultural and wild cereals to aerotechnogenic exposure. *Environmental Geochemistry and Health*. 2021;43(4):1427–1439. DOI: 10.1007/s10653-019-00411-6.

4. Pujari M., Kapoor D. Heavy metals in the ecosystem: sources and their effects. In: Kumar V., Sharma A., Cerdà A. (eds). *Heavy Metals in the Environment*. Elsevier; 2021. p. 1–7. DOI: 10.1016/B978-0-12-821656-9.00001-8.

5. Yaashikaa P.R., Senthil Kumar P., Jeevanantham S., Saravanan R.A. Review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants. *Environmental Pollution*. 2022;301:119035. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119035.

6. Il'in V.B. *Heavy metals in the soil-plant system*. Novosibirsk: Nauka; 1991, 151 p. (In Russian).

7. Feki K., Tounsi S., Mrabet M., Mhadhbi H., Brini F. Recent advances in physiological and molecular mechanisms of heavy metal accumulation in plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(46):64967–64986. DOI: 10.1007/s11356-021-16805-y.

8. Dinu C., Vasile G.-G., Buleandra M., Popa D.E., Gheorghe S., Ungureanu E.-M. Translocation and accumulation of heavy metals in *Ocimum basilicum* L. plants grown in a mining-contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*. 2020;20:2141–2154. DOI: 10.1007/s11368-019-02550-w.

9. Yagodin B.A., Vinogradova S.B., Govorina V.V. Cadmium in the system soil – fertilizers – plants – animals and humans. *Agrokhimiya*. 1989;5:118-130. (In Russian).

10. Chen Y.-G., He H.-L.-S., Huang J.-H., Luo R., Ge H.-Z., Wołowicz A., et al. Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;219:112336. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112336.

11. Ilinskiy A., Vinogradov D., Politaeva N., Badenko V., Ilin I. Features of the phytoremediation by agricultural crops of heavy metal contaminated soils. *Agronomy*. 2023;13(1):127. DOI: 10.3390/agronomy13010127.

12. Alengebawy A., Abdelkhalek S.T., Qureshi S.R., Wang M.-Q. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications. *Toxics*. 2021;9(3):42. DOI: 10.3390/toxics9030042.

13. Yang C.-M., Chien M.-Y., Chao P.-C., Huang C.-M., Chen C.-H. Investigation of toxic heavy metals content and estimation of potential health risks in Chinese herbal medicine. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;412:125142. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125142.

14. Vinogradova N., Glukhov A., Chaplygin V., Kumar P., Mandzhieva S., Minkina T., et al. The content of heavy metals in medicinal plants in various environmental conditions: a review. *Horticulturae*. 2023;9(2):239. DOI: 10.3390/horticulturae9020239.

15. Krasnoborodov I.M. *Key to plants of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug*. Novosibirsk – Ekaterinburg: Basko; 2006, 304 p. (In Russian).

16. Budantsev A.L. *Plant resources of Russia: Wild flowering plants, their composition and biological activity*. Vol. 6. Families *Butomaceae* – *Typhaceae*. St. Petersburg – Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2014, 391 p. (In Russian).

17. Budantsev A.L. *Plant resources of Russia: Wild*

flowering plants, their composition and biological activity. Vol. 4. Families *Caprifoliaceae* – *Lobeliaceae*. St. Petersburg – Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2011, 630 p. (In Russian).

18. Budantsev A.L. *Plant resources of Russia: Wild flowering plants, their composition and biological activity*. Vol. 2. Families *Actinidiaceae* – *Malvaceae*, *Euphorbiaceae* – *Haloragaceae*. St. Petersburg – Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2009, 513 p. (In Russian).

19. Budantsev A.L. *Plant resources of Russia: Wild flowering plants, their composition and biological activity*. Vol. 3. *Fabaceae* – *Apiaceae* families. St. Petersburg – Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2010, 601 p. (In Russian).

20. Budantsev A.L. *Plant resources of Russia: Wild flowering plants, their composition and biological activity*. Vol. 5. Families *Asteraceae* (*Compositae*). Part 1. Genera *Achillea* – *Doronicum*. St. Petersburg – Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2012, 317 p. (In Russian).

21. Budantsev A.L. *Plant resources of Russia: component composition and biological activity of plants*. Vol. 7. Divisions of *Lycopodiophyta* – *Gnetophyta*. St. Petersburg – Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2016, 333 p. (In Russian).

22. Budantsev A.L. *Plant resources of Russia: Wild flowering plants, their composition and biological activity*. Vol. 1. Families *Magnoliaceae* – *Juglandaceae*, *Ulmaceae*, *Moraceae*, *Cannabaceae*, *Urticaceae*. St. Petersburg – Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2008, 421 p. (In Russian).

23. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants; 1984, 344 p. (Russ. ed.: *Микроэлементы в почвах и растениях*. Moscow: Mir; 1989, 439 p.).

24. Kryuchenko N., Zhovinsky E., Paparyga P. Using the bioindication method for determining air pollution by heavy metals. *Geo&Bio*. 2022;22:144-149. DOI: 10.15407/gb2211.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кравченко Инесса Вячеславовна,
к.б.н., старший научный сотрудник,
Сургутский государственный университет,
628400, г. Сургут, пр. Ленина, 1,
Российская Федерация,
kravchenko_iv@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5050-6622>

Мулюкин Максим Александрович,
младший научный сотрудник,
Сургутский государственный университет,
628400, г. Сургут, пр. Ленина, 1,
Российская Федерация,
✉ mulyukin_ma@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7064-2469>

Петрова Юлия Юрьевна,
к.х.н., доцент, директор Института
естественных и технических наук,
Сургутский государственный университет,
628400, г. Сургут, пр. Ленина, 1,
Российская Федерация,
petrova_juju@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Inessa V. Kravchenko,
Cand. Sci. (Biological), Senior Researcher,
Surgut State University,
1, Lenin Ave., Surgut, 628412,
Russian Federation,
kravchenko_iv@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5050-6622>

Maxim A. Mulyukin,
Junior Researcher,
Surgut State University,
1, Lenin Ave., Surgut, 628412,
Russian Federation,
✉ mulyukin_ma@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7064-2469>

Yuliya Yu. Petrova,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Director of the Institute of Natural
and Technical Sciences,
Surgut State University,
1, Lenin Ave., Surgut, 628412,
Russian Federation,
petrova_juju@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>

Шепелева Людмила Федоровна,
д.б.н., профессор, старший научный сотрудник,
Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36,
Российская Федерация,
shepelevalf@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8805-469X>

Ludmila F. Shepeleva,
Dr. Sci. (Biology), Professor, Senior Researcher,
National Research Tomsk State University,
36, Lenin Ave, Tomsk, 634050,
Russian Federation,
shepelevalf@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8805-469X>

Вклад авторов

И.В. Кравченко – проведение экспериментов, обработка полученных данных, обсуждение результатов, написание текста статьи.
М.А. Мулюкин – проведение экспериментов, обсуждение результатов, написание текста статьи.
Ю.Ю. Петрова – постановка задачи, разработка концепции исследования, обсуждение результатов.
Л.Ф. Шепелева – разработка методологии исследований, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.07.2023.
Одобрена после рецензирования 25.12.2023.
Принята к публикации 31.05.2024.

Contribution of the authors

Inessa V. Kravchenko – conducting experiments, processing the data obtained, results discussion, preparing the manuscript.
Maxim A. Mulyukin – conducting experiments, results discussion, preparing the manuscript.
Yuliya Yu. Petrova – problem formulation, research concept development, results discussion.
Ludmila F. Shepeleva – research methodology development, results discussion, preparing the manuscript.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 27.07.2023.
Approved after reviewing 25.12.2023.
Accepted for publication 31.05.2024.