

ПОВРЕЖДЕННОСТЬ ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ НАСЕКОМЫМИ В ГРАДИЕНТЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЫБРОСАМИ СРЕДНЕУРАЛЬСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА

© 2024 г. Е. А. Бельская^{а,*}, Г. А. Замшина^а

^аИнститут экологии растений и животных УрО РАН, Россия 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

*e-mail: belskaya@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 27.10.2023 г.

После доработки 06.12.2023 г.

Принята к публикации 20.01.2024 г.

Проанализирована доля поврежденных листьев березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) насекомыми на 10 участках хвойного леса вдоль градиента загрязнения выбросами Среднеуральского медеплавильного завода. Исследование проведено в период умеренных (2009 г.) и низких (2019 г.) выбросов в начале и конце лета. Доля поврежденных листьев была выше в 2019 г. и увеличивалась к концу периода вегетации, но не была связана с расстоянием до завода и концентрацией свинца в листьях.

Ключевые слова: насекомые-фитофаги, токсическая нагрузка, снижение выбросов, период вегетации

DOI: 10.31857/S0367059724030065 **EDN:** BJTFRW

Насекомые-фитофаги – одно из важнейших звеньев в функционировании лесных экосистем. Их численность и активность во многом зависят от условий обитания, которые определяются как природными (погодные условия, характеристики биотопа и др.), так и антропогенными факторами. Техногенное загрязнение представляет одно из наиболее важных антропогенных воздействий на все компоненты лесных экосистем, включая насекомых-фитофагов. Результаты большого количества работ, посвященных исследованию влияния промышленных токсикантов на репродуктивные показатели, выживаемость, скорость роста и обилие фитофагов, обобщены в ряде обзоров [1–4]. Эти работы проведены на отдельных видах или близких таксономических группах фитофагов и не затрагивают реакцию на загрязнение всего комплекса видов, обитающих на конкретной территории.

Изменение доли поврежденных листьев (далее – поврежденность), отражающей трофическую активность комплекса фитофагов, исследовали вблизи целого ряда крупных промышленных предприятий [5–7]. В этих работах показано уменьшение, а в ряде случаев отсутствие изменений поврежденности листьев в зависимости от уровня промышленного загрязнения. Противоречивые результаты получены и в исследованиях реакций насекомых-фитофагов на загрязнение в условиях снижения объема выбросов [8]: отмечено как

увеличение поврежденности листьев на сильно загрязненной территории после сокращения выбросов [9], так и ее снижение [10]. В силу малого объема данных и противоречивости полученных результатов для интерпретации изменений в сообществах насекомых-фитофагов при техногенном воздействии, особенно в условиях его сокращения, требуется накопление большего количества информации, собранной в разные годы и в разных условиях среды обитания насекомых.

Особенно сильное влияние на биоту оказывают выбросы предприятий цветной металлургии, содержащие целый комплекс экотоксикантов: тяжелые металлы, SO₂, соединения фтора и др. [11]. Территории вокруг длительно действующих металлургических предприятий – удобные полигоны для экотоксикологических исследований. В таких импактных регионах можно подобрать участки с широким спектром уровней загрязнения [5, 12], что позволяет изучать реакции экосистем на внешнее воздействие и восстановление в результате снижения токсической нагрузки. Один из полигонов для подобных исследований – окрестности Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ). Здесь относительно подробно изучены реакции биоты на загрязнение и восстановление некоторых компонентов экосистем при снижении выбросов [8].

Настоящая работа – продолжение многолетних исследований трофической активности фитофагов в градиенте загрязнения выбросами СУМЗа. Ранее установлено как отсутствие эффекта загрязнения на трофическую активность и плотность филлофагов березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) [5], так и снижение поврежденности листьев березы пушистой и осины (*Populus tremula* L.) на сильно загрязненной территории по сравнению с удаленными территориями [6, 7]. В работе Е.А. Бельской [9] проанализирована многолетняя динамика поврежденности листьев березы на двух участках березового леса, контрастных по уровню загрязнения (высокий и фоновый), в условиях сокращения выбросов СУМЗа. В отличие от этой работы настоящее исследование проведено на 10 участках хвойного леса с целью анализа изменения поврежденности листьев насекомыми-фитофагами вдоль градиента загрязнения на примере двух лет с разным объемом промышленных выбросов и в течение вегетационного периода. Мы предполагали, что поврежденность листьев зависит от уровня токсической нагрузки (концентрации Pb в листьях березы) и будет увеличиваться при снижении объема выбросов и к концу периода вегетации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

СУМЗ – одно из крупнейших предприятий цветной металлургии в России, расположенное на Среднем Урале (г. Ревда). В состав основных загрязнителей входят оксиды серы, азота и полиметаллическая пыль, содержащая тяжелые металлы (ТМ) Cu, Pb, Cd, Zn. Максимальный объем выбросов предприятия в 1980-х гг. (150–225 тыс. т/год) сократился к 2010 г. до минимума (3–4 тыс. т/год) [13]. Первый учет был проведен в период умеренных выбросов (24.1 тыс. т/год, 2009 г.), второй – в период низких выбросов (4 тыс. т/год, 2019 г.). Погодные условия периода активности фитофагов (май – август) двух лет приведены по данным метеостанции г. Ревды (табл. 1).

Долю поврежденных листьев березы оценивали на 10 участках, 9 из которых представлены корен-

ным елово-пихтовым лесом и один (ближайший к заводу) – вторичным березовым лесом на месте погибших хвойных деревьев. Участки расположены на разном удалении от СУМЗа и различались по уровню загрязнения листьев березы [14]. Поврежденность листьев учитывали 16–20 июня и 24–27 августа 2009 г., 17–24 июня и 19–23 августа 2019 г. На каждом участке произвольно выбирали 5 взрослых деревьев на расстоянии не менее 100 м друг от друга. Учеты в разные годы и периоды вегетации проводили на разных деревьях. Чтобы исключить предвзятость в отборе проб, ветви для анализа выбирали с расстояния 5–10 м, на котором нельзя было визуально оценить степень поврежденности листьев. Под ветвь учетного дерева подвешивали мешок на обруче, срезали участок ветви длиной 30–50 см (медиана числа листьев равна 84) и мешок завязывали. В лаборатории листья сортировали на поврежденные насекомыми и без повреждений. Листья короче 10 мм (на вершине длинных побегов) исключали из анализа. Для каждого дерева определяли поврежденность листьев. За два года проанализирован 17 081 лист со 199 деревьев. Одно дерево исключили из анализа в связи с ошибкой записи в ведомости учетов. В анализе использовали листья с укороченных и удлиненных побегов. Хотя есть данные о том, что филлофаги предпочитают листья на ауксибластах листьям на брахибластах [15, 16], было показано, что исключение ауксибластов из расчетов не влияет на общую поврежденность [9].

Для характеристики токсической нагрузки использовали концентрацию Pb в листьях той же ветви, на которой учитывали поврежденность (методика определения изложена ранее [14]). Этот металл обладает высокой токсичностью для живых организмов и может служить маркером промышленного загрязнения в районе исследований. Его концентрации в почве и листьях связаны с расстоянием до источника выбросов [14, 17]. В 2019 г. концентрации Pb в листьях уменьшились по сравнению с 2009 г. на ближайших к СУМЗу участках. Различий между годами на более удаленных участках не обнаружено [14].

Таблица 1. Погодные условия вегетационного периода в годы исследования

Месяц	Среднемесячная температура, °С		Сумма осадков, мм	
	2009 г.	2019 г.	2009 г.	2019 г.
Май	10.2	12.0	48.9	44.5
Июнь	17.0	14.9	29.2	24.5
Июль	16.0	18.5	116.3	58.5
Август	14.6	14.7	98.6	122.1
За период вегетации	14.5	15.0	293	249.6

В анализе использовали индивидуальные для каждого дерева значения поврежденности и концентрации Рb. Анализировали поврежденность листьев березы в зависимости от концентрации Рb (непрерывная переменная) и категориальных переменных: год, период вегетации и участок (случайный фактор). Статистический анализ выполнен в ПО STATISTICA v. 10 (модуль Advanced Linear/Nonlinear Models). Парные сравнения между годами и периодами вегетации выполнены по Тьюки. Для поврежденности листьев использовали угловое преобразование Фишера, концентрации Рb логарифмировали. Связь поврежденности с расстоянием до завода оценивали с помощью линейной корреляции Пирсона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поврежденность листьев была выше в 2019 г. по сравнению с 2009 г. и увеличивалась в конце лета (табл. 2, рис. 1). Она не зависела ни от участка, ни от концентрации Рb в листьях (см. табл. 2). Коэффициент линейной корреляции поврежденности листьев с расстоянием до завода в разные годы и периоды вегетации был незначим (см. рис. 1).

Реакцию биологических систем на техногенное загрязнение обычно рассматривают как функцию расстояния от источника загрязнения или содержания токсикантов в депонирующих средах [5, 11]. Учитывая многочисленные свидетельства негативного воздействия ТМ на насекомых [1, 3, 4, 18], мы ожидали, что повышение токсической нагрузки приведет к снижению поврежденности листьев при приближении к СУМЗу – крупному источнику загрязнения ТМ. К тому же ранее было показано снижение поврежденности листьев березы пушистой и осины на сильно загрязненном участке леса вблизи СУМЗа по сравнению с фоновой территорией [6, 7, 9]. Однако в настоящем исследовании доля поврежденных листьев не зависела ни от расстояния, ни от концентрации в них

Рb. Такой же результат получен М.В. Козловым с соавт. [5] при учете поврежденности листьев березы пушистой на участках хвойного леса в градиенте загрязнения выбросами СУМЗа в 2003 г.

Поврежденность листьев отражает реакцию комплекса насекомых-фитофагов не только на загрязнение, но и на такие условия среды их обитания, как микроклимат, освещенность, состав древостоя. Характеристики биотопов могут существенно отличаться даже в градиенте одного и того же источника загрязнения [10, 19, 20], что должно приводить к увеличению пространственной вариативности поврежденности листьев деревьев. Такое увеличение пространственной и межгодовой изменчивости поврежденности установлено для импактных территорий источников промышленного загрязнения [6, 7, 10]. В более ранних работах [6, 7, 9] мы обследовали участки со сходным составом древостоя, выбирая деревья с близким уровнем освещенности. Это позволило более четко вычленить эффект загрязнения среди влияния других факторов и показать значимые различия между участками с разным уровнем загрязнения. На результат настоящего исследования могли повлиять особенности хвойного биотопа, в котором изреживание и изменение состава древостоя на импактной территории увеличивают изменчивость микроклимата и освещенности деревьев, а также вероятно, поврежденности листьев.

Доля поврежденных листьев березы увеличилась в 2019 г. по сравнению с 2009 г. Полученные результаты согласуются с выводами Е.А. Бельской [9], исследовавшей многолетнюю динамику поврежденности березы на двух контрастных по загрязнению ТМ участках березового леса в окрестностях СУМЗа. В этой работе показано увеличение доли поврежденных листьев на сильно загрязненном участке после снижения выбросов. Однако мы не можем утверждать, что увеличение в 2019 г. доли поврежденных листьев березы пушистой в хвойном лесу связано

Таблица 2. Результаты анализа межгодовой и внутрисезонной изменчивости поврежденности листьев березы филлофагами в градиенте загрязнения выбросами СУМЗа (10 участков, 2009 и 2019 гг., 2 периода вегетации, GLMM, тип 3 SS, $df_{\text{error}} = 158$)

Источник изменчивости	Фактор	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Рb	Фиксированный	1	3.44	0.07
Год		1	34.26	<0.0001
Период		1	28.76	0.0003
Год × период		1	5.53	0.04
Участок	Случайный	9	1.45	0.31
Год × участок		9	1.31	0.35
Период × участок		9	2.24	0.12
Год × период × участок		9	1.72	0.09

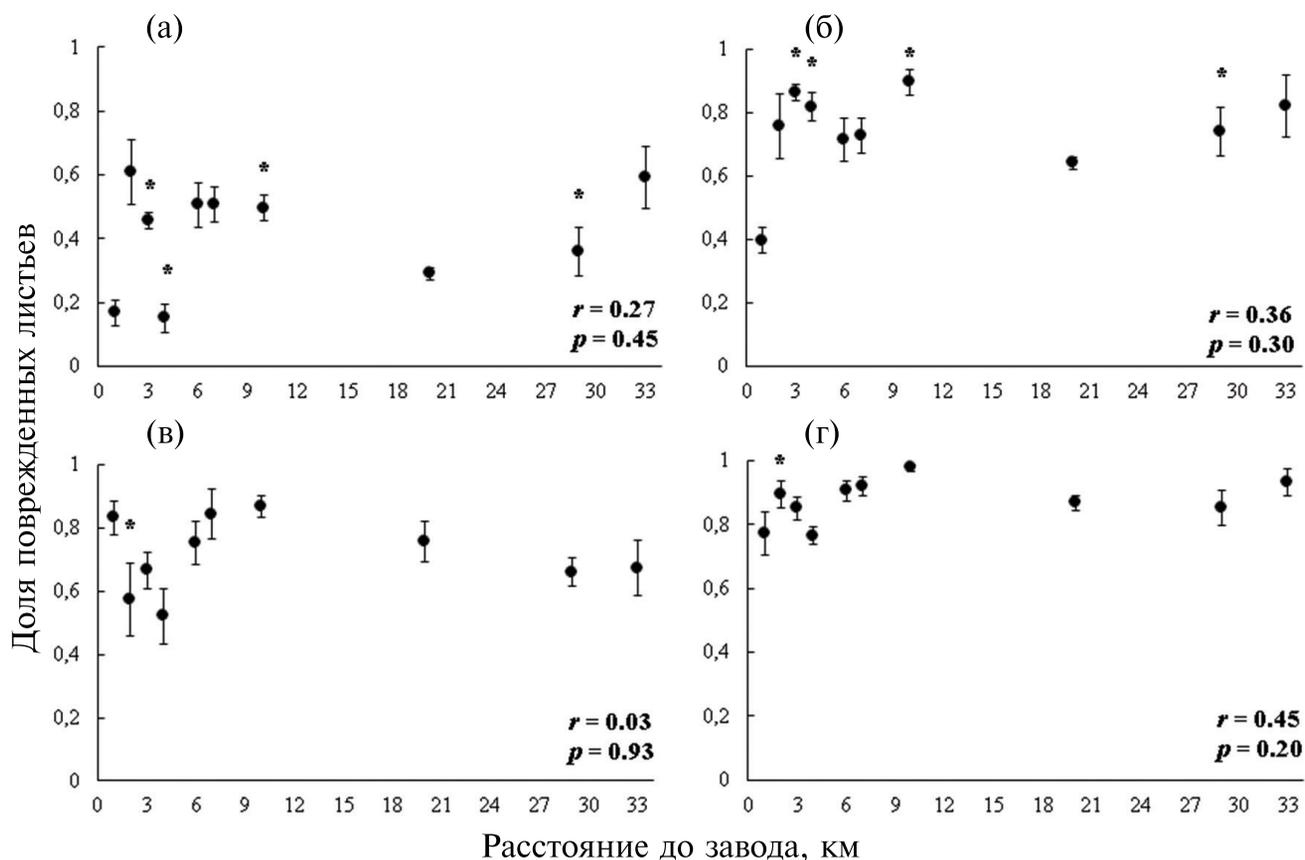


Рис. 1 Изменение доли поврежденных листьев березы в градиенте загрязнения СУМЗа: а, б – начало лета 2009 и 2019 гг.; в, г – конец лета 2009 и 2019 гг.; кружок – среднее значение, планки погрешностей – ошибка; r – коэффициент корреляции поврежденности с расстоянием до завода; звездочка – значимые ($p < 0.05$) различия между годами.

с уменьшением токсической нагрузки, учитывая отсутствие значимого влияния концентрации высокотоксичного Рb на этот показатель. Можно предположить, что такой эффект вызвали погодные условия. На эту мысль наводит повышение поврежденности листьев в 2019 г. не только на загрязненных, но и на фоновых участках. В некоторых исследованиях показано увеличение доли поврежденных листьев и обилия филофагов при увеличении температуры текущего и предыдущих вегетационных периодов [9, 21]. В нашем исследовании средние температуры с мая по август 2009 и 2019 гг. были близки (14.5°C и 15°C) (см. табл. 1), как и в предыдущие 2008 и 2018 гг. (15.4°C и 14.2°C). Для насекомых-фитофагов особое значение имеет температура середины лета [22]. Средняя температура июля в окрестностях СУМЗа в 2019 г. на 2.5°C превышала таковую в 2009 г. (18.5°C и 16°C). Однако мы не можем отнести увеличение поврежденности в 2019 г. только за счет более теплого июля. Подобное потепление климата на Кольском полуострове не привело к повышению поврежденности листьев березы [10], а фитофаги в умеренных широтах, в которых расположен район нашего исследования,

должны быть менее чувствительны к изменениям температуры, чем на севере [22].

Увеличение поврежденности листового аппарата к концу вегетационного периода [21, 23, 24] указывает на необходимость синхронизации учетов при сравнении поврежденности на нескольких участках градиента загрязнения. Нами в данной работе показано увеличение доли поврежденных листьев в год с меньшим объемом выбросов и к концу лета. Однако поврежденность листьев и различия этого показателя между годами не были связаны с концентрациями в листьях высокотоксичного Рb и расстоянием до завода.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИЭРиЖ УрО РАН и частично поддержана грантами РФФИ № 13-04-01229 и РФФИ – Академии Финляндии № 08-04-91766. Авторы благодарят Е.А. Бельского и А.Н. Созонтова за помощь при проведении полевых работ, анализе материала и за обсуждение рукописи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Butler C.D., Trumble J.T.* Effects of pollutants on bottom-up and top-down processes in insect-plant interactions // *Annu. Rev. Entomol.* 2008. V. 156. № 1. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.12.026>
2. *Zvereva E.L., Kozlov M.V.* Responses of terrestrial arthropods to air pollution: A meta-analysis // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2010. V. 17. № 2. P. 297–311.
<https://doi.org/10.1007/s11356-009-0138-0>
3. *Рославцева С.А.* Влияние промышленных химических поллютантов на насекомых // *Агрехимия.* 2000. № 2. С. 85–91.
4. *Селиховкин А.В.* Ответные реакции насекомых-дендрофагов на промышленное загрязнение воздуха // *Биосфера.* 2013. Т. 5. № 1. С. 47–76.
5. *Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E.* Impacts of point polluters on terrestrial biota. Dordrecht: Springer, 2009. V. 15. 466 p.
<https://doi.org/10.1007/978-90-481-2467-1>
6. *Бельская Е.А., Воробейчик Е.Л.* Реакция филофагов осины на выбросы Среднеуральского медеплавильного завода // *Экология.* 2013. № 2. С. 99–109. [*Belskaya E.A., Vorobeichik E.L.* Responses of leaf-eating insects feeding on aspen to emissions from the Middle Ural copper smelter // *Russ. J. Ecol.* 2013. V. 44. № 2. P. 108–117.]
<https://doi.org/10.7868/S0367059713020042>
7. *Бельская Е.А., Воробейчик Е.Л.* Изменение трофической активности филофагов березы в градиенте загрязнения выбросами Среднеуральского медеплавильного завода // *Сиб. экол. журн.* 2015. № 3. С. 486–495. [*Belskaya E.A., Vorobeichik E.L.* Changes in the trophic activity of leaf-eating insects in birch along the pollution gradient near the Middle Ural copper smelter // *Contemp. Probl. Ecol.* 2015. V. 8. № 3. P. 397–404.]
<https://doi.org/10.15372/SEJ20150316>
8. *Воробейчик Е.Л.* Естественное восстановление наземных экосистем после прекращения промышленного загрязнения. 1. Обзор современного состояния исследований // *Экология.* 2022. № 1. С. 3–41. [*Vorobeichik E.L.* Natural recovery of terrestrial ecosystems after the cessation of industrial pollution: 1. A state-of-the-art review. *Russ. J. Ecol.* 2022. V. 53. № 1. P. 1–39.]
<https://doi.org/10.31857/S0367059722010115>
9. *Бельская Е.А.* Динамика трофической активности филофагов березы в период снижения атмосферных выбросов медеплавильного завода // *Экология.* 2018. № 1. С. 74–80. [*Belskaya E.A.* Dynamics of trophic activity of leaf-eating insects on birch during reduction of emissions from the Middle Ural copper smelter // *Russ. J. Ecol.* 2018. V. 49. № 1. P. 87–92.]
<https://doi.org/10.7868/S0367059718010092>
10. *Kozlov M.V., Zverev V., Zvereva E.L.* Combined effects of environmental disturbance and climate warming on insect herbivory in mountain birch in subarctic forests: results of 26-year monitoring // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 601–602. P. 802–811.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.230>
11. *Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
12. *Воробейчик Е.Л., Козлов М.В.* Воздействие точечных источников эмиссии поллютантов на наземные экосистемы: методология исследований, экспериментальные схемы, распространенные ошибки // *Экология.* 2012. № 2. С. 83–91. [*Vorobeichik E.L., Kozlov M.V.* Impact of point polluters on terrestrial ecosystems: methodology of research, experimental design, and typical errors // *Russ. J. Ecol.* 2012. V. 43. № 2. P. 89–96.]
<https://doi.org/10.1134/S1067413612020166>
13. *Воробейчик Е.Л., Трубина М.Р., Хантемирова Е.В.* и др. Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода // *Экология.* 2014. № 6. С. 448–458. [*Vorobeichik E.L., Trubina M.R., Khantemirova E.V.* et al. Long-term dynamic of forest vegetation after reduction of copper smelter emissions // *Russ. J. Ecol.* 2014. V. 45. № 6. P. 498–507.]
<https://doi.org/10.7868/S0367059714060158>
14. *Бельская Е.А., Замшина Г.А.* Тяжелые металлы в листьях березы в период сокращения выбросов крупного медеплавильного завода // *Экология.* 2023. № 6. С. 446–452 [*E.A. Belskaya, G.A. Zamshina.* Heavy metals in birch leaves during reduction of emissions from a large copper smelter // *Russ. J. Ecol.* 2023. V. 54. № 6. P. 509–515.]
<https://doi.org/10.31857/S0367059723060112>
15. *Баранчиков Ю.Н.* Экологическая неоднородность побегов древесных растений и уровень их освоения насекомыми-филофагами // *Роль взаимоотношений растение–насекомое в динамике численности лесных вредителей.* Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1983. С. 49–72.

16. *Богачева И.А.* Избирательность повреждения насекомыми листьев определенного размера и некоторые методические последствия этого феномена // Экология. 2002. № 6. С. 449–454. [*Bogacheva I.A.* Size-dependent selective leaf damage by insects and some methodological implications of this phenomenon // *Russ. J. Ecol.* 2002. V. 33. № 6. P. 423–428.] <https://doi.org/10.1023/A:1020907732510>
17. *Воробейчик Е.Л., Кайгородова С.Ю.* Многолетняя динамика содержания тяжелых металлов в верхних горизонтах почв в районе воздействия медеплавильного завода в период сокращения объемов его выбросов // Почвоведение. 2017. № 8. С. 1009–1024. <https://doi.org/10.1134/S1064229317080130>
18. *Monchanin C., Devaud J.M., Barron A.B., Lihoreau M.* Current permissible levels of metal pollutants harm terrestrial invertebrates // *Sci. Total Environ.* 2021. 779. 146398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146398>
19. *Бельский Е.А., Бельская Е.А.* Население птиц березовых лесов Южного Урала в условиях промышленного загрязнения. 2. Связь с характеристиками местообитаний // Сиб. экол. журн. 2013. № 3. С. 413–421.
20. *Бергман И.Е., Воробейчик Е.Л.* Влияние выбросов медеплавильного завода на формирование запаса и разложение крупных древесных остатков в елово-пихтовых лесах // Лесоведение. 2017. № 1. С. 24–38.
21. *Богачева И.А.* Взаимоотношения насекомых-фитофагов и растений в экосистемах Субарктики. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 137 с.
22. *Kozlov M.V., van Nieukerken E.J., Zverev V., Zvereva E.L.* Abundance and diversity of birch-feeding leafminers along latitudinal gradients in northern Europe // *Ecography.* 2013. V. 36. P. 1138–1149. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00272.x>
23. *Гуров А.В., Петренко Е.С.* Особенности освоения листового аппарата насекомыми-филлофагами в молодняках сосны и лиственных пород // Лесоведение. 1986. № 4. С.15–22.
24. *Ермолаев И.В., Сидорова О.В.* Сезонная динамика повреждения липы мелколистной комплексом членистоногих-филлофагов // Зоол. журн. 2011. Т. 90. Вып. 5. С. 552–558.

PROPORTION OF BIRCH LEAVES DAMAGED BY INSECTS ALONG THE POLLUTION GRADIENT OF THE MIDDLE URAL COPPER SMELTER

E. A. Belskaya^{a,*} and G. A. Zamshina^a

^a*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620144 Russia*

**e-mail: belskaya@ipae.uran.ru*

Abstract – The proportion of leaves of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) damaged by insects at ten sites of coniferous forest along the pollution gradient of the Middle Ural copper smelter was analyzed. The study was conducted during periods of moderate (2009) and low (2019) emissions in early and late summer. The proportion of damaged leaves was higher in 2019 and increased towards the end of the growing season but was not associated with distance to the smelter and lead concentration in leaves.

Ключевые слова: herbivorous insects, toxic load, emissions reduction, growing season