



DOI 10.23859/estr-230227

EDN KYVYZQ

УДК 58.02+58.009

Краткое сообщение

Видовые особенности биоаккумуляции тяжелых металлов листвой тополя *Populus canadensis* Moench и ясеня *Fraxinus americana* L. в условиях урбоэкосистемы

Г.И. Березин^{ID}, А.С. Олькова*^{ID}

Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36

*usr08617@vyatsu.ru

Аннотация. Поиск растений-концентраторов тяжелых металлов (ТМ) имеет значение с диагностической и ремедиационной сторон. В ходе работы были измерены валовые содержания Cd, Zn, Ni, Cu, Pb в листьях тополя канадского *Populus canadensis* Moench и ясеня американского *Fraxinus americana* L. – деревьев, часто используемых в озеленении населенных мест. Методом атомно-абсорбционной спектроскопии исследованы воздушно-сухие биопробы листьев деревьев, собранные в течение одного вегетационного сезона на 5 участках, расположенных на территории г. Кирова (Россия, Кировская область). Показано, что в листьях тополя в большей степени аккумулировался цинк, максимальное накопление которого установлено в промышленных зонах города. Листья ясеня в большей степени накапливали медь и свинец, содержание которых было высоким на всех участках.

Ключевые слова: антропогенное загрязнение, городская растительность, бионакопление, кадмий, цинк, никель, медь, свинец

ORCID:

Г.И. Березин, <https://orcid.org/0000-0002-0603-0652>

А.С. Олькова, <https://orcid.org/0000-0002-5798-8211>

Для цитирования: Березин, Г.И., Олькова, А.С., 2024. Видовые особенности биоаккумуляции тяжелых металлов листвой тополя *Populus canadensis* Moench и ясеня *Fraxinus americana* L. в условиях урбоэкосистемы. *Трансформация экосистем* 7 (2), 12–18. <https://doi.org/10.23859/estr-230227>

Поступила в редакцию: 27.12.2023

Принята к печати: 24.03.2023

Опубликована онлайн: 17.05.2024

DOI 10.23859/estr-230227

EDN KYVYZQ

UDC 58.02+58.009

Short communication

Species features of bioaccumulation of heavy metals in leaves of poplar *Populus canadensis* Moench and ash *Fraxinus americana* L. in the urban ecosystem

G.I. Berezin , A.S. Olkova* 

Vyatka State University, ul. Moskovskaya 36, Kirov, 610000 Russia

*usr08617@vyatsu.ru

Abstract. The search for heavy metal concentrator plants is important in terms of diagnostics and remediation. In the course of the work, the gross contents of Cd, Zn, Ni, Cu, Pb were measured in the leaves of poplar *Populus Canadensis* Moench and ash *Fraxinus Americana* L. These trees are often used in the landscaping of populated areas. Air-dry samples of tree leaves collected during one growing season at 5 sites located on the territory of Kirov (Russia, Kirov oblast) were studied by atomic absorption spectroscopy. Zinc was accumulated to a greater extent in poplar leaves. Maximum accumulation of zinc was noted in the industrial areas of the city. Ash leaves largely accumulated copper and lead, the content of which was high throughout.

Keywords: anthropogenic pollution, urban vegetation, bioaccumulation, cadmium, zinc, nickel, copper, lead

ORCID:

G.I. Berezin, <https://orcid.org/0000-0002-0603-0652>

A.S. Olkova, <https://orcid.org/0000-0002-5798-8211>

To cite this article: Berezin, G.I., Olkova, A.S., 2024. Species features of bioaccumulation of heavy metals in leaves of poplar *Populus canadensis* Moench and ash *Fraxinus americana* L. in the urban ecosystem. *Ecosystem Transformation* 7 (2), 12–18. <https://doi.org/10.23859/estr-230227>

Received: 27.12.2023

Accepted: 24.03.2023

Published online: 17.05.2024

Введение

Изучение части биогехимического цикла тяжелых металлов (ТМ) в системе «почва – растение» весьма актуально, поскольку многие отрасли хозяйства не могут исключить эти распространенные поллютанты из производственных циклов, вследствие чего они распространяются в окружающей среде, вызывая различные экологические последствия. На сегодняшний день известны и убедительно доказаны основные закономерности, отражающие способность ТМ мигрировать в растение: биодоступность ТМ увеличивается с повышением кислотности почвы, миграционная способность ТМ снижается в почве, богатой органическими веществами, многолетние растения в большей степени накапливают ТМ, чем однолетние (Ильин, 2012; Климова, 1999; Hazardous and trace materials..., 2022).

Современные исследования акцентируют внимание на экосистемных последствиях миграции ТМ в системе «почва–растение». Так, у тополя юннанского *Populus yunnanensis* Dode, произрастающего на почве, загрязненной кадмием, было снижено содержание летучих органических соединений в листьях, вследствие чего листогрызущие насекомые избегали эти растения (Lin et al., 2022). Доказано, что симбиотические грибы в микоризе древесных растений являются естественными биофильтрами, снижающими токсическое действие ТМ (Szuba et al., 2020).

Данные о модификации экологических взаимодействий под влиянием токсического стресса нуждаются в дополнении сведениями о видах растений, наиболее устойчивых к имеющемуся загрязнению и, возможно, способствующих фиторемедиации почв, насыщенных поллютантами. Так, в Италии получены положительные результаты фиторемедиации почв, загрязненных ТМ, с помощью посадок тополя клона Monviso (гибрид тополя благородного *Populus generosa* Henry и тополя черного *P. nigra* L.) по показателям фитостабилизации ТМ, улучшения качества почвы как с точки зрения содержания органического углерода, так и структуры и активности микробного сообщества (Ancona et al., 2020).

Целью нашей работы было определение видовых особенностей накопления ТМ листвой тополя канадского *Populus canadensis* Moench и ясеня американского *Fraxinus americana* L. за вегетационный период в городской экосистеме.

Материалы и методы

Участки исследований располагались в пределах урбоэкосистемы г. Кирова (Кировская область, Россия), расположенной в зоне южной тайги, подзоне хвойно-широколиственных лесов. Всего было выделено 5 участков размерами 25×25 м: один в городском парке (парк Победы), три – в скверах транспортно-промышленных зон (районах машиностроительного завода «ВМП «Авитек», электромашиностроительного завода «Лепсе», АО «Кировский завод по обработке цветных металлов» (ОЦМ)), а также один участок на условно фоновой территории – лесопарковой зоне на окраине города (Дендропарк).

На каждом участке в сентябре 2021 г. были отобраны листья тополя *P. canadensis* и ясеня *F. americana*. Всего было использовано по 10 деревьев выбранных видов на каждом участке; с каждого дерева отбирали по 10 листьев. Листья, отобранные на участке, представляли объединенную пробу (100 шт.), которая усреднялась путем механической гомогенизации. В биомассе листьев, высушенных до воздушно-сухого состояния, определяли валовое содержание ТМ (Cd, Zn, Ni, Cu, Pb) на атомно-абсорбционном спектрометре «Спектр-5» (Россия) согласно общепринятой методике¹. Результат анализа представляли как среднее значение содержания элемента между двумя параллельными пробами с погрешностью согласно методике.

Поскольку санитарно-гигиеническое нормирование содержания ТМ в растениях предусмотрено только для сельскохозяйственных растений, полученные нами данные о содержании химических элементов в биомассе листьев сравнивались с минимальными значениями токсического уровня биоаккумуляции, предложенного А. Кабата-Пендиас (2010) для биомассы растений.

Достоверность результатов обеспечивалась минимально необходимыми объемами отбора биопроб, выполнением анализов в аккредитованной лаборатории Вятского государственного университета (г. Киров), соблюдением требований к условиям выполнения подобных анализов, аналитическими повторностями и оценкой приемлемости разницы между ними.

¹ Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных и продуктивных растениеводства, 1992. Издание 2-е, переработанное и дополненное. ЦИНАО, Москва, Россия, 63 с.

Результаты и их обсуждение

Наши данные показывают, что тополь в большей степени аккумулирует цинк (Рис. 1), тогда как в листьях ясеня происходит накопление меди и свинца (Рис. 2). Проявление этих тенденций варьировало для разных исследованных участков. Так, накопление цинка в листьях тополя тяготело к скверам вблизи заводов, деятельность которых связана с разными циклами обработки металлов.

Согласно А. Kabata-Pendias (2010), минимальные значения токсического уровня биоаккумуляции ТМ в древесных растениях составляют 5 мг/кг для кадмия, 100 мг/кг для цинка, 10 мг/кг для никеля, 20 мг/кг для меди и 30 мг/кг для свинца. Таким образом, значимые токсичные уровни накопления достигнуты вблизи завода «Лепсе» (превышение составило 2.23 раза) и «Авитек» (1.92 раза), где также выявлены значительные концентрации подвижных форм цинка в почве: 30 ± 10 мг/кг и 6.2 ± 2.1 мг/кг соответственно (в условно фоновой почве – 1.1 ± 0.4 мг/л) (Горностаева и др., 2022). На этих же промышленных участках листья другого растения – ясеня – также аккумулировали цинк в большей мере, чем никель и кадмий, однако уровень накопления оставался в пределах 0.26–0.53 от условного ориентира.

Наши данные о склонности деревьев рода *Populus* к значительной аккумуляции цинка подтверждаются сведениями других исследователей. По физиологическим реакциям (газообмену, количеству хлорофилла и каротиноидов, росту корней) тополь черный *Populus nigra* L. был более чувствительным к гидропонному воздействию цинка, чем ива Матсуды *Salix matsudana* L. (Palm et al., 2021). Механизм накопления цинка листьями тополя показан в работе Y. Suo et al. (2021): тополь дельтовидный *Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall сорта «Xianglin 90», выращенный на хвостохранилище шахты, увеличивал ризосферную подвижность Cd и Zn на 5.49% и 4.29% соответственно по сравнению с общим объемом почвы. Это объясняет способность тополя к бионакоплению и транслокации данных металлов в системе «корень–побег».

Вместе с тем для ясеня обыкновенного *Fraxinus excelsior* L. встречаются опубликованные данные о незначительном накоплении Cd, Cu, Pb и Zn в условиях металлического загрязнения почвы (Mertens et al., 2004). Расхождения наших результатов с этими сведениями могут быть вызваны действием экологических факторов (минерального состава почвы, влажности, среднегодовой температуры), влияющих на биодоступность металлов и их накопление в частях растений.

Растения аккумулируют ТМ как из воздуха, так и из почвы. Атмосфера может быть прямым источником загрязняющих веществ на поверхности листьев (адсорбция) и в их внутренних тканях (истинная аккумуляция). В период исследования средние и среднемесячные концентрации аэрозолей тяжелых металлов в атмосферном воздухе не превышали допустимых норм². Однако выбросы предприятий в пределах установленных нормативов наряду с автотранспортной нагрузкой, вероятно, являются причиной неоднородного накопления ТМ в почвах г. Кирова. Было показано, что почва вблизи машиностроительного предприятия ОАО «Авитек» и в районе ОАО «Кировский завод по обработке цветных металлов» (ОЦМ) накапливает достоверно большее количество металлов, чем почва условно фоновой территории в Дендропарке: для цинка на этих участках наблюдались концентрации 6.2 ± 2.1 , 36 ± 12 и 1.1 ± 0.4 мг/кг соответственно, для меди – 0.50 ± 0.10 , 6.0 ± 1.4 и 0.06 ± 0.02 мг/кг (Горностаева и др., 2022). При этом наши данные показывают, что биоаккумуляция ТМ листьями ясеня часто находится на одном уровне с фоном, а в случае с цинком и медью фоновые растения накопили больше элементов, чем листья деревьев на других участках города (Рис. 2). По-видимому, повышенная биоаккумуляция ясенем меди и свинца носит видоспецифичный характер, когда накопление элемента происходит вне зависимости от загрязнения, то есть по типу истинного концентратора. Повышенная миграция ТМ из почвы условно фоновой территории в листья ясеня может быть связана с уровнем pH верхнего почвенного горизонта (Горностаева и др., 2022) – 4.9 ± 0.2 ед. pH по сравнению с 6.1–7.1 на других городских участках. Известно, что кислая реакция среды способствует увеличению концентрации биодоступных форм многих микроэлементов в почвенном растворе (Hazardous and trace materials..., 2022).

Видовая специфика биоаккумуляции различных ТМ древесными растениями известна для *Populus nigra*, который является лучшим растением-аккумулятором для Mn, Zn и Cd, туи восточной *Thuja orientalis* (L.) Endlicher – фитоэкстрактора в отношении Fe, кипариса вечнозеленого *Cupressus sempervirens* L. – биоаккумулятора Pb (Saba et al., 2015). Механизмы различий в отно-

² О состоянии окружающей среды Кировской области в 2021 году, 2022. Региональный доклад. Министерство охраны окружающей среды Кировской области, Киров, Россия.

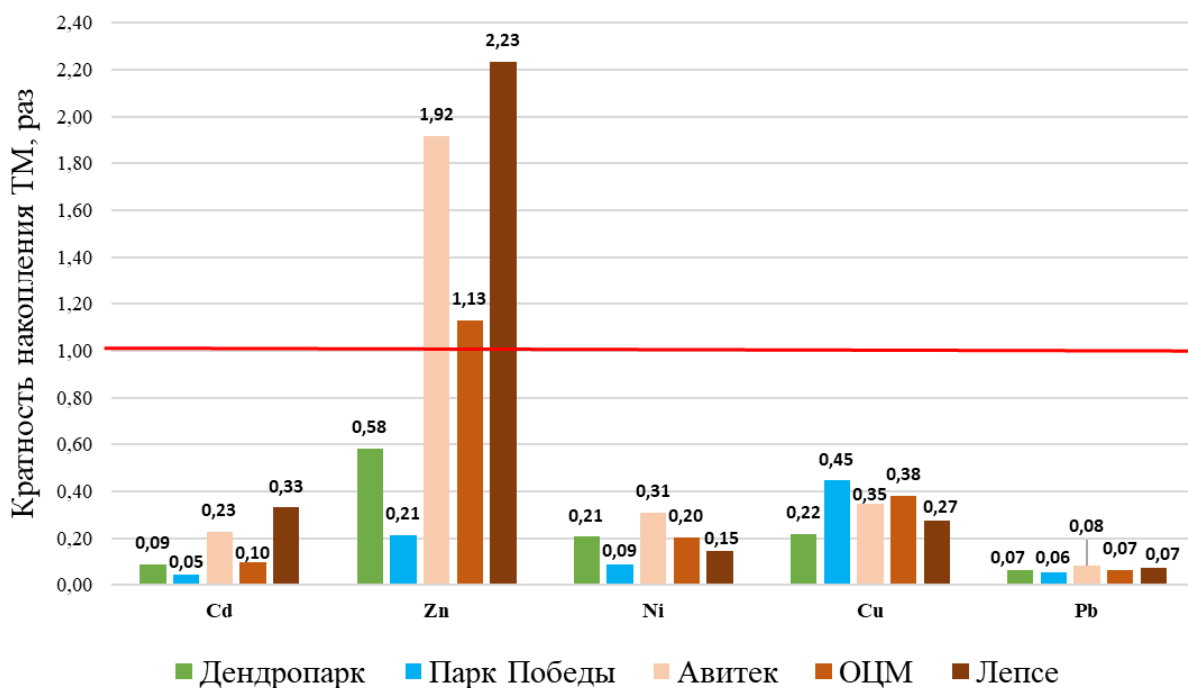


Рис. 1. Кратность накопления ТМ листьями тополя *P. canadensis* относительно минимального токсичного уровня содержания по Kabata-Pendias, 2010 (обозначен красной линией).

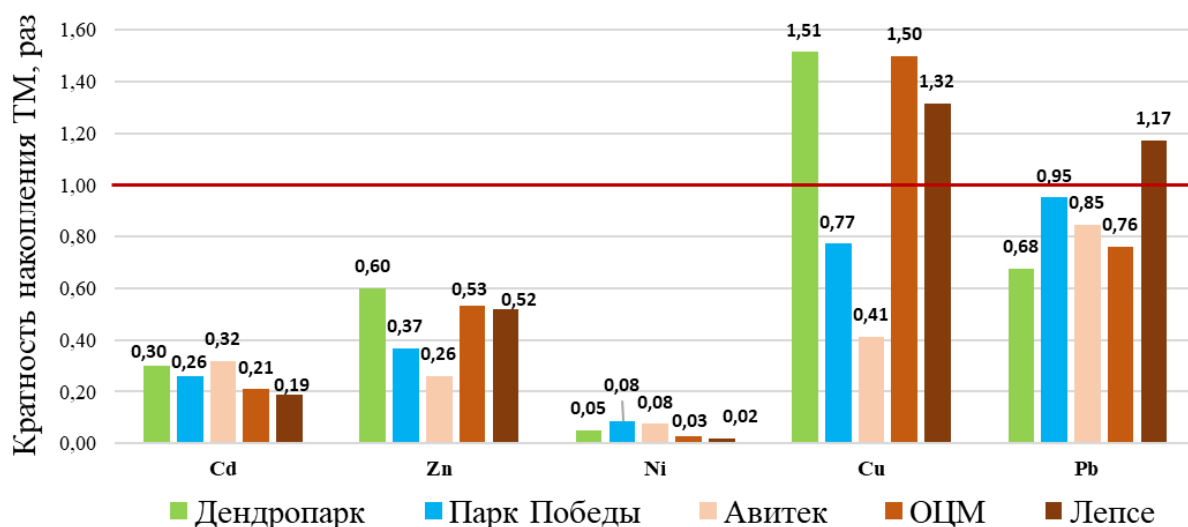


Рис. 2. Кратность накопления ТМ листьями ясеня *F. americana* относительно минимального токсичного уровня содержания по Kabata-Pendias, 2010 (обозначен красной линией).

шени накопления одних металлов и меньшей аккумуляции других объясняются уровнем экспрессии гена MTP, который кодирует белок CDF (фасилитатор диффузии катионов), влияющий на транспорт ТМ по флоэме дерева (Yang et al., 2021).

Выводы

Впервые показано, что деревья, распространенные в городском озеленении – тополь канадский и ясень американский – обладают видовыми особенностями биоаккумуляции ТМ в своей листве. Листва тополя накапливает цинк при условии произрастания деревьев на почве с признаками металлического загрязнения. Ясень может транспортировать медь и свинец в листья вне

зависимости от загрязнения почвы данными элементами. Эти начальные сведения могут быть полезны при разработке мероприятий по фиторемедиации антропогенно нагруженных городских почв. Для подтверждения выявленных тенденций и количественного описания их динамики необходимо проведение многолетних исследований.

Список литературы

- Горностаева, Е.А., Березин, Г.И., Дабах, Е.В., 2022. Тяжелые металлы в снежном покрове и городских почвах. *Теоретическая и прикладная экология* 3, 110–115. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-110-117>
- Ильин, В.Б., 2012. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Издательство Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия, 218 с.
- Климова, Е.В., 1999. Тяжелые металлы в системе почва–растение. *Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал* 4, 770.
- Ancona, V., Caracciolo, A.B., Campanale, C., Rascio, I., Grenni, P. et al., 2020. Heavy metal phytoremediation of a poplar clone in a contaminated soil in southern Italy. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 95 (4), 940–949. <http://www.doi.org/10.1002/jctb.6145>
- Hazardous and trace materials in soil and plants: sources, effects and management, 2022. Naeem M. et al. (eds.). <https://doi.org/10.1016/C2021-0-00053-5>
- Kabata-Pendias, A., 2010. Trace elements in soils and plants: Fourth edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York – London, USA – UK, 505 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Lin, T., Zhu, G., He, W., Xie, J., Li, S. et al., 2022. Soil cadmium stress reduced host plant odor selection and oviposition preference of leaf herbivores through the changes in leaf volatile emissions. *Science of the Total Environment* 814, 152728. <http://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152728>
- Mertens, J., Vervaeke, P., De Schrijver, A., Luysaert, S., 2004. Metal uptake by young trees from dredged brackish sediment: Limitations and possibilities for phytoextraction and phytostabilisation. *Science of the Total Environment* 326 (1–3), 209–215.
- Palm, E., Guidi Nissim, W., Mancuso, S., Azzarello, E., 2021. Split-root investigation of the physiological response to heterogeneous elevated Zn exposure in poplar and willow. *Environmental and Experimental Botany* 183, 104347. <http://www.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104347>
- Saba, G., Parizanganeh, A.H., Zamani, A., Saba, J., 2015. Phytoremediation of heavy metals contaminated environments: Screening for native accumulator plants in Zanjan-Iran. *International Journal of Environmental Research* 9 (1), 309–316.
- Suo, Y., Tang, N., Li, H., Corti, G., Jiang, L. et al., 2021. Long-term effects of phytoextraction by a poplar clone on the concentration, fractionation, and transportation of heavy metals in mine tailings. *Environmental Science and Pollution Research* 28 (34), 47528–47539. <http://www.doi.org/10.1007/s11356-021-13864-z>
- Szuba, A., Marczak, Ł., Kozłowski, R., 2020. Role of the proteome in providing phenotypic stability in control and ectomycorrhizal poplar plants exposed to chronic mild Pb stress. *Environmental Pollution* 264, 114585. <http://www.doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114585>
- Yang, F., Gao, Y., Liu, J., Chen, Z., de Dios, V.R. et al., 2021. Metal tolerance protein MTP6 is involved in Mn and Co distribution in poplar. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 226, 112868. <http://www.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112868>

References

- Ancona, V., Caracciolo, A.B., Campanale, C., Rascio, I., Grenni, P. et al., 2020. Heavy metal phytoremediation of a poplar clone in a contaminated soil in southern Italy. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* **95** (4), 940–949. <http://www.doi.org/10.1002/jctb.6145>
- Gornostaeva, E.A., Berezin, G.I., Dabakh, E.V., 2022. Tiazhelye metally v snezhnom pokrove i gorodskikh pochvakh [Heavy metals in snow cover and urban soils]. *Teoreticheskaja i prikladnaia ekologija [Theoretical and Applied Ecology]* **3**, 110–115. (In Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-110-117>
- Hazardous and trace materials in soil and plants: sources, effects and management, 2022. Naeem M. et al. (eds.). <https://doi.org/10.1016/C2021-0-00053-5>
- Ilyin, V.B., 2012. Tiazhelye metally i nemetally v sisteme pochva–rastenie [Heavy metals and non-metals in the soil-plant system]. Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, 218 p. (In Russian).
- Kabata-Pendias, A., 2010. Trace elements in soils and plants: Fourth edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York – London, USA – UK, 505 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Klimova, E.V., 1999. Tiazhelye metally v sisteme pochva–rastenie [Heavy metals in the soil-plant system]. *Ekologicheskaja bezopasnost' v APK. Referativnyi zhurnal [Environmental safety in the agro-industrial complex. Journal of Abstracts]* **4**, 770. (In Russian).
- Lin, T., Zhu, G., He, W., Xie, J., Li, S. et al., 2022. Soil cadmium stress reduced host plant odor selection and oviposition preference of leaf herbivores through the changes in leaf volatile emissions. *Science of the Total Environment* **814**, 152728. <http://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152728>
- Mertens, J., Vervaeke, P., De Schrijver, A., Luysaert, S., 2004. Metal uptake by young trees from dredged brackish sediment: Limitations and possibilities for phytoextraction and phytostabilisation. *Science of the Total Environment* **326** (1–3), 209–215.
- Palm, E., Guidi Nissim, W., Mancuso, S., Azzarello, E., 2021. Split-root investigation of the physiological response to heterogeneous elevated Zn exposure in poplar and willow. *Environmental and Experimental Botany* **183**, 104347. <http://www.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104347>
- Saba, G., Parizanganeh, A.H., Zamani, A., Saba, J., 2015. Phytoremediation of heavy metals contaminated environments: Screening for native accumulator plants in Zanjan-Iran. *International Journal of Environmental Research* **9** (1), 309–316.
- Suo, Y., Tang, N., Li, H., Corti, G., Jiang, L. et al., 2021. Long-term effects of phytoextraction by a poplar clone on the concentration, fractionation, and transportation of heavy metals in mine tailings. *Environmental Science and Pollution Research* **28** (34), 47528–47539. <http://www.doi.org/10.1007/s11356-021-13864-z>
- Szuba, A., Marczak, Ł., Kozłowski, R., 2020. Role of the proteome in providing phenotypic stability in control and ectomycorrhizal poplar plants exposed to chronic mild Pb stress. *Environmental Pollution* **264**, 114585. <http://www.doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114585>
- Yang, F., Gao, Y., Liu, J., Chen, Z., de Dios, V.R. et al., 2021. Metal tolerance protein MTP6 is involved in Mn and Co distribution in poplar. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **226**, 112868. <http://www.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112868>