

АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СНЕГОВОЙ ВОДЕ, ПОЧВЕ И СОСТОЯНИЕ БЕРЕЗОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Н.А. Кузьмина, П.Е. Мохначев, С.Л. Менщиков

ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН» (Лесной отдел), 620144, г. Екатеринбург, ул. Билимбаевская, д. 32А
yarkaya05@mail.ru

Представлены результаты исследования снежного покрова, почвы и состояния березовых древостоев, находящихся под воздействием аэротехногенных выбросов АО «Карабашмедь», которые загрязняют окружающую среду и изменяют ее более 100 лет. Выявлено, что по мере приближения к источнику загрязнения происходит снижение pH снеговой воды, достоверно увеличиваются масса сухого остатка и содержание взвешенных веществ. Установлено превышение содержания тяжелых металлов в радиусе 5 км от комбината в снеговой воде, по сравнению с фоном в десятки раз. Здесь же местами обнаружено отсутствие напочвенного покрова. Атмосферные осадки частично сорбируют загрязняющие вещества, содержащиеся в аэротехногенных выбросах предприятия, и напрямую попадают в снежный покров и почву. Результаты исследований уровня загрязнения снега и почвы позволяют оценить состояния лесных экосистем. Выявлено поступление тяжелых металлов на земную поверхность по результатам анализа химического состава снежных осадков, и определен ряд по мере убывания: Fe > Zn > Cu > Pb > Mn > Cd > Ni в 1 км от комбината. Одними из основных загрязнителей является железо, цинк, медь содержащееся в шлаках руды в виде пирита, магнетита и поступающее при обработке с выбросами пыли в атмосферу, затем адсорбируется или растворяется и поступает со снегом, загрязняя почвенный покров. В фоновых условиях (24 км) со снежными осадками Fe, Zn и Cu поступало меньше на 95 %, чем в импактных зонах вблизи источника (1 км). Определено значительное превышение содержания тяжелых металлов, таких как Cu, Zn, Pb, Fe и Cd в лесной подстилке и верхних горизонтах почвы в зоне сильного загрязнения. Обнаружено снижение содержания металлов вниз по профилю почвы в зоне сильного загрязнения, а в фоне — возрастание с глубиной. Установлено опосредованное (через почву) и прямое негативное влияние газов (диоксида серы, пары формальдегида и фтороводорода) и выбросов пыли от комбината на состояние березовых древостоев, определяющее увеличение дефолиации, среднего индекса повреждения, а также уменьшение средней высоты деревьев.

Ключевые слова: береза повислая *Betula pendula* Roth., аэротехногенное загрязнение, снеговая вода, тяжелые металлы, почва, березовый древостой, таксационные показатели, дефолиация, категория состояния

Ссылка для цитирования: Кузьмина Н.А., Мохначев П.Е., Менщиков С.Л. Аккумуляция тяжелых металлов в снеговой воде, почве и состоянии березовых древостоев в условиях техногенного загрязнения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 6. С. 73–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-73-82

На восточном макросклоне Южного Урала в районе Восточно-Уральской провинции предгорных сосново-березовых лесов Уральской горно-лесной зоны [1] более 110 лет расположен АО «Карабашмедь» (до 2004 года — Карабашский медеплавильный комбинат). Дымовые газы, поступающие из труб комбината, содержат до 82 % диоксида серы, а также оксид углерода, диоксид азота, пары формальдегида и фтороводорода, неорганическую пыль и тяжелые металлы (ТМ), которые при совместном воздействии на лесные биогеоценозы обладают высокой токсичностью [2–4]. Породные и шлаковые отвалы, пиритсодержащие хвостохранилища также неблагоприятно влияют на окружающую среду и здоровье населения вследствие пыления [4].

За время существования комбината в окружающую среду поступило значительное количество отходов производства, что крайне неблагоприятно отразилось на экологической обстановке и состоянии компонентов лесных насаждений [5–8]. В настоящее время комбинат окружают техногенные ландшафты с мертвым напочвенным покровом (в радиусе до 5 км от труб в северо-восточном направлении) и техногенные пустоши (рис. 1).

В состав предприятия входят медеплавильное производство мощностью до 150 тыс. т черновой меди в год (в том числе 130 тыс. т из минерального сырья) [2]. За период с 2004 по 2018 г. на производстве была проведена крупнейшая реконструкция химико-металлургического комплекса: установлены мощные системы фильтрации, устаревшие шахтные печи заменены на современные, также построен второй серноокислотный цех для утилизации металлургических газов [2]. В то же время, по официальным данным Министерства экологии Челябинской обл., снижаются объемы выбросов завода: с 13,2...13,8 тыс. т в 2010–2012 гг. до 5,387...6,101 тыс. т в 2016–2018 гг. [9–11].

О степени загрязнения атмосферы, атмосферных осадков и изменении техногенной нагрузки в разных зонах влияния промышленных предприятий позволяют судить исследования снежного покрова. Снежный покров является индикатором комплексного мониторинга оседающей на него пыли и последующего загрязнения почв и водоемов [12].

Распределение элементов по почвенному профилю позволяет определить степень загрязнения почвы. Тяжелые металлы в почве способны



Рис. 1. Техногенная пустыня (а) и березовые древостой с погибшим напочвенным покровом (б)
 Fig. 1. Technogenic desert (a) and birch stands with dead ground cover (b)

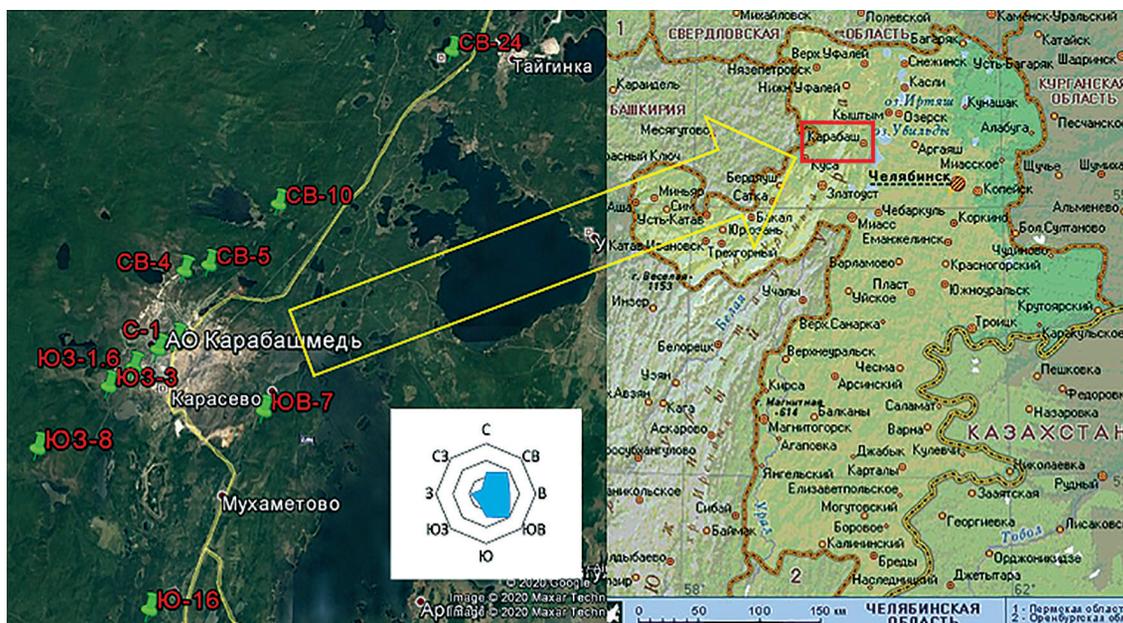


Рис. 2. Расположение опытных участков в зоне влияния комбината «Карабашмедь»
 Fig. 2. The location of the pilot plots in the zone of influence of the Combine «Karabashmed»

накапливаться и оказывать токсическое воздействие на биоценозы даже при низких концентрациях. Почвы как сложные саморегулирующие системы способны оказывать сопротивление внешнему воздействию, поддерживая изначальное равновесие за счет взаимодействия почвенных компонентов между собой и с другими объектами биосферы, но эта способность утрачивается и выходит из первоначального равновесия в результате длительного постоянного воздействия аэропромвыбросов [13].

Широкое распространение такого лесообразующего вида как — березы повислой (*Betula pendula* Roth.) — часто используется в биологическом мониторинге [14, 15] для составления обоснованных заключений о состоянии древостоя и его ответной реакции на длительное загрязнение [16]. В данном районе исследования береза

в качестве модельного объекта является более устойчивым видом к техногенным нагрузкам, чем сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), устойчивость отмечена и другими учеными [17].

Цель работы

Цель работы — изучение жизненного состояния и особенностей роста березы повислой, а также накопления тяжелых металлов в снеговой воде и почве в зоне действия АО «Карабашмедь» на фоне снижения аэротехногенных выбросов.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования служили снежный покров, почвы и естественные березовые древостой, произрастающие в условиях влияния выбросов АО «Карабашмедь». Для объективной оценки техногенной нагрузки нами было заложено 10 posto-

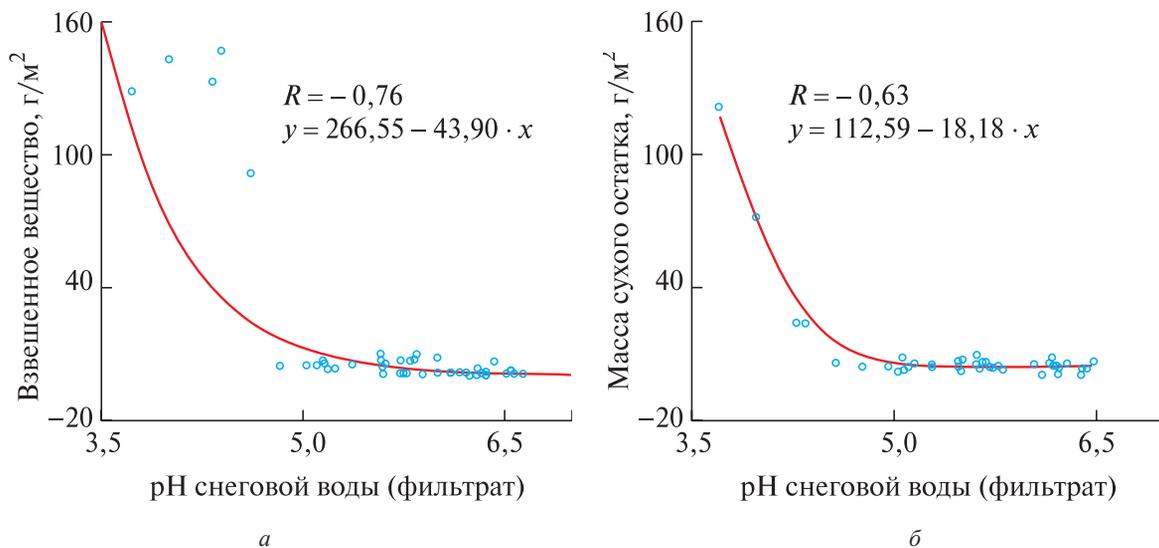


Рис. 3. Корреляция кислотности снеговой воды (фильтрата) с содержанием массы взвешенного вещества (а) и сухого остатка (б) в зависимости от удаления до источника выбросов

Fig. 3. Correlation of the acidity of snow water (filtrate) with the content of suspended matter (a) and dry residue (б), depending on the removal of emissions

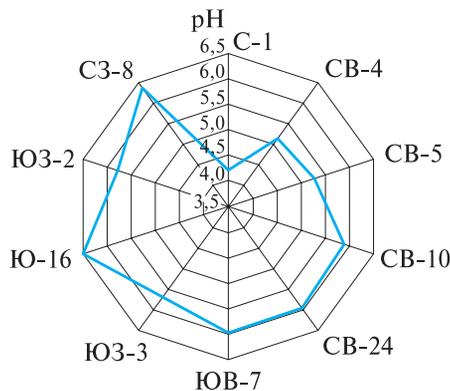
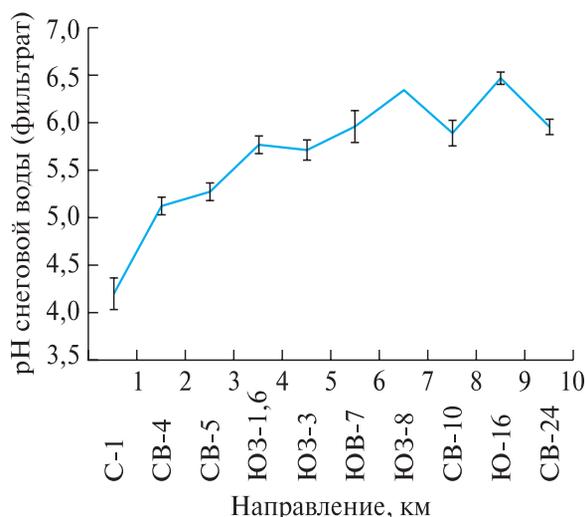


Рис. 4. Изменение кислотности снеговой воды в зонах влияния АО «Карабашмедь» в разных направлениях

Fig. 4. Change in the acidity of snow water in the zones of influence of JSC «Karabashmed» in different directions

янных пробных площадей (ППП) на расстоянии от 1 до 24 км в различных направлениях от комбината (С-1, СВ-4, СВ-5, ЮЗ-1,6, ЮЗ-3, ЮЗ-8, ЮВ-7, СВ-10, Ю-16, СВ-24: где буквами обозначено направление, цифрами — расстояние от источника загрязнения в километрах), на которых в марте 2016 г. для химического анализа были отобраны образцы снега. Северное и северо-восточное направления, согласно розе ветров, являются основным сносом газообразных и пылевых выбросов при движении воздушных масс (рис. 2). В данной статье приводятся результаты исследования таксационных показателей и санитарного состояния березняков на четырех ППП (СВ-4 и СВ-5 — зоны сильного загрязнения, СВ-10 — среднего, СВ-24 — фон) заложенных в сходных лесорастительных условиях (березняки разнотравно-злаковые 7–8 класса возраста, полнота 0,7–0,8). Временная

пробная площадь (ВПП) — С-1 была заложена в зоне сильного загрязнения, техногенной пустыне, где отсутствуют древесная растительность и напочвенный покров, а верхние горизонты почвенного грунта смыты и сильно эродированы (см. рис. 1, а).

Образцы снега были отобраны в конце марта (до начала снеготаяния), с помощью пластиковой трубы ($d = 7$ см), в полиэтиленовые пакеты в пяти повторностях с каждого участка. В лабораторных условиях проведены химические анализы. Снеговая вода была профильтрована через обеззоленные фильтры, затем они были взвешаны, проанализированы на количество пыли, выпавшей с атмосферными осадками за зимний период по общепринятым методикам [21].

Почвенные образцы отбирали осенью на исследуемых ППП по ГОСТ 17.4.4.02.84 [18].

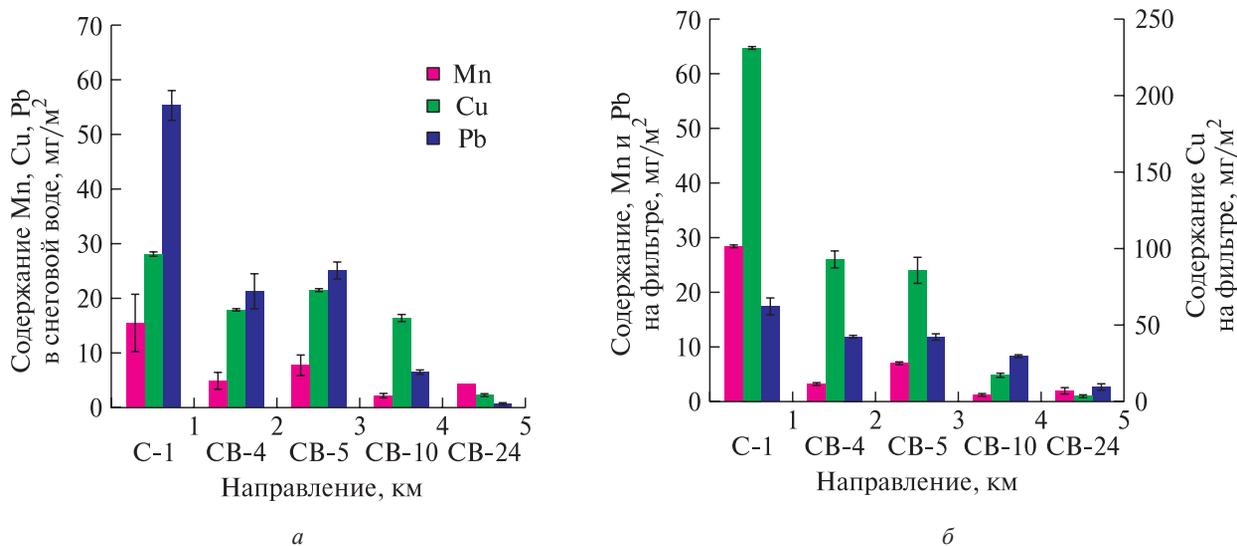


Рис. 5. Распределение химической нагрузки по Mn, Cu и Pb в снеговой воде (а — вода) и на фильтре (б — пыль) на различном расстоянии от АО «Карабашмедь»
Fig. 5. Distribution of chemical load by Mn, Cu and Pb in snow water (а — liquid fraction) and on the filter (б — solid fraction) at various distances from JSC «Karabashmed»

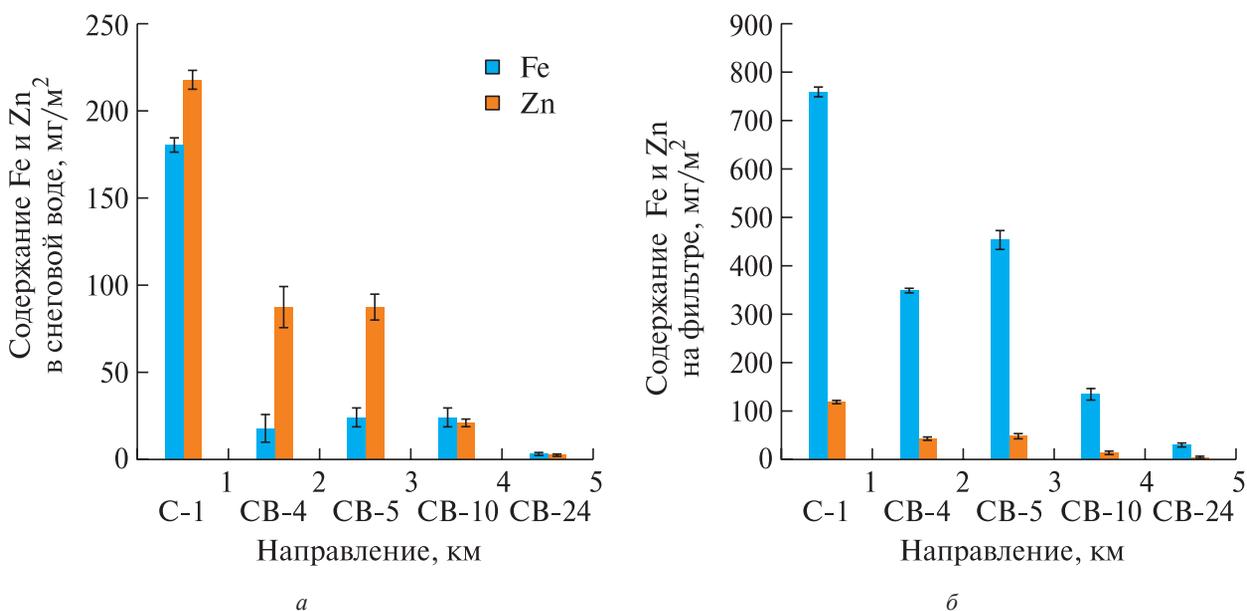


Рис. 6. Распределение химической нагрузки по Fe и Zn в снеговой воде (а — вода) и на фильтре (б — пыль) на различном расстоянии от АО «Карабашмедь»
Fig. 6. Distribution of chemical load by Fe and Zn in snow water (а — liquid fraction) and on the filter (б — solid fraction) at various distances from JSC «Karabashmed»

Определяли рН в водной вытяжке согласно ГОСТ 26423–85. [19]. Металлы из почвы экстрагировали ацетатно-амонийным буферным раствором [20]. Применяли нормативные документы для поверхностных вод по ГОСТ 12.1.007–76 [21, 22] и атмосферных осадков [23] в виде снега и методические указания по определению подвижных форм ТМ в почвах [24]. Концентрации макро- и микроэлементов измеряли на пламенном атомно-абсорбционном спектрофотометре (нов AA 300, Analytik Jena, Германия).

Диаметр стволов деревьев определяли через окружность ствола и измеряли мерной лентой с точностью до 0,1 см на высоте груди человека (1,3 м). Высота деревьев определена с помощью дальномера-высотомера Nikon Forestry Pro. Жизненное состояние березовых древостоев оценивали визуально по методике, предложенной В.А. Алексеевым [25]. Главным методико-диагностическим признаком служил показатель дефолиации кроны, что позволило применять его в лесах, поврежденных аэротехногенными выбросами [26].

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием пакета программ Statistica SPPSS 23.0.

Результаты и обсуждение

На основании данных химического анализа снеговой воды выявлено увеличение массы сухого остатка и содержание взвешенных веществ в снеговой воде по мере приближения к источнику выбросов, снижение значение показателя pH снеговой воды (фильтрат), т. е. за счет увеличения пыли и газов в атмосферном воздухе вблизи комбината снег сильно минерализован и подкислена pH снеговой воды (рис. 3). Установлена связь показателя pH снеговой воды с массой взвешенных веществ в снеговой воде ($r = -0,76$ при $p < 0,0005$), а также с массой выпаренного при анализе сухого остатка ($r = -0,63$ при $p < 0,0005$).

Атмосферные осадки в естественных условиях всегда имеют слабокислую реакцию среды, что определяется концентрацией двуокси углерода в воздухе. В зоне сильного влияния комбината газообразные выбросы диоксида серы с выпадающими снежными осадками обеспечивают образование сернистой и серной кислот (pH = 1,5), за счет чего происходит подкисление снеговой воды.

Химический анализ снеговой воды показал pH = 4,2 в 1 км от комбината, а в фоне (24 км) водородный показатель на две единицы выше. Очень кислая реакция снеговой воды в северном направлении наблюдается на расстоянии до 5 км, что подтверждает негативное влияние комбината. Смещение показателя pH снеговой воды происходит с расстоянием во всех направлениях (рис. 4).

Снеговая вода состоит из жидкой (вода) и твердой (взвешенное вещество в виде пыли) фракций на фильтре. За зимний период (4–5 мес.) с осадками в виде снега (сумма = жидкая + твердая фракции) поступило превышенное содержание тяжелых металлов на поверхность почвы в зонах влияния АО «Карабашмедь», по сравнению с фоном. В снеговой воде слабо растворимые соли свинца показали большую растворимость в снеговой воде (55 мг/м²) в 1 км, чем в пыли на фильтре (18 мг/м²). Возможно, на растворение свинца повлияла кислая реакция снеговой воды (pH = 4,2). В зоне сильного загрязнения (1 км) выпадает с пылью до 232 мг/м² нерастворимых оснований меди (рис. 5 а, б). С выбросами от АО «Карабашмедь» поступает железо, как в виде пыли (764 мг/м²), так и в снеговой воде (220 мг/м²). Цинка за зимний период выпало больше в растворенной форме; кадмия не было обнаружено в пыли, но превышение обнаружено в снеговой воде во всех зонах, в контроле в пределах нормы предельно допустимой концентрации (ПДК) (рис. 6 а, б и рис. 7).

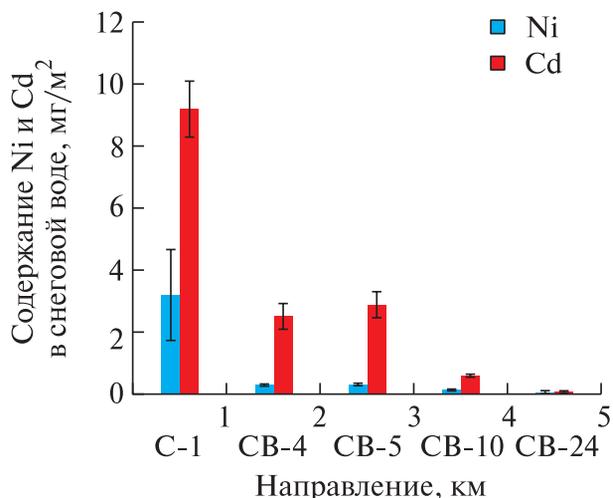


Рис. 7. Распределение химической нагрузки по Ni и Cd в снеговой воде (жидкая фракция) на различном расстоянии от АО «Карабашмедь»

Fig. 7. Distribution of chemical load for Ni and Cd in snow water (liquid fraction) at various distances from JSC «Karabashmed»

Ниже указано превышение суммированных концентраций тяжелых металлов, поступивших со снегом (кроме Cd — обнаружен только в снеговой воде, см. рис. 7) в сравнении с фоном:

	1 км	4...5 км	10 км
Fe	в 21 раз	в 11 раз	в 4 раза
Zn	в 37 раз	в 15 раз	в 4 раза
Cu	в 49 раз	в 21 раз	в 6 раз
Pb	в 21 раз	в 11 раз	в 4 раз
Cd	в 90 раз	в 30 раз	в 6 раз

Горные лесные почвы Южного Урала имеют мощность не более 1 м. Снег с адсорбированными на пылевых частицах или растворенными ТМ загрязняет почвы в зонах влияния АО «Карабашмедь». В районе исследования в зонах сильного загрязнения (на участках С-4 и С-5) напочвенный покров отсутствует, а опад под березовыми древостоями — слаборазложившийся мощностью до 5...8 см. Подстилка в этих зонах разлагается очень медленно, мощность ее составляет до 5 см по сравнению с участком СВ-10 и фоном, где толщина подстилки составляет 1,5...2 см.

По данным работы В.П. Фирсовой [27], горно-лесные почвы Южного Урала имеют кислую реакцию — от 4,4...6,0. Геологическое строение Карабашского массива и структура почв [28], сформированных на серпентинизированных ультраосновных кислых подстилающих породах исследуемого района, соответствуют полученным значениям pH почв, приведенных в табл. 1. Величина pH в подстилках (А0) изменяется от 4,6 до 6,2 по мере удаления от источника загрязнения. В.П. Фирсова

Т а б л и ц а 1

**Накопление тяжелых металлов в почве по горизонтам
и в зависимости от удаления от АО «Карабашмедь»**
Accumulation of heavy metals in the soil along the horizons and depending
on the distance from the JSC «Karabashmed»

Участок, км	Горизонт	Глубина, см	рН (H ₂ O)	Содержание, мг/кг						
				Cu	Zn	Pb	Mn	Fe	Cd	Ni
С-4	A0	0...2,9	4,8	1460	1280	998	295	124	15,3	2,9
	A1	3...5,5	5,0	1400	760	394	141	628	5,0	3,1
	A2B	5,6...12,0	4,7	462	400	61,5	59,4	343	1,4	1,3
	B1	12,1...25,0	4,9	504	243	He обн.	67,6	86	3,0	2,3
	CD	25,1...47,0	5,1	31	200	«←→»	34,2	33,8	0,6	3,1
С-5	A0	0...9,0	4,6	800	428	423	126	535	3,65	1,7
	A1	9,1...13,0	5,1	490	1090	113	308	56,8	9,3	6,8
	A2B	13,1...48,0	5,3	20,2	163	He обн.	254	145	He обн.	5,0
	B	48,1...89,0	5,6	448	128	33	94	133	2,3	2,3
	BC	89,1...100,0	5,9	7,3	2,1	He обн.	77,8	62,2	He обн.	1,6
СВ-10	A0	0...0,5	6,2	1,1	175	24,1	927	5,4	1,7	0,1
	A1	0,6...12,0	6,5	9,0	28	He обн.	137	5,9	0,1	6,9
	BC	12,1...30	6,2	1,7	6,5	«←→»	245	61,3	0,2	18,3
СВ-24 (фон)	A0	0...1,0	5,7	0,9	78,7	11,6	864	7,4	0,5	He обн.
	A1	1,1...1,6	6,4	4,8	20,7	9,5	219	3,3	0,	6,4
	A1A2	6,1...10,0	5,8	0,5	1,9	0,5	262	98	0,03	6,7
	BC	10,1...35,0	6,1	0,5	He обн.	1,93	93,9	111	0,02	22,9
ПДК для подвижных форм тяжелых металлов				3	23	6	140	–	0,2	4

также отмечала, что «в почвах, сформированных на основных породах, кислотность с глубиной уменьшается, а в сформированных на кислых породах — в большинстве случаев увеличивается» [27], что соответствует данным рН в почвенных разрезах на участках С-4, С-5 и СВ-10, СВ-24. Накопление в подстилке и гумусо-аккумулятивном горизонте ТМ Cu, Zn, Pb, Fe и Cd подтверждает техногенный характер (табл. 1) и прослеживается на расстоянии до 10 км от АО «Карабашмедь». Содержание этих ТМ уменьшается с глубиной по профилю почвы и с удалением от источника выбросов, за исключением Fe. В зонах сильного загрязнения в подстилке Cu и Zn накапливается до 1,3...1,5 г/кг почвы, Pb — до 1 г/кг, Cd — в горизонте А1 на расстоянии четвертого километра в 6280 раз и 5350 раз выше предельно допустимой концентрации (ПДК) в подстилке на пятом километре. Природа происхождения Mn

на данный момент не выяснена, так как анализ снега не подтверждает выпадение с атмосферными осадками данного металла в превышающих количествах, а накопление в подстилке на десятом километре и в фоне происходит практически до 1 г/кг почвы.

В результате изучения таксационных показателей березовых древостоев выявлено, что в северо-восточном направлении в 4 и 5 км от комбината происходит достоверное снижение средних высот деревьев, разница по сравнению с фоном составляет 2,15...3,35 м (табл. 2).

При приближении к источнику загрязнения у деревьев достоверно увеличиваются (при $p < 0,05$) степень дефолиации и индекс повреждения (см. табл. 2). Так на ППП на расстоянии 10, 5 и 4 км от комбината преобладают деревья третьей категории состояния (62, 67 и 79 % соответственно), здоровые деревья отсутствуют.

Т а б л и ц а 2 **Список литературы****Характеристика березового древостоя****Characteristics of a birch stand**

Уча- сток	Средняя высота, м	Средний диаметр ствола, см	Средняя дефолиа- ция, %	Категория состояния
С-4	20,18 ± 0,34*	26,53 ± 0,67	47,90 ± 1,04*	2,88 ± 0,05*
С-5	21,38 ± 0,22*	22,33 ± 0,42	47,87 ± 0,92*	2,86 ± 0,05*
СВ-10	23,24 ± 0,26	23,95 ± 0,47	43,09 ± 1,71*	2,79 ± 0,10*
СВ-24 (фон)	23,53 ± 0,43	23,70 ± 0,76	35,06 ± 1,83	2,18 ± 0,09
*различия с контролем достоверны при $p < 0,05$.				

Выводы

Исследование снежного покрова и почвы в очаге загрязнения показали следующее. В снеговой воде значительно превышено содержание тяжелых металлов — в десятки раз по сравнению с фоном. Снижается показатель рН до 4,2, в контроле — 6,5.

В подстилке и гумусо-аккумулятивном горизонте происходит накопление ТМ Cu, Zn, Pb, Fe и Cd, что прослеживается на расстоянии до 10 км от комбината «Карабашмедь». Содержание ТМ уменьшается с глубиной по профилю почвы и с удалением от источника выбросов. Среди ТМ доминируют Cu, Zn, Pb. Происходит подкисление верхних горизонтов почвы — рН до 4,7...5,0. В зоне сильного загрязнения в подстилке Cu и Zn накапливается до 1,3...1,5 г/кг почвы, Pb — до 1 г/кг. На крутых склонах наблюдается эрозия почвы и отсутствие растительности.

Установлено негативное воздействие аэротехногенных выбросов АО «Карабашмедь» на лесные насаждения Государственные земли лесного фонда на расстоянии до 10 км в северном и северо-восточном направлениях от г. Карабаш:

На расстоянии до 5 км от источника выбросов древостои березы повреждены в различной степени. Здоровые деревья не обнаружены, доминируют средне-поврежденные.

В северном направлении в 4 и 5 км от комбината происходит достоверное снижение средних высот деревьев, разница по сравнению с фоном составляет 2,15...3,35 м.

Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада Уральского отделения Российской академии наук.

- [1] Колесников Б.П. Леса Челябинской области // Леса СССР. М.: Наука, 1969. С. 125–156.
- [2] Коротева Е.В., Вейсберг Е.И., Куянцова Н.Б. Оценка состояния ценофлоры в зоне воздействия Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) // Известия Самарского научного центра РАН, 2011. Т. 13. № 1–4. С. 1005–1011.
- [3] Менщиков С.Л., Ившин А.П. Закономерности трансформации предтундровых и таежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2006. 294 с.
- [4] Агиков И.Н. Биоиндикация воздействия аэротехногенных поллютантов цветной металлургии на сосну обыкновенную как показатель состояния лесных экосистем // Экология и промышленность России, 2011. № 7. С. 26–28.
- [5] Бачурина А.В. Влияние аэропромвыбросов ЗАО «Карабашмедь» на таксационные показатели и санитарное состояние сосновых и березовых древостоев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2007. Вып. 181. С. 35–40.
- [6] Бачурина А.В. Влияние промышленных поллютантов ЗАО «Карабашмедь» на состояние прилегающих лесных насаждений // автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. 21 с.
- [7] Залесов С.В., Бачурина А.В. Изменение морфометрических показателей хвои сосны обыкновенной в условиях аэропромвыбросов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2008. № 3. С. 36–38.
- [8] Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е., Трубина М.Р., Бачурина А.В. Структура фитомассы нижнего лесного яруса вблизи медеплавильных заводов Урала (Biomass structure of forest understory near copper smelters on the Ural) // Леса России и хозяйство в них, 2011. № 4 (41). С. 37–44.
- [9] Комплексный доклад о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2012 году. Челябинск: Министерство по радиации и экологической безопасности Челябинской области, 2013. 232 с.
- [10] Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2017 году. Челябинск: Министерство экологии Челябинской области, 2018. 144 с.
- [11] Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2018 году. Челябинск: Министерство экологии Челябинской области, 2019. 179 с.
- [12] Янченко Н.И., Баранов А.Н., Ершов В.А., Тимкина Е.В. Изменение рН и электропроводность снежного покрова Братска // Экология и рациональное природопользование, 2014. № 3(23). С. 190–192.
- [13] Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг / под ред. Г.В. Мотузова. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 168 с.
- [14] Гончарова И.А., Скрипальщикова Л.Н., Барченков А.П., Шушпанов А.С. Оценка компонентов нижних ярусов растительного покрова в антропогенно нарушенных березняках Красноярской лесостепи // ИВУЗ Лесной журнал, 2020. № 1. С. 75–87. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-75-87
- [15] Черных В. Л., Черных Л. В., Черных Д. В. Математические модели продуктивности древостоев сосны, ели, березы, осины и липы Горного Урала // Леса Евразии — Сербские леса: Материалы XVIII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной академику профессору Жарку Милетичу (1891–1968), 23–29 сентября 2018 г. Белград: Лесной факультет Белградского университета, 2019. С. 75–82.

- [16] Бачурина А.В., Залесов С.В. Использование метода биоиндикации для оценки качества среды промышленных городов Урала // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 3. С. 11–17.
DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-11-17
- [17] Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Чащина О.Е., Коротеева Е.В. Влияние выбросов Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) на размер и флуктуирующую асимметрию листа подростка *Betula pendula* (Betulaceae) // Растительные ресурсы, 2016. Т. 56. № 1. С. 109–124.
- [18] ГОСТ 17.4.4.02.84 Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Изд-во стандартов, 1984. 6 с.
- [19] ГОСТ 26423–85 Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. М.: Изд-во стандартов, 1985. 6 с.
- [20] РД 52.18.289–90 Руководящий документ. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. М., 1990. 36 с.
- [21] ГОСТ 12.1.007–76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. М.: Изд-во стандартов, 1976. 6 с.
- [22] ПНД Ф 14.1:2:4.139–98 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций железа, кобальта, марганца, меди, никеля, серебра, хрома и цинка в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектроскопии. М., 1998. 24 с.
- [23] РД 52.04.186-89 Руководящий документ. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М., 1991. 693 с.
- [24] Кузнецов А.М., Фесюн А.П., Самохвалов С.Г., Махонька Э.П. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственной и продуктивной растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
- [25] Алексеев В.А. Некоторые вопросы диагностики и классификации поврежденных загрязнением лесных экосистем // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. С. 8–54.
- [26] Бойко А.А. Дендрозоологическая характеристика березы повислой в условиях смешанного типа загрязнения окружающей среды Уфимского промышленного центра: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2005. 24 с.
- [27] Фирсова В.П., Павлова Т.С. Почвенные условия и особенности биологического круговорота веществ в горных сосновых лесах. М.: Наука, 166 с.
- [28] Рыкус М.В., Сначев В.И., Кузнецов Н.С., Савельев Д.Е., Бажин Е.А., Сначев А.В. Рудоносность дунит-гарцбургитовой и черносланцевой формаций пограничной зоны между Южным и Средним Уралом // Геология и геофизика. Нефтегазовое дело, 2009. Т. 7, № 2. С. 17–27.

Сведения об авторах

Кузьмина Надежда Александровна — мл. науч. сотр. ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН», arkaya05@mail.ru

Мохначев Павел Евгеньевич — мл. науч. сотр. ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН», mohnachev74@mail.ru

Менщиков Сергей Леонидович — д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр., зав. лабораторией экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН», mshl@botgard.uran.ru

Поступила в редакцию 10.08.2020.

Принята к публикации 25.09.2020.

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN SNOW WATER, SOIL AND THE STATE OF BIRCH STANDS IN CONDITIONS OF TECHNOGENIC POLLUTION

N.A. Kuz'mina, P.E. Mokhnachev, S.L. Menshchikov

Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, 32 a, Bilimbaevskaya st., 620144, Yekaterinburg, Russia
yarkaya05@mail.ru

The results of research of snow cover, soil and condition of birch stands under the influence of aerotechnogenic emissions from JSC «Karabashmed», which pollute the environment and change it for more than 100 years. It was revealed that as the source of pollution is approached, the pH of snow water decreases, the mass of dry residue and the content of suspended solids significantly increase. The excess of heavy metals within a radius of 5 km from the plant in snow water was established, compared to the background by tens of times. Here, in some places, the absence of a ground cover was found. Atmospheric precipitation partially sorbs on itself the pollutants contained in the airborne industrial emissions of the enterprise, and directly gets into the snow cover and soil. The results of studying the level of pollution of snow and soil make it possible to assess the state of forest ecosystems. A strong quality of metals on the earth's surface was revealed by analyzing the chemical composition of the sediments, a series was determined in decreasing order: Fe > Zn > Cu > Pb > Mn > Cd > Ni 1 km from the plant. One of the main pollutants is iron, zinc, copper is contained in ore slags in the form of pyrite, magnetite and enters the atmosphere during processing with dust emissions, then adsorbs or dissolves and enters with snow, polluting the soil cover. Under background conditions (24 km) with snowfall, Fe, Zn, and Cu were received less by 95 % than under impact zones near the source (1 km). A significant excess of the content of heavy metals, such as Cu, Zn, Pb, Fe and Cd, in the forest litter and in the upper soil horizons in the zone of strong pollution was determined. A decrease in the Fe content down the soil profile in the zone of strong pollution was found, and in the background — an increase with depth. The indirect (through the soil) and direct negative impact of gases (sulfur dioxide, formaldehyde vapor and hydrogen fluoride) and dust emissions from the plant on the state of birch stands was established, which determines an increase in defoliation, an average damage index, as well as a decrease in the average height of trees

Keywords: birch *Betula pendula* Roth., aerotechnogenic pollution, snowy water, heavy metals, soil, stand assessment, tax indicators, defoliation, status category

Suggested citation: Kuz'mina N.A., Mokhnachev P.E., Menshchikov S.L. *Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v snegovoy vode, pochve i sostoyaniye berezovykh drevostoev v usloviyakh tekhnogenogo zagryazneniya* [Accumulation of heavy metals in snow water, soil and the state of birch stands in conditions of technogenic pollution] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 73–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-73-82

References

- [1] Kolesnikov B.P. *Lesa Chelyabinskoy oblasti* [Forests of the Chelyabinsk region]. *Lesa SSSR* [Forests of the USSR]. Moscow: Nauka, 1969, pp. 125–156.
- [2] Koroteeva E.V., Veisberg E.I., Kuyantseva N.B. *Otsenka sostoyaniya tsenoflory v zone vozdeystviya Karabashsogo medeplavil'nogo kombinata (Yuzhnyy Ural)* [Assessment of the state of cenoflora in the impact zone of the Karabash copper smelting plant (southern Ural)]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, t. 13, no. 1–4, pp. 1005–1011.
- [3] Menshchikov S.L., Ivshin A.P. *Zakonomernosti transformatsii predtundrovyykh Itayozhnykh lesov v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya* [Regularities of transformation of pre-tundra and taiga forests in conditions of aerotechnogenic pollution]. Yekaterinburg: Ural branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, 294 p.
- [4] Agikov I.N. *Bioindikatsiya vozdeystviya aerotekhnogenykh poiutantov zvetnoy metallurgii na sosnu obyknovennuyu, kak pokazatel' sostoyaniya lesnykh ekosistem* [Bioindication of the impact of aerotechnogenic pollutants of non-ferrous metallurgy on common pine, as an indicator of the state of forest ecosystems. *Ekologiya i promyshlennost'* [Ecology and industry of Russia], 2011, no. 7, pp. 26–28.
- [5] Bachurina A.V. *Vliyanie aeropromyvbrosov ZAO «Karabashmed» na taksazyonnye pokazateli i sanitarnoe sostoyanie sosnovykh i berezovykh drevostoev* [Influence of aeropromyvbros of CJSC «Karabashmed» on tax indicators and sanitary condition of pine and birch stands]. *Izvestiya Sankt-peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestia of the Saint Petersburg forestry Academy], 2007, iss. 181, pp. 35–40.
- [6] Bachurina A.V. *Vliyanie promyshlennykh poiutantov ZAO «Karabashmed» na sostoyanie prilegayushchikh lesnykh nasazhdeniy* [Influence of industrial pollutants of CJSC «Karabashmed» on the state of adjacent forest stands]. *Diss. Cand. Sci. (Agric.)*. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2008, 21 p.
- [7] Zalesov S.V., Bachurina A.V. *Izmenenie morfometricheskikh pokazateley khvoi sosny obyknovennoy v usloviyakh aeropromyvbrosov* [Change in morphometric indicators of pine needles in the conditions of aeropromyvbros]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2008, no. 3, pp. 36–38.
- [8] Usoltsev V.A., Vorobeichik E.L., Bergman I.E., Trubina M.R., Bachurina A.V. *Struktura fitomassy nizhnego lesnogo yarusa vblizi medeplavil'nykh zavodov Urala* [Biomass structure of forest understory near copper smelters on the Ural]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Russian forests and forestry in], 2011, no. 4 (41), pp. 37–44.
- [9] *Kompleksnyy doklad o sostoyanii okruzhayushchey sredy Chelyabinskoy oblasti* [Comprehensive report on the state of the environment of the Chelyabinsk region in 2012]. Chelyabinsk: Ministry of radiation and environmental safety of the Chelyabinsk region, 2013, 232 p.
- [10] *Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Chelyabinskoy oblasti v 2017* [Report on the environmental situation in the Chelyabinsk region in 2017]. Chelyabinsk: Ministry of ecology of the Chelyabinsk region, 2018, 144 p.

- [11] *Doklad ob ekologicheskoy situacii v Chelyabinskoy oblasti v 2018* [Report on the environmental situation in the Chelyabinsk region in 2018]. Chelyabinsk: Ministry of ecology of the Chelyabinsk region, 2019, 179 p.
- [12] Yanchenko N.I., Baranov A.N., Yershov V.A., Timkina E.V. *Izmenenie pH i elektroprovodimosti snezhnogo pokrova Bratska* [Change in the pH and electrical conductivity of the Bratsk snow cover]. *Ekologiya i ratsional'noe prirodopol'zovanie* [Ecology and rational nature management], 2014, no. 3(23), pp. 190–192.
- [13] Motuzov G.V. *Soedinenie mikroelementov v pochve: sistemnaya organizatsiya, ekologicheskoe znachenie, monitoring* [Compounds of microelements in soils: system organization, ecological significance, monitoring]. Moscow: Editorial URSS, 1999, 168 p.
- [14] Goncharova I.A., Skripalschikova L.N., Barchenkov A.P., Shushpanov A.S. *Otsenka komponentov nizhnikh yarusov rastitel'nogo pokrova v antropogenno narushennykh bereznyakakh Krasnoyarskoy lesostepi* [Understorey vegetation cover components assessment in anthropogenically disturbed birch stands of Krasnoyarsk forest-steppe]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2020, no. 1, pp. 75–87. DOI:10.37482/0536-1036-2020-1-75-87
- [15] Chernykh V.L., Chernykh L.V., Chernykh D.V. *Matematicheskie modeli produktivnosti drevostoev sosny, eli, beryozy, osiny i lipy Gornogo Urala* [Mathematical models of productivity of stands of pine, spruce, birch, aspen and Linden of the Mountain Urals]. Forests of Eurasia-Serbian forests: Materials of the XVIII International conference of young scientists dedicated to academician Professor Zhark Miletich (1891–1968) Belgrade: Forest faculty of the University of Belgrade, 2019, pp. 75–82.
- [16] Bachurina A.V., Zalesov S.V. *Ispol'zovanie metoda bioindikatsii dlya otsenki kachestva sredy promyshlennykh gorodov Urala* [Bioindication method application to assess environment quality of industrial cities in the Urals]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 11–17. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-11-17
- [17] Veselkin D.V., Kuyantseva N.B., Chashchina O.E., Koroteeva E.V. *Vliyanie vybrosov Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata (Yuzhnyy Ural) na razmer i fluktuiruyushchuyu asimmetriyu lista podrosta Betula pendula (Betulaceae)* [Impact of Karabash copper smelter emissions on leaf size and fluctuating asymmetry of *Betula pendula* (Betulaceae) undergrowth]. *Rastitel'nye resursy* [Plant resources], 2016, vol. 56, no. 1, pp. 109–124.
- [18] *GOST 17.4.4.02.84 Pochva*. [State standard 17.4.4.02.84. Soil. Methods of selection and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow: Publishing house of standards, 1984, 6 p.
- [19] *GOST 26423–85* [Methods for determining the specific electrical conductivity, pH and dense residue of water extract]. Moscow: Publishing house of standards, 1985, 6 p.
- [20] *RD 52.18.289–90* [Guidance document. Methodical instructions. Method of performing measurements of the mass fraction of mobile forms of metals in soil samples by atomic absorption analysis]. Moscow, 1990, 36 p.
- [21] *GOST 12.1007–76 Vrednye veshchestva. Klassifikatsiya i obshchie trebovaniya bezopasnosti* [Harmful substances. Classification and general safety requirements]. Moscow: Izd-vo standartov [Publishing house of standards], 1976, 6 p.
- [22] *PND F 14.1: 2: 4.139–98 Kolichestvennyy khimicheskyy analiz vod. Metodika vypolneniya izmereniy massovykh kontsentratsiy zheleza, kobal'ta, margantsa, medi, nikelya, srebra, khroma i tsinka v probakh pit'evykh, prirodnykh i stochnykh vod metodom atomno-absorbtsionnoy spektrometrii* [Quantitative chemical analysis of waters. Methods for performing measurements of mass concentrations of iron, cobalt, manganese, copper, nickel, silver, chromium and zinc in samples of drinking, natural and waste water by atomic absorption spectrometry]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet rossiyskoy federatsii po okhrane okruzhayushchey sredy [State Committee of the Russian Federation for Environmental Protection], 1998, 24 p.
- [23] *RD 52.04.186–89* [Guidance document. Guidelines for the control of atmospheric pollution]. Moscow, 1991, 693 p.
- [24] Kuznetsov A.M., Fesyun A.P., Samokhvalov S.G., Makhon'ka E.P. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozogodiy i produktivnykh rastenievodstva* [Methodical instructions for the determination of heavy metals in agricultural soils and crop production]. Moscow: TsSNAO, 1992, 61 p.
- [25] Alekseev V.A. *Nekotorye voprosy diagnostiki i klassifikatsii povrezhdennykh pagryaznenniem lesnykh ekosistem* [Some questions of diagnostics and classification of forest ecosystems damaged by pollution. Forest ecosystems and atmospheric pollution]. Leningrad: Nauka, 1990, pp. 8–54.
- [26] Boyko A.A. *Dendrologicheskaya kharakteristika breezypovisloy v usloviyakh smeschannogo tipa zagryazneniy okruzhayushchey sredy Ufimskogo promyshlennogo tsentra* [Dendroecological characteristics of the hanging birch in conditions of mixed type of environmental pollution of the Ufa industrial center]. Diss. Cand. Sci. (Biology). Ufa, 2005, 24 p.
- [27] Firsova V.P., Pavlova T.S. *Pochvennye usloviya i osobennosti biologicheskogo krugovorota veshchestv v gornykh sosnovykh lesakh* [Soil conditions and features of the biological cycle of substances in mountain pine forests]. Moscow: Nauka, 166 p.
- [28] Rykus M.V., Snachev V.I., Kuznetsov N.S., Savelev D.E., Bazhin E.A., Snachev A.V. *Rudonosnost' dunit-gartsburgitovoy i chernoslanitsevoy formatsiy pogranichnoy zony mezdu Yuzhnyim i Srednim Uralom* [Ore content of dunite-harzburgite and black-shale formations of the border zone between the Southern and Middle Urals]. *Geology and Geophysics. Oil and gas business*, 2009, t. 7, no. 2, pp. 17–27.

Authors' information

Kuz'mina Nadezhda Aleksandrovna — Junior Researcher, Ecology Laboratory of technogenic plant communities, Forest Department, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, yarkaya05@mail.ru

Mokhnachev Pavel Evgenievich — Junior Researcher, Ecology Laboratory of technogenic plant communities, Forest Department, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, mohnachev74@mail.ru

Menshchikov Sergey Leonidovich — Dr. Sci. (Agriculture), Head of Laboratory, Forest Department, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, msl@botgard.uran.ru

Received 10.08.2020.

Accepted for publication 25.09.2020.