Научная статья
УДК 581.192(574.24):582.623.2
DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-107-120

Элементный химический состав *Populus tremula* в условиях техногенных экосистем Кузбасса

Ю.В. Загурская*[1]✉, *канд. биол. наук; *ResearcherID: M-3233-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8101-0945*
Т.И. Сиромля*[2], *д-р биол. наук; *ResearcherID: W-9101-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0155-2283*
[1]Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения РАН (Институт экологии человека), просп. Ленинградский, д. 10, г. Кемерово, Россия, 650065; syjil@mail.ru✉
[2]Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН, просп. акад. Лаврентьева, д. 8/2, г. Новосибирск, Россия, 630090; siromlya@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 29.12.23 / Одобрена после рецензирования 15.03.24 / Принята к печати 17.03.24

Аннотация. *Populus tremula* L. (осина) – один из широко распространенных видов древесных растений, который до сих пор недостаточно исследован как в экологическом, так и в биогеохимическом плане. Известно, что в надземных частях осины может в повышенных количествах накапливаться Cd. Это особенно важно в связи с интересом к комплексному использованию древесных ресурсов. Цель работы – сравнительное изучение содержания химических элементов в различных органах подроста *P. tremula* при техногенном воздействии на фитоценоз. Методом атомно-эмиссионного спектрометрического анализа (для As и Hg – атомно-абсорбционная спектроскопия) нами проанализировано содержание 30 химических элементов в надземных органах молодых растений *P. tremula* из техногенно нарушенных местообитаний Кузбасса (юг Западной Сибири), в т. ч. на зарастающих породных отвалах угольных карьеров. Между содержанием золы или отдельных химических элементов и типом нарушения экотопов зависимость не обнаружена. Суммарное количество химических элементов увеличивается от коры к листовой пластине, т. е. по мере продвижения к более физиологически активным органам. Самая низкая зольность характерна для коры, у стеблей она выше, при этом не было выявлено зависимости зольности от возраста, а у «чистых» и «запыленных» стеблей статистически значимо отличались концентрации Al, Ca, Cr, Fe, Ga, Mn, Na, Si и Ti. Запыленные черешки, кроме указанных элементов, содержали больше Ba, Be, La, Pb, Sc и Zr, листовые пластины еще и V, Y, Yb. Между зольностью и содержанием перечисленных химических элементов установлена прямая сильная корреляционная связь – 0,64–0,87 для стеблей и 0,75–0,93 для черешков и листьев. Уровень Cd в листьях, черешках и некоторых образцах коры *P. tremula* превышает предельно допустимую концентрацию для растительного лекарственного сырья. Отсутствие взаимосвязи содержания этого элемента с запыленностью образцов свидетельствует о том, что высокие концентрации Cd в надземных органах обусловлены видовыми особенностями *P. tremula*, а именно высоким транслокационным потенциалом.

Ключевые слова: *Salicaceae*, осина обыкновенная, антропогенное воздействие, элементный химический состав, органоспецифичность, растительные ресурсы, тяжелые металлы, биогенные элементы, рекультивация отвалов угольных карьеров, Кемеровская область

© Загурская Ю.В., Сиромля Т.И., 2025
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания № 124041100075-7 по проекту «Разработка научных основ оценки состояния и восстановления флористического разнообразия *in situ* и *ex situ* в регионах с высокой степенью деградации экосистем в результате антропогенного и техногенного воздействий», 2024–2025 гг., FWEZ-2024-0022, и по проектам госзаданий ИПА СО РАН.

Для цитирования: Загурская Ю.В., Сиромля Т.И. Элементный химический состав *Populus tremula* в условиях техногенных экосистем Кузбасса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 107–120. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-107-120

Original article

The Elemental Chemical Composition of *Populus tremula* in the Conditions of Technogenic Ecosystems of Kuzbass

Yulia V. Zagurskaya[1]✉***,*** *Candidate of Biology; ResearcherID: M-3233-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8101-0945*
Tatiana I. Siromlya[2]***,*** *Candidate of Biology; ResearcherID: W-9101-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0155-2283*
[1]Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of Human Ecology), prosp. Leningradskij, 10, Kemerovo, 650065, Russian Federation; syjil@mail.ru✉
[2]Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Lavrent'eva, 8/2, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; siromlya@issa-siberia.ru

Received on December 29, 2023 / Approved after reviewing on March 15, 2024 / Accepted on March 17, 2024

Abstract. *Populus tremula* L. (aspen) is one of the widespread species of woody plants, which has not yet been sufficiently studied in both ecological and biogeochemical terms. It is known that Cd can accumulate in elevated quantities in the above-ground parts of aspen. This is especially important in connection with the interest in the integrated use of wood resources. The aim of this work has been a comparative study of the content of chemical elements in various organs of *P. tremula* undergrowth under technogenic effects on the phytocenosis. Using the method of atomic emission spectrometric analysis (for As and Hg – atomic absorption spectroscopy), we have analyzed the content of 30 chemical elements in the aboveground organs of young *P. tremula* plants from technogenically disturbed habitats of Kuzbass (south of Western Siberia), including on overgrown rock dumps pf coal pits. No relationship has been found between the content of ash or individual chemical elements and the type of ecotope disturbance. The total number of chemical elements increases from the bark to the leaf blade, i.e. as you move towards more physiologically active organs. The lowest ash content is typical for bark, it is higher for stems, while no dependence of ash content on age has been found, and the concentrations of Al, Ca, Cr, Fe, Ga, Mn, Na, Si and Ti have been statistically significantly different in the "clean" and "dusty" stems. In addition to the above elements, "dusty" petioles have contained more Ba, Be, La, Pb, Sc and Zr, and the leaf blades have also contained V, Y and Yb. A direct strong correlation has been established between the ash content and the content of the listed chemical elements: 0.64–0.87 for stems and 0.75–0.93 for petioles and leaves. The Cd level in leaves, petioles and some bark samples of *P. trem-*

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

ula exceeds the maximum permissible concentration for herbal medicinal raw materials. The absence of a correlation between the content of this element and the dustiness of the samples indicates that high Cd concentrations in the aboveground organs are due to the species characteristics of *P.tremula*, namely its high translocation potential.

Keywords: *Salicaceae*, common aspen, anthropogenic impact, elemental chemical composition, organ-specificity, plant resources, heavy metals, biogenic elements, reclamation of coal pit dumps, the Kemerovo Region

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment no. 124041100075-7 on the project "Development of Scientific Foundations for Assessing the State and Restoration of Floral Diversity *in situ* and *ex situ* in Regions with a High Degree of Ecosystem Degradation as a Result of Anthropogenic and Technogenic Impacts", 2024–2025, FWEZ-2024-0022 and projects of the state assignments of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Zagurskaya Yu.V., Siromlya T.I. The Elemental Chemical Composition of *Populus tremula* in the Conditions of Technogenic Ecosystems of Kuzbass. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 107–120. (In Russ.).
https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-107-120

Введение

Осина *Populus tremula* L. (Salicaceae) – лиственное древесное растение, произрастающее в прохладных умеренных и бореальных районах, оно газо- и засухоустойчиво, нетребовательно к почвенным условиям. Вид очень широко распространен в Евразии: входит в число лесообразующих и является одной из 5 доминантных древесных культур европейской части России [8, 13, 23, 35].

Часто именно осина выполняет роль содоминанта для многих хвойных пород и служит основным или благоприятным альтернативным субстратом для многих редких эпифитов. Как и большинство видов родов *Salix* L. и *Populus* L., осина может не только проникать в устойчивые лесные сообщества, особенно в пограничных зонах, но и массово распространяться на поврежденных территориях, способствуя восстановлению почвы и растительности и развитию продуктивных биоценозов [30, 38]. На начальном этапе распространения данный вид, как правило, выступает в качестве примеси к основным лесообразующим породам и характеризует усложнение фитоценоза (часто – переход на следующую сукцессионную стадию) [15].

Ранее в России ресурсы различных таксонов осины связывали исключительно с европейской частью и умеренным климатом, но со временем ареал этой культуры активно расширяется в северном направлении. Кроме того, выявлена тенденция к увеличению площадей осиновых насаждений (по официальным данным, до 24–25 млн га с запасом до 3715 млн м^3) [24].

В настоящее время применение растений *P. tremula* L. как источника промышленной древесины незначительно по объему и малопопулярно в связи с экологическими и биологическими особенностями этого вида, однако активно изучаются способы дополнительной обработки такого сырья и альтернативные направления его хозяйственного использования [18, 24]. Интерес к комплексному вовлечению лесных ресурсов в производственные процессы за последние десятилетия резко возрастает, что подтверждается многочисленными публика-

циями и широкой географией объектов исследования [5]. Комплексный подход в данном случае заключается в применении всех частей растений, включая кору, листья и тонкие ветки, а также сучковые зоны древесины [2, 5, 21]. Идет поиск перспективных природных форм растений (устойчивость к болезням, качество древесины, декоративность) и способов их размножения, а также селекционная работа с целью озеленения населенных пунктов, внедрения новых культур в лесное хозяйство и их высадки для биологической рекультивации нарушенных территорий [4, 23, 31, 33, 36].

На данный момент в восстановлении нуждаются значительные площади почв, подвергшиеся сильному техногенному воздействию (вплоть до полного разрушения нативных экосистем) при карьерной разработке угольных месторождений [11, 12, 22]. Открытый способ добычи угля в Кузбассе становится все более распространенным в связи с высокой экономической эффективностью, относительной простотой и безопасностью. Сегодня карьерная разработка месторождений составляет более 70 % объема угледобычи [12, 22]. К сожалению, до недавнего времени работы по рекультивации карьеров зачастую не предусматривали обязательный биологический этап (мероприятия по восстановлению почв и растительности). Следствием этого является длительное возобновление продуктивных биогеоценозов, ограниченное целым рядом факторов: недостаточными эдафическими и гидрологическими ресурсами территорий, спектром видов в окружающих экотопах, их адаптивной способностью и т. п. Тем не менее, процессы естественного возобновления растительности происходят не только на землях, вышедших из сельскохозяйственного использования [6], но и на техногенно нарушенных территориях, прилегающих к угольным карьерам [16].

Особую опасность представляет то, что во вскрышных породах могут содержаться потенциально токсичные химические элементы (Pb, Hg, As, Cd и др.) [1], способные аккумулироваться в растениях или их частях. Ранее было установлено, что осина – единственный из доминантных древесных видов европейской части России – может в повышенных концентрациях накапливать в надземных органах Cd, экологически опасный химический элемент (ХЭ) [8].

Цель работы – сравнительное исследование содержания ХЭ в надземных органах растений *Populus tremula* при техногенном воздействии на фитоценоз.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили ценопуляции молодых деревьев *P. tremula* 10–15 лет, не достигших больших размеров и без признаков генеративных процессов (подрост), появившиеся в результате самовосстановления растительности на территории разреза «Кедровский» (г. Кемерово). Материал собирали 1–5 августа 2015 г. из 4 ценопопуляций с различными экологическими характеристиками: 1) территория с ненарушенным почвенным слоем без интенсивной транспортной нагрузки – контроль; 2) зарастающий породный отвал, возраст около 30 лет; 3) породный отвал возрастом около 30 лет, рекультивированный сосной, расположен на расстоянии около 50 м от насыпи отвала действующего карьера; 4) обочина технологической дороги на территории разреза с регулярным движением горнодобывающей техники и дизельного круп-

ногабаритного транспорта. Все растения, по результатам оценки жизненного состояния, здоровы.

С некоторых близко растущих деревьев (6–10 экз. в каждой ценопопуляции) отбирали по несколько веток длиной 25–30 см с разных сторон кроны на высоте 1,5–2,0 м. Листья отрывали от стеблей и разделяли на черешок и листовую пластину (зрелые, неповрежденные, среднего размера). Стебли побегов 1-го года отсортировывали от более ранних (развитие от 2 до 4 лет в зависимости от длины междоузлий). Кору брали с нескольких экземпляров, срезая кусочки по 1–2 $см^2$ со стволов и приствольных частей побегов с разных сторон дерева на высоте 1,5–2,0 м.

Таким образом, исследованы образцы листовых пластинок, черешков листа, стебли побегов 1-го года, 2–4-го годов (многолетние) и кора. Из образцов с индивидуальных растений в каждой популяции составляли объединенные пробы по типу материала, по возможности с учетом запыленности: запыленные и условно чистые. Из них отбирали по 3 средних образца, которые затем анализировали в 3 аналитических повторностях.

Элементный химический состав образцов изучали после сухого озоления методом атомно-эмиссионного спектрометрического анализа при помощи дугового аргонового 2-струйного плазмотрона (Россия), спектрометра PGS-2 (Германия), многоканального анализатора эмиссионных спектров (Россия). Концентрации As (ГОСТ Р 51766–2001) и Hg (ГОСТ Р 53183–2008) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). В качестве стандартов использовали образцы листа березы (ГСО 8923–2007), травосмеси (ГСО 8922–2007) и элодеи канадской (ГСО 8921–2007). Результаты определения ХЭ не выходили за рамки их аттестованных значений.

Экспериментальные данные статистически обрабатывали с помощью пакета программ Statistica 10. Для большинства исследованных ХЭ оказалось характерно анормальное (логарифмическое) распределение, поэтому были рассчитаны медианные значения (Med) и размах выборок (min–max). Дисперсионный анализ проводился по методу Краскела–Уоллиса, корреляционный – по методу Спирмена, критический уровень значимости во всех случаях принимался равным 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Обработка полученных данных позволила установить, что между однотипными образцами из различных местообитаний статистически значимая разница отсутствует.

Результаты исследования элементного химического состава *P. tremula* представлены в таблице. Настолько подробная «детализация» была предпринята с целью наиболее точно выявить распределение ХЭ по органам растений, поскольку оно может значительно варьировать как в зависимости от анатомо-морфологических особенностей, так и из-за воздействия внешних факторов. Следует отметить, что нами были обнаружены статистически значимые отличия в элементном химическом составе листьев *P. tremula*, характеризующихся разным уровнем зольности [39], что, как правило, свидетельствует об аэрогенном поступлении ряда ХЭ с пылевыми частицами (в т. ч. в виде поверхностного загрязнения).

Содержание ХЭ в различных органах подроста *Populus tremula* (мг/кг воздушно-сухого вещества) и их общая зольность (%), Med (min–max)
The content of chemical elements in various organs of *Populus tremula* undergrowth (mg/kg on air–dry basis) and their total ash content (%), Med (min–max)

Элемент	Кора	Стебли		Черешки	Листовые пластинки
		многолетние	1-летние		
Зола	3,5 (3,3–4,0)	4,8 (4,2–4,9) 5,5 (5,2–6,8)	4,5 (3,8–4,8) 5,1 (4,9–5,6)	7,0 (6,8–7,2) 9,6 (9,4–10,4)	7,0 (6,3–8,7) 9,4 (9,0–10,0)
Al	246 (170–264)	210 (150–280) 340 (320–350)	75 (70–105) 240 (180–300)	430 (290–515) 780 (645–890)	970 (600–1870) 3530 (3270–3600)
B	16 (9–20)	15 (14–19)	18 (15–22)	33 (26–38)	86 (40–170)
Ba	29 (14–36)	38 (26–65)	32 (27–43)	48 (45–57) 90 (86–94)	49 (29–63) 92 (86–98)
Be	0,02 (0,01–0,02)	0,02 (0,02–0,04)	0,02 (0,02–0,03)	0,03 (0,02–0,04) 0,07 (0,05–0,08)	0,05 (0,03–0,07) 0,09 (0,09–0,10)
Ca	8390 (4780–9170)	11 600 (9180–14 540) 17 260 (15 370–19 160)	10 460 (8970–11 220) 13 800 (13 650–15 110)	14 540 (13 900–15 130) 24 360 (22 150–28 600)	15 810 (11 730–17 900) 20 700 (18 220–22 050)
Cd	0,5 (0,3–1,2)	0,4 (0,2–0,5)	0,3 (0,2–0,4)	1,4 (0,7–2,3)	1,0 (0,7–1,9)
Co	0,12 (0,10–0,17)	0,11 (0,09–0,13)	0,11 (0,09–0,17)	0,26 (0,21–0,28)	1,0 (0,9–1,6)
Cr	0,25 (0,12–0,29)	0,27 (0,23–0,31) 0,54 (0,48–0,60)	0,23 (0,18–0,25) 0,42 (0,36–0,50)	0,43 (0,32–0,55) 0,91 (0,74–1,06)	1,0 (0,5–1,2) 1,8 (1,7–2,2)
Cu	8,6 (6,4–14,2)	4,9 (4,5–6,5)	7,1 (5,9–9,7)	4,1 (2,9–5,3)	6,8 (5,2–8,1)
Fe	79 (66–85)	68 (56–79) 140 (130–160)	44 (40–64) 148 (128–168)	108 (95–134) 185 (171–205)	370 (230–600) 810 (700–850)
Ga	0,05 (0–0,05)	0,05 (0,04–0,06) 0,08 (0,07–0,10)	0,04 (0,03–0,05) 0,08 (0,07–0,09)	0,08 (0,07–0,09) 0,14 (0,13–0,16)	0,16 (0,08–0,20) 0,35 (0,32–0,38)
K	7200 (6700–7840)	6080 (3060–9020)	7370 (4500–10 800)	12 660 (9140–16 750)	7370 (6050–10 600)
La	0,16 (0,14–0,17)	0,18 (0,14–0,36)	0,13 (0,11–0,30)	0,30 (0,28–0,35) 0,50 (0,45–0,67)	0,48 (0,28–0,64) 1,06 (0,92–1,12)
Mg	940 (470–1065)	1400 (970–2140)	1500 (1260–2100)	2550 (2230–3360)	3110 (1820–4210)

Mn	10 (9–14)	16 (14–18) 32 (31–36)	12 (11–18) 30 (21–44)	33 (26–38) 142 (130–164)	60 (47–100) 190 (178–215)
Mo	0,08 (0,06–0,10)	0,11 (0,08–0,16)	0,14 (0,06–0,17)	0,15 (0,13–0,17)	0,18 (0,11–0,40)
Na	26 (20–40)	16 (13–20) 36 (31–42)	12 (9–20) 33 (27–40)	25 (19–36) 55 (44–78)	35 (26–88) 124 (106–154)
Ni	0,6 (0,5–0,7)	0,7 (0,5–1,1)	1,8 (1,5–3,2)	1,4 (0,6–1,6)	3,6 (2,5–4,8)
P	470 (270–680)	640 (520–930)	1230 (820–1620)	950 (460–2590)	1450 (920–2390)
Pb	0,30 (0,24–0,43)	0,25 (0,15–0,42)	0,18 (0,10–0,36)	0,26 (0,24–0,28) 0,45 (0,36–0,54)	0,49 (0,33–0,65) 0,75 (0,70–0,89)
Sc	0,01 (0,01–0,03)	0,02 (0,01–0,04)	0,02 (0,01–0,05)	0,02 (0,01–0,03) 0,06 (0,05–0,08)	0,12 (0,03–0,14) 0,27 (0,24–0,30)
Si	390 (320–470)	356 (237–490) 724 (635–820)	246 (216–450) 736 (673–800)	750 (620–790) 1420 (1360–1510)	4790 (2570–5630) 10 500 (9980–11 000)
Sn	0,4 (0,1–0,6)	0,3 (0,2–0,9)	0,5 (0,3–1,0)	0,5 (0,2–0,8)	0,6 (0,4–1,2)
Sr	42 (16–47)	75 (40–104)	64 (43–93)	110 (62–153)	110 (38–166)
Ti	13 (7–16)	8 (6–10) 16 (14–20)	6 (4–8) 19 (13–25)	12 (11–16) 30 (25–33)	36 (21–52) 120 (115–136)
V	0,4 (0,2–0,9)	0,3 (0,3–0,5)	0,3 (0,2–0,5)	0,6 (0,4–0,9)	0,9 (0,5–1,5) 2,1 (2,0–2,2)
Y	0,1 (0,1–0,2)	0,11 (0,09–0,20)	0,08 (0,06–0,16)	0,22 (0,09–0,35)	0,4 (0,1–0,5) 0,8 (0,7–0,9)
Yb	0,01 (0,01–0,02)	0,01 (0,01–0,02)	0,01 (0,01–0,02)	0,02 (0,01–0,03)	0,04 (0,02–0,06) 0,08 (0,07–0,09)
Zn	83 (42–104)	73 (49–101)	87 (62–96)	160 (70–254)	215 (120–512)
Zr	0,7 (0,4–0,8)	0,7 (0,6–1,4)	0,7 (0,5–1,2)	1,8 (0,9–2,3)	2,6 (1,1–3,3) 5,4 (5,0–5,9)

Примечание: В числителе – показатели для «чистых» образцов, в знаменателе – для «запыленных», при наличии только одного показателя статистически значимая разница между ними отсутствует.

Среди всех изученных органов и частей осины самая низкая зольность и минимальная вариабельность данного показателя характерны для коры. Вероятно, в связи с этим разница между чистыми и запыленными образцами была статистически незначима.

Объемная доля коры деревьев значительна и варьирует от 7 до 25 % в зависимости от древесной породы, однако большинство технологий лесопереработки базируется на использовании неокоренной древесины, поэтому образуются большие объемы коры, которые зачастую не находят рационального применения [2]. Тем не менее, кора осины давно и разносторонне используется в народной медицине, а в настоящее время рассматривается возможность внедрения осиновой коры в таком качестве в официальную практику [7, 10, 17, 28], в первую очередь в ветеринарии [14]. Для создания технологии рациональной переработки коры необходимы более глубокие сведения о ее свойствах и химическом составе, которые, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор остаются недостаточными [7, 9, 17].

Зольность стеблей осины выше, чем зольность ее коры, однако содержание большинства исследованных ХЭ находится в примерно одинаковых интервалах. Ca, Sr, P и Ni обнаружены в коре в меньших количествах по сравнению со стеблями, а Cu накапливается более интенсивно, чем во всех остальных органах. Отдельно необходимо обратить внимание на Cd – в части проб коры данный элемент присутствует в объеме более 1 мг/кг, что превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) для биологически активных добавок (СанПиН 2.3.2.1078–01) и лекарственного растительного сырья [3]. Способность осины к повышенному накоплению в надземных органах Cd уже отмечалась ранее [8]. Более подробно особенности элементного химического состава коры *P. tremula* рассмотрены в работе [9].

Определение общего содержания золы в стеблях дало следующие результаты. Зольность чистых и запыленных образцов статистически значимо отличалась как для 1-летних, так и для многолетних стеблей, однако зависимость зольности от возраста в данном случае выявлена не была. Статистически значимые отличия в элементном химическом составе чистых и запыленных стеблей были обнаружены для Al, Ca, Cr, Fe, Ga, Mn, Na, Si и Ti; коэффициенты корреляции между содержанием перечисленных элементов и зольностью изменялись от 0,64 до 0,87. Это хорошо соотносится с литературными данными, поскольку именно Al, Cr, Fe, Si, Ti рассматриваются в качестве индикаторов присутствия педогенных частиц в растениях [34], а в статье [37] отмечают, что на потенциальный атмосферный источник загрязнения надземных органов *P. purdomii* Rehder указывает повышенное содержание в них Cr.

Наибольшей зольностью характеризуются листья. Зольность черешков и листовых пластин статистически значимо не отличаются между собой, но эта разница наблюдается между чистыми и запыленными образцами. Мы уже отмечали повышенное содержание ХЭ в листьях с увеличенной запыленностью для *P. tremula*, [39] и ряда других видов [20]. Помимо Al, Ca, Cr, Fe, Ga, Mn, Na, Si и Ti, в запыленных черешках содержится больше Ba, Be, La, Pb, Sc и Zr, а в листовых пластинах еще и V, Y, Yb. Вероятно, статистически значимые различия для этих элементов не были выявлены для стеблей из-за низкой концентрации в них ХЭ – в листьях она значительно выше. Для зольности и содержания указанных ХЭ отмечена прямая сильная корреляционная связь (0,75–0,93). Несмотря на близкую зольность, элементный химический состав черешков и листовых

пластин имеет значительные отличия – в основном, в последних содержится большее количество ХЭ.

Проведено сравнение элементного химического состава листьев с так называемым Reference Plant [27]. В исследованных нами образцах несколько меньше K, Mo, Mn, Na, Pb, относительно близкие концентрации Ba, Cr, Cu, P, содержание превалирующей части остальных ХЭ в 2–10 раз выше. Отдельно стоит отметить Al, Be, Cd, Ti и Zr – их уровни выше на порядок и более. Однако вряд ли это является особенностью *P. tremula*, причина может быть связана с недостаточно точными средними значениями содержаний данных ХЭ. Так, показатели кларков по [19] в 30 раз выше для Al, в 100 раз – для Be, в 6 раз – для Ti и в 75 раз – для Zr. Впрочем, кларк Cd в 10 раз меньше – 0,005 мг/кг, и ранее мы уже неоднократно высказывали сомнения в обоснованности данного значения, поскольку за 10 лет исследований более 30 видов различных растений концентрации менее 0,1 мг/кг нам не встречались.

Содержание Cd превышает ПДК в большей части рассмотренных проб как черешков, так и листовых пластин. В других органах его количество явно ниже, хотя в отдельных образцах коры доходит до 1,2 мг/кг. Достаточно высокие уровни Cd приводятся в литературе для древесины с корой (1,2 мг/кг), при этом для самой древесины показатель более низкий [32]. Также для листьев *P. nigra* L. отмечают значительно повышенные по сравнению с стеблями и корнями концентрации Cd [26]. Однако в работе [37] наравне с подобными фактами, объясняемыми хорошим транслокационным потенциалом Cd, приводятся и противоположные – корневая компарментация Cd у трансгенных тополей; кроме того, в некоторых случаях в накоплении Cd разными органами растений выявлены лишь незначительные различия.

Концентрация Pb, напротив, намного ниже ПДК во всех исследованных органах и при этом находится практически в одном диапазоне – 0,10–0,65 мг/кг, статистически значимо отличаясь лишь в запыленных листьях (0,7–0,9 мг/кг). Низкая биодоступность Pb отмечалась и ранее [26] – так, например, *P. alba* и *P. nigra* могут связывать бóльшую часть Pb в вакуолях клеток корня, тем самым защищая физиологически уязвимые органы от токсичного воздействия металла. Однако есть и другие данные [37] – в опытах, сопровождающихся изменениями элементного химического состава почвы, в разных сериях содержание Pb могло быть выше как в корнях, так и в листьях.

Содержание As и Hg по результатам данного исследования оказалось ниже предела обнаружения методом ААС – 0,03 и 0,01 мг/кг соответственно.

Стоит отметить, что в упомянутой обзорной работе [37] проведен метаанализ поглощения тяжелых металов различными видами *Populus* – рассмотрены Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb и Zn, выбранные по их экологической значимости и доступности данных. Указано, что из более чем 15 000 публикаций, лишь в 29 содержались необходимые для сравнения данные, причем они были представлены для 11 разных видов, клонов и гибридов, а число изученных элементов – по 1–2 в 15 публикациях и лишь в 7 статьях – 5 и более элементов. Авторы приводят многочисленные примеры, подтверждающие, что закономерности накопления различных элементов в органах видов *Populus* крайне противоречивы.

Литературные данные об элементном химическом составе именно *P. tremula* крайне ограничены. В работе [25] приводятся сведения о содержании ХЭ в листьях *P. tremula*, произрастающей на территории Ханты-Мансийского авто-

номного округа – Югры (мкг/г): Al – 15, As – 0,05, B – 17, Ca – 2483, Cd – 0,1, Co – 1,9, Cr – 0,1, Cu – 1,2, Fe – 13, K – 3414, Mg – 1358, Mn – 126, Na – 1003, Ni – 2,8, P – 1784, Pb – 0,1, Si – 262, Sn – 0,13, Sr –18, V – 0,04, Zn – 28. Сравнение с представленными в таблице концентрациями ХЭ в листовых пластинах показало, что довольно близки данные лишь для 4 элементов – Co, Mn, Ni, P. В листьях из названного региона в 6–30 раз выше содержание Na, а все остальные элементы содержатся в значительно меньших количествах – от 2–3 раз до 20–50 и более, хотя остается непонятным, чем может быть вызвана настолько резкая разница.

Опубликованные в работе чешских авторов [38] данные практически совпадают с полученными нами по Ca, K, P, но по Mg несколько выше (5500 мг/кг). *P. tremula*×*tremuloides* в Финляндии [29] содержит в ветвях и листьях (мг/кг) 22–47 и 170–410 Al, 3–14 и 4–35 Cd, 1,0–1,1 и 0,6–1,0 Cr, 8–11 и 9–11 Cu, 42–46 и 180–220 Fe,1–3 и 4–16 Ni, 1200–2600 и 2400–4400 P, 3–5 и 8–46 Pb, 0,3–0,6 и 0,7–1,0 V, 140–340 и 640–2400 Zn. Количество большинства исследованных ХЭ хорошо соотносится с нашими данными в т. ч. и по характеру распределения – накопление в листьях выше, чем в ветвях. Чрезвычайно высокие концентрации Cd, Pb и Zn объясняются тем, что растения выращивались на загрязненной тяжелыми металлами почве. В статье [37] также показано, что тяжелые металлы накапливались в *Populus* spp., произрастающих на загрязненных почвах, в значительно бóльших концентрациях, чем у особей на незагрязненных почвах.

Заключение

Максимум большинства изученных химических элементов из всех органов осины сосредоточен в листьях, за исключением Cu (в коре) и K (в черешках), в черешках отмечаются чуть меньшие количества. Только для Cd, Cu, Fe, Na, Pb, Ti, V содержание в коре оказалось выше, чем в стеблях, для остальных 22 исследованных элементов – меньше или равно. Для многолетних стеблей по сравнению с 1-летними зафиксирован несколько больший объем Ba, Fe, Ti, Pb. Аналогичным образом изменяется и зольность исследованных органов: кора < многолетние стебли < 1-летние стебли < черешки < листовые пластины.

Разница в содержании многих изученных химических элементов в листьях *P. tremula* и среднемировых значений Reference Plant, а также кларковых значений объясняется недостаточно точно установленными средними показателями количества химических элементов, в т. ч. соотношением различных тканей. Литературные сведения по вопросу весьма немногочисленны и неоднородны, встречаются как близкие к полученным нами содержания элементов, так и гораздо более низкие и высокие концентрации.

Отмечено превышение предельно допустимой концентрации для лекарственного растительного сырья по содержанию Cd в листьях, черешках и отдельных пробах коры осины (до 200 % от предельно допустимой концентрации). Количество остальных химических элементов (для которых прописаны требования) находится в пределах данных нормативов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Артамонова В.С., Бортникова С.Б.* Биогеохимическая характеристика корнеобитаемого слоя травянистых растений на рекультивированных участках техногенных отходов // Вестн. Пермск. ун-та. Сер.: Биология. 2022. Вып. 2. С. 155–163.

Artamonova V.S., Bortnikova S.B. Biogeochemical Characteristics of the Root Layer of Herbaceous Plants in Recultivated Areas of Man-Made Waste. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya Biologiya* = Bulletin of Perm University. Biology, 2022, iss. 2, pp. 155–163. (In Russ.). https://doi.org/10.17072/1994-9952-2022-2-155-163

2. *Гарипов Н.Р.* Сравнительный анализ состава и содержания некоторых экстрактивных компонентов древесины и коры осины (*Populus tremula* L.) // Лесохоз. информ.: Электрон. сетев. журн. 2016. № 1. С. 65–70.

Garipov N.R. Comparative Analysis of Structure and Maintenance of Some Extractive Components of Wood and Bark of the Aspen (*Populus tremula* L.). *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2016, no. 1, pp. 65–70. (In Russ.).

3. Государственная фармакопея Российской Федерации. Изд. 14. Т. 4. М.: Мин-во здрав. РФ, 2018. 1833 с.

State Pharmacopoeia of the Russian Federation. 14th ed. Vol. 4. Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation, 2018. 1833 p. (In Russ.).

4. *Гродецкая Т.А., Баранов О.Ю., Ржевский С.Г., Федулова Т.П., Шабанова Е.А., Константинов А.В., Машкина О.С.* Молекулярно-генетический анализ размноженных *in vitro* клонов *Populus alba* L. и *Populus tremula* L. с использованием микросателлитных маркеров // Лесотехн. журн. 2021. Т. 11, № 3(43). С. 16–30.

Grodetskaya T.A., Baranov O.Yu., Rzhevskiy S.G., Fedulova T.P., Shabanova E.A., Konstantinov A.V., Mashkina O.S. Molecular-Genetic Analysis of Propagated *in vitro* clones of *Populus alba* L. and *Populus tremula* L. Using Microsatellite Markers. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2021, vol. 11, no. 3(43), pp. 16–30. (In Russ.). https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/2

5. *Грязькин А.В., Чан Ч.Т., Ван Х.В., Прокофьев А.Н., Хоанг М.А.* Комплексная оценка сырьевых ресурсов березняков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 23–35.

Gryazkin A.V., Trung T.T., Van H.V., Prokof'yev A.N., Hoang M.A. Integrated Assessment of Raw Material Resources of Birch Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 1, pp. 23–35. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-23-35

6. *Данилов Д.А., Яковлев А.А., Суворов С.А., Крылов И.А., Корчагов С.А., Хамитов Р.С.* Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагрогенных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 65–76.

Danilov D.A., Yakovlev A.A., Suvorov S.A., Krylov I.A., Korchagov S.A., Khamitov R.S. Formation of Aboveground Phytomass of Deciduous Tree Species on Post-Agrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 65–76. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-65-76

7. *Дейнеко И.П., Фаустова Н.М.* Элементный и групповой химический состав коры и древесины осины // Химия раст. сырья. 2015. № 1. С. 51–62.

Deineko I.P., Faustova N.M. Element and Group Chemical Composition of Aspen Bark and Wood. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2015, no. 1, pp. 51–62. (In Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.201501461

8. *Железнова О.С., Черных Н.А., Тобратов С.А.* Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25, № 2. С. 253–270.

Zheleznova O.S., Chernykh N.A., Tobratov S.A. Zinc and Cadmium in Tree Species of Forest Ecosystems: Patterns of Translocation, Accumulation and Barrier Mechanisms. *Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* = RUDN Journal of Ecology and Life Safety, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 253–270. (In Russ.). https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-2-253-270

9. *Загурская Ю.В., Сиромля Т.И.* Элементный химический состав коры осины на отвалах угольных карьеров Кузбасса // Природно-ресурсный потенциал и экологическая реабилитация деградированных ландшафтов: материалы науч.-практ. конф. Грозный: Чеченск. гос. ун-тет им. А.А. Кадырова, 2023. С. 142–145.

Zagurskaya Y.V., Siromlya T.I. Elemental Chemical Composition of Aspen Bark from Kuzbass Coal Mining Dumps. *Prirodno-resursnyj potentsial i ekologicheskaya reabilitatsiya degradirovannykh landshavtov*: Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference. Kadyrov Chechen State Univerisity, 2023, pp. 142–145. (In Russ.). https://doi.org/10.36684/86-1-2023-142-145

10. *Кароматов И.Дж., Расулова Х.Н.* Осина – перспективы использования в медицине (обзор литературы) // Биология и интегративная медицина. 2017. № 3. С. 157–162.

Karomatov I.D., Rasulova H.N. Aspen – the Prospects of Use in Medicine (The Review of Literature). *Biologiya i integrativnaya meditsina*, 2017, no. 3, pp. 157–162. (In Russ.).

11. *Копытов А.И., Масаев Ю.А., Масаев В.Ю.* Влияние технологии взрывных работ на состояние окружающей среды в Кузбассе // Уголь. 2020. № 5. С. 57–62.

Kopytov A.I., Masaev Yu.A., Masaev V.Yu. Impact of Blasting Technology on the Environment in Kuzbass. *Ugol'* = Russian Coal Journal, 2020, no. 5, pp. 57–62. (In Russ.). https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-5-57-62

12. *Копытов А.И., Шаклеин С.В.* Направление совершенствования стратегии развития Угольной отрасли Кузбасса // Уголь. 2018. № 5. С. 80–86.

Kopytov A.I., Shaklein S.V. Trends of Kuzbass Coal Industry Improvement Strategy. *Ugol'* = Russian Coal Journal, 2018, no. 5, pp. 80–86. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-5-80-86

13. *Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н.* Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Гео, 2012. 707 с.

Koropachinskij I.Yu., Vstovskaya T.N. *Woody Plants of Asian Russia*. Novosibirsk, Geo Publ., 2012. 707 p. (In Russ.).

14. *Кузнецова С.А., Скворцова Г.П., Мороз А.А., Королькова И.В., Счисленко С.А., Левданский В.А., Кузнецов Б.Н., Чесноков Н.В.* Получение ветеринарных препаратов из коры осины и изучение их лечебно-профилактических свойств при экспериментальном эшерихиозе животных // Журнал СФУ. Химия. 2018. Т. 11, № 4. С. 604–615.

Kuznetsova S.A., Skvortsova G.P., Moroz A.A., Korolkova I.V., Schislenko S.A., Levdansky V.A., Kuznetsov B.N., Chesnokov N.V. Obtaining Veterinary Preparations from Aspen Bark and the Study of Their Therapeutic and Prophylactic Properties in Experimental Escherichiosis of Animals. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo universiteta. Khimiya* = Journal of Siberian Federal University. Chemistry, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 604–615. (In Russ.). http://doi.org/10.17516/1998-2836-0103

15. *Леднев С.А., Шарапова А.В., Семенков И.Н., Королева Т.В.* Растительные сукцессии на отвалах угольных шахт в лесостепи Тульской области // Изв. РАН. Сер.: Геогр. 2020. Т. 84, № 2. С. 239–245.

Lednev S.A., Sharapova A.V., Semenkov I.N., Koroleva T.V. Plant Successions on Coal Mines' Waste Piles in Forest-Steppe of the Tula Oblast. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 239–245. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S2587556620020089

16. *Манаков Ю.А.* Особенности зарастания отвалов на разных стадиях восстановительной сукцессии в Кузбассе // Успехи современного естествознания. 2012. № 11. Ч. 1. С. 132–134.

Manakov J.A. The Characteristics of Revegetation on the Rock Dups at Different Stages of Regenerative Successions in Kuzbass. *Uspehi sovremennogo estestvoznanija* = Advances in Current Natural Science, 2012, no. 11, part 1, pp. 132–134. (In Russ.).

17. *Мартынов А.М., Чупарина Е.В.* Исследование фенольных соединений и элементного состава коры *Populus tremula* L. // Сиб. мед. журн. (Иркутск). 2015. Т. 133, № 2. С. 118–120.

Martynov A.M., Chuparina E.V. Examination of Phenol Compounds and Element Composition of Common Aspen Bark (*Populus tremula* L.). *Sibirskij medicinskij zhurnal (Irkutsk)* = Baikal Medical Journal, 2015, vol. 133, no 2, pp. 118–120. (In Russ.).

18. *Никулина Н.С., Вострикова Г.Ю., Дмитренков А.И., Филимонова О.Н., Никулин С.С.* Защитная обработка древесины смолой на основе фракции C_9, модифицированной отходами полиметилметакрилата // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6(342). С. 138–143.

Nikulina N.S., Vostrikova G.Yu., Dmitrenkov A.I., Filimonova O.N., Nikulin S.S. Protective Processing of Wood on the Basis of C_9 Fraction Modified by Polymethyl Methacrylate Waste. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2014, no. 6(342), pp. 138–143. (In Russ.).

19. *Романкевич Е.А.* Живое вещество Земли (биогеохимические аспекты проблемы) // Геохимия. 1988. № 2. С. 292–306.

Romankevich E.A. Living Matter of the Earth (Biogeochemical Aspects of the Problem). *Geokhimiya* = Geochemistry International, 1988, no. 2, pp. 292–306. (In Russ.).

20. *Сиромля Т.И.* Химические элементы в растениях – фолиарный путь поступления // Биогеохимия – научная основа устойчивого развития и сохранения здоровья человека: тр. XI Междунар. биогеохимич. школы. Тула: ТГПУ, 2019. Т. 2. С. 262–266.

Siromlya T.I. Plant Chemical Elements – Foliar Uptake. *Biogeochemistry – the Scientific Basis for Sustainable Development and Protection of Human Health*: Proceedings of the XI International Biogeochemical School. Tula, Tula State Pedagogical University, 2019, vol. 2, pp. 262–266. (In Russ.).

21. *Соболева С.В., Воронин В.М., Есякова О.А.* Содержание биологически активных веществ водно-этанольных экстрактов из коры осины и изучение их рострегулирующей активности // Химия раст. сырья. 2020. № 1. С. 373–380.

Soboleva S.V., Voronin V.M., Esyakova O.A. The Content of Biologically Active Substances Water-Alcohol Extracts of Aspen Bark. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2020, no. 1, pp. 373–380. (In Russ.). http://doi.org/10.14258/jcprm.2020014442

22. *Уразбаев Х.К.* Открытый способ добычи угля // Актуал. проблемы современности. 2021. № 1(31). С. 182–186.

Urazbayev H.K. An Open Way of Extracting Coal. *Aktualnye problemy sovremennosti* = Actual Problems of Modern Times, 2021, no. 1(31), pp. 182–186. (In Russ.).

23. *Царев А.П.* Многообразие использования древесины тополей // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 48–64.

Tsarev A.P. The Diversity of Use of Poplar Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 5, pp. 48–64. (In Russ.). https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.48

24. *Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Лаур Н.В.* Селекционные испытания факториальных гибридов *Populus tremula* L. в ювенильном возрасте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 9–20.

Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Laur N.V. Breeding Tests of Juvenile Factorial Hybrids of *Populus tremula* L. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 9–20. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-9-20

25. *Шевченко О.С., Нехорошев С.В.* Минеральный состав листьев осины обыкновенной, произрастающей на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Химия. Экология. Урбанистика: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием). Пермь: Пермск. нац. исслед. политехн. ун-т, 2021. Т. 2. С. 206–209.

Shevchenko O.S., Nekhoroshev S.V. Mineral Composition of the Leaves of the Common Aspen Growing on the Territory of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (with International Participation). Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2021, vol. 2, pp. 206–209. (In Russ.).

26. Baldantoni D., Cicatelli A., Bellino A., Castiglione S. Different Behaviours in Phytoremediation Capacity of Two Heavy Metal Tolerant Poplar Clones in Relation to Iron and Other Trace Elements. *Journal of Environmental Management*, 2014, vol. 146, pp. 94–99. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.045

27. Dunn C.E. Biogeochemistry in Mineral Exploration. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, 2007, vol. 9, pp. 1–460. https://doi.org/10.1016/S1874-2734(07)09001-8

28. Guleria S., Singh H., Sharma V., Bhardwaj N., Arya S.K., Puri S., Khatri M. Polyhydroxyalkanoates Production from Domestic Waste Feedstock: a Sustainable Approach towards Bio-Economy. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 340, art. no. 130661. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130661

29. Hassinen V., Vallinkoski V.-M., Issakainen S., Tervahauta A., Kärenlampi S., Servomaa K. Correlation of Foliar *MT2b* Expression with Cd and Zn Concentrations in Hybrid Aspen (*Populus tremula*×*tremuloides*) Grown in Contaminated Soil. *Environmental Pollution*, 2009, vol. 157, iss. 3, pp. 922–930. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.10.023

30. Kivinen S., Koivisto E., Keski-Saari S., Poikolainen L., Tanhuanpää T., Kuzmin A., Viinikka A., Heikkinen R.K., Pykälä J., Virkkala R., Vihervaara P., Kumpula T. A Keystone Species, European Aspen (*Populus tremula* L.), in Boreal Forests: Ecological Role, Knowledge Needs and Mapping Using Remote Sensing. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 462, art. no. 118008. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118008

31. Kozlov M.V., Zverev V. Suitability of European Aspen (*Populus tremula*) for Rehabilitation of Severely Polluted Areas. *Russian Journal of Ecology*, 2022, vol. 53, no. 3, pp. 181–190. https://doi.org/10.1134/S1067413622030067

32. Pesonen J., Kuokkanen T., Kaipiainen E., Koskela J., Jerkku I., Pappinen A., Villa A. Chemical and Physical Properties of Short Rotation Tree Species. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2014, vol. 72, pp. 769–777. https://doi.org/10.1007/s00107-014-0841-5

33. Platonov A.D., Snegireva S.N., Drapalyuk M.V., Novikov A.I., Kantyeva E.V., Novikova T.P. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 11, art. no. 1758. https://doi.org/10.3390/f13111758

34. Reimann C., Koller F., Frengstad B., Kashulina G., Niskavaara H., Englmaier P. Comparison of the Element Composition in Several Plant Species and Their Substrate from a 1 500 000-km^2 area in Northern Europe. *Science of the Total Environment*, 2001, vol. 278, iss. 1–3, pp. 87–112. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00890-1

35. Rogers P.C., Pinno B.D., Šebesta J., Albrectsen B.R., Li G., Ivanova N., Kusbach A., Kuuluvainen T., Landhäusser S.M., Liu H., Myking T., Pulkkinen P., Wen Z., Kulakowski D. A Global View of Aspen: Conservation Science for WideSpread Keystone Systems. *Global Ecology and Conservation*, 2020, vol. 21, art. no. e00828. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00828

36. Thakur A.K., Kumar P., Parmar N., Shandil R.K., Aggarwal G., Gaur A., Srivastava D.K. Achievements and Prospects of Genetic Engineering in Poplar: a Review. *New Forests,* 2021, vol. 52, pp. 889–920. https://doi.org/10.1007/s11056-021-09836-3

37. Tőzsér D., Horváth R., Simon E., Magura T. Heavy Metal Uptake by Plant Parts of *Populus* Species: a Meta-Analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, pp. 69416–69430. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27244-2

38. Veselá H., Lhotáková Z., Albrechtová J., Frouz J. Seasonal Changes in Tree Foliage and Litterfall Composition at Reclaimed and Unreclaimed Post-Mining Sites. *Ecological Engineering*, 2021, vol. 173, art. no. 106424. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106424

39. Zagurskaya Yu.V., Siromlya T.I., Kotsupiy O.V., Babaeva E.Yu., Ufimtsev V.I. Physiological and Biochemical Characteristics of *Populus tremula* Leaves in Anthropogenic Disturbed Habitats. *BIO Web of Conferences: IV(VI)th All-Russia Scientific-Practical Conference "Prospects of Development and Challenges of Modern Botany"*, 2018, vol. 11, art. no. 00050. https://doi.org/10.1051/bioconf/20181100050

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article