

НАДЕЖДА ВЛАДИМИРОВНА ЧУКИНА

кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии и биохимии растений Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

nady_dicusar@mail.ru

НАТАЛЬЯ АНАТОЛЬЕВНА КУТЛУНИНА

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

natakutlunina@mail.ru

ДАРЬЯ РАМИЛЬЕВНА ШАИХОВА

студент 4-го курса департамента «Биологический факультет» Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

darya.booo@mail.ru

ТАТЬЯНА ФЕДОРОВНА ШАРНИНА

студент 4-го курса департамента «Биологический факультет» Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

zapesh_vlad@mail.ru

ИВАН АНДРЕЕВИЧ СИТНИКОВ

студент 4-го курса департамента «Биологический факультет» Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

ivan11011994@mail.ru

ИРИНА СЕРГЕЕВНА КИСЕЛЕВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии и биохимии растений Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

irina.kiseleva@urfu.ru

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВЕГЕТАТИВНЫХ И ГЕНЕРАТИВНЫХ ОРГАНОВ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА*

Исследованы параметры фотосинтетического аппарата листа, фертильность пыльцевых зерен и эффективность опыления 5 видов травянистых растений (*Scorzonera glabra*, *Sanguisorba officinalis*, *Silene athenica*, *Seseli libanotis*, *Artemisia latifolia*) в условиях аэротехногенного воздействия выбросов Карабашского медеплавильного комбината. Обнаружены значимые различия толщины листа, толщины мезофилла и количества фотосинтетических пигментов у растений из импактного и фонового участков. Установлено, что в условиях загрязнения при сохранении высокого уровня фертильности пыльцы у исследуемых видов наблюдались нарушения в строении пыльцевых зерен (изменение числа апертур в оболочке пыльцевых зерен, слипание и др.).

Ключевые слова: экспресс-оценка, аэротехногенное загрязнение, толщина листа, толщина мезофилла, фотосинтетические пигменты, фертильность пыльцевых зерен, число апертур

В настоящее время площади техногенно нарушенных территорий неуклонно увеличиваются. На Урале наблюдается высокая концентрация промышленных предприятий, что со временем приводит к острым экологическим проблемам в регионе. Так, например, территория, прилегающая к Карабашскому медеплавильному ком-

бинату (КМК), объявлена зоной экологического бедствия. Многолетняя деятельность комбината привела к значительной деградации почвенного покрова и превратила земли в непригодные для хозяйственного использования. Фиторекультивация или фиторемедиация данных территорий могла бы вернуть их в разряд хозяйственно ис-

пользуемых, например для выпаса скота, размещения пастбищ, создания рекреационных зон. Для этого необходимо восстановить растительность на этих территориях, в связи с чем важным и актуальным является поиск растений, пригодных для выращивания на нарушенных землях, а также изучение механизмов их устойчивости к факторам загрязнения, включая репродуктивные, для создания устойчивых фитоценозов на восстанавливаемых землях.

Имеющиеся в литературе данные описывают видовой состав флоры окрестностей КМК [6]; дыхательную активность лесной подстилки [14]; степень деградации природных ландшафтов территории комбината [8]. Сведений о механизмах выживания растений в условиях техногенного загрязнения выбросами КМК нет.

Установлено, что фотосинтетический аппарат растений чувствителен к неблагоприятным воздействиям. Изменение его параметров рассматривается как существенное проявление регуляции фотосинтеза на морфогенетическом уровне, что обеспечивает оптимизацию процессов роста и развития, а также адаптацию растений в различных экологических условиях [10].

Восстановление и поддержание численности растений в восстанавливаемых ценозах определяется не только устойчивостью особей, но и их способностью к репродукции. Успешность семенного размножения зависит от протекания опыления и оплодотворения. Пыльцевые зерна образуются из микроспор, формирование которых сопровождается мейозом и является чрезвычайно чувствительным к условиям среды. На процессы микроспорогенеза влияют погодные условия и химическое загрязнение, которое может приводить к полной или частичной стерильности пыльцы, изменению структуры, размеров, формы и морфологической разнокачественности пыльцевых зерен, а также влиять на рост пыльцевых трубок [2], [5], [18], [20].

Используемые в работе методы позволяют провести экспресс-оценку состояния вегетативных (анатомия листа, пигментный состав) и генеративных (фертильность пыльцевых зерен) органов растений в камеральных условиях, не требуют длительной пробоподготовки и относительно недороги. Эти методы могут быть использованы для ежегодного мониторинга состояния растений в окрестностях КМК, подбора видов растений и выработки стратегии восстановления нарушенных местообитаний.

Целью данной работы являлась оценка состояния фотосинтетического аппарата и мужской генеративной сферы растений, выживающих в

условиях аэротехногенного загрязнения в окрестностях КМК, для отбора видов, перспективных для фиторекультивации и фиторемедиации этих территорий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследования включал импактную зону – склоны горы Золотой в окрестностях КМК. Более чем столетняя работа комбината привела к серьезной деградации растительного и почвенного покрова. На склонах горы сформировалась техногенная пустошь: верхние слои почв замещены техногенными образованиями из эрозионных наносов. Основные компоненты загрязнений, связанные с медеплавильным производством: SO_2 -фактор кислотного загрязнения, пылевые выбросы, содержащие большое количество тяжелых металлов (Cu, Pb, Cd, Zn, Fe, и др.), металлургические шлаки и отвалы вскрышных пород [1]. В соответствии с розой ветров район исследования наиболее подвержен атмосферному воздействию. Содержание водорастворимых форм Zn, Cu, Pb, Cd в почвах лесных участков превышает фоновые уровни в 11–38 раз [7]. В качестве относительного контроля (фоновая зона) рассматривали территорию Ильменского заповедника, расположенную в 50 км от КМК.

Были изучены следующие виды растений, доминирующие в фитоценозах горы Золотой: *Scorzonera glabra* Rupr., *Sanguisorba officinalis* L., *Silene amoena* L., *Seseli libanotis* (L.) Koch., *Artemisia latifolia* Ledeb. Материал был собран летом 2015 года в импактном и фоновом местообитаниях. Для исследования отбирали 5–10 листьев среднего яруса с 5–10 генеративных особей каждого вида. Толщину листа, мезофилла и эпидермиса определяли на поперечных срезах листьев с использованием объект- и окуляр-микрометров под световым микроскопом Meiji MT 4300L.

Содержание фотосинтетических пигментов определяли в 80 % растворе ацетона спектрофотометрически в 3 биологических повторностях. Расчет содержания хлорофиллов проводили по формуле Vernon, содержание каротиноидов – по Wettstein [3]. Цветки или соцветия фиксировали в ацетоалкоголе (1 часть ледяной уксусной кислоты и 3 части 96 % этилового спирта). Затем материал промывали и хранили в 70 % этаноле.

Фертильность пыльцевых зерен определяли ацетокарминовым методом [11]. В каждом местообитании исследовано по 5 цветков с 10 растений. В каждом цветке просмотрено 200 пыльцевых зерен. У фертильных пыльцевых зерен зернистая цитоплазма и насыщенный карминово-красный цвет. Стерильные пыльцевые зерна почти не окрашиваются кармином или окраши-

ваются неравномерно. Их содержимое часто отходит от оболочки и находится на разных этапах гибели.

В таблицах и на рисунках указаны средние значения и ошибки среднего. Достоверность различий между выборками по количеству пигментов оценивали по критерию Манна – Уитни при уровне значимости $p < 0,05$ с использованием программы Statistica 6.0. Достоверность различий по фертильности пыльцы определяли с помощью критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определены следующие параметры мезоструктуры фотосинтетического аппарата: толщина листа, толщина мезофилла и эпидермиса, содержание фотосинтетических пигментов. Показаны отличия в структурно-функциональных характеристиках фотосинтетического аппарата изученных видов растений в условиях высокого антропогенного воздействия в сравнении с фоновой зоной. Толщина листовой пластинки и толщина мезофилла у исследованных растений с импактного участка были достоверно выше в среднем на 50 % (рис. 1). Имеющиеся в литературе данные свидетельствуют о подобных же изменениях в структуре фотосинтетического аппарата растений при антропогенных воздействиях [15], [16], [17]. Достоверных изменений в толщине эпидермиса листа обнаружено не было.

Известно, что состояние пигментного аппарата растений может служить индикатором техногенного загрязнения среды. Результаты наших исследований также показали, что пигментный аппарат некоторых видов растений оказался чувствительным к аэротехногенному загрязнению. Так, например, *Seseli libanotis* и *Artemisia latifolia* на территории, прилегающей к КМК, характеризовались значительно более низким содержанием фотосинтетических пигментов в листьях по сравнению с растениями из контрольного местообитания. Наибольшее снижение этого параметра отмечено для *Seseli libanotis*: содержание хлорофилла *a* – в 2,3 раза, хлорофилла *b* – в 4,3 раза, каротиноидов – в 1,8 раза. Уменьшение содержания хлорофилла *b* в листьях этих двух видов было выражено сильнее, чем степень деградации хлорофилла *a* и каротиноидов (табл. 1).

Пигментный аппарат листьев растений *Sanguisorba officinalis*, *Scorzonera glabra* и *Silene repens* оказался устойчивым к условиям аэротехногенного загрязнения: для данных видов не выявлено статистически значимых изменений в содержании пигментов. Имеющиеся в литературе данные подтверждают полученные нами результаты: в условиях техногенного воздействия фотосинтетические пигменты подвергаются деградации либо их синтез нарушается. При этом отмечается, что в условиях умеренного хими-

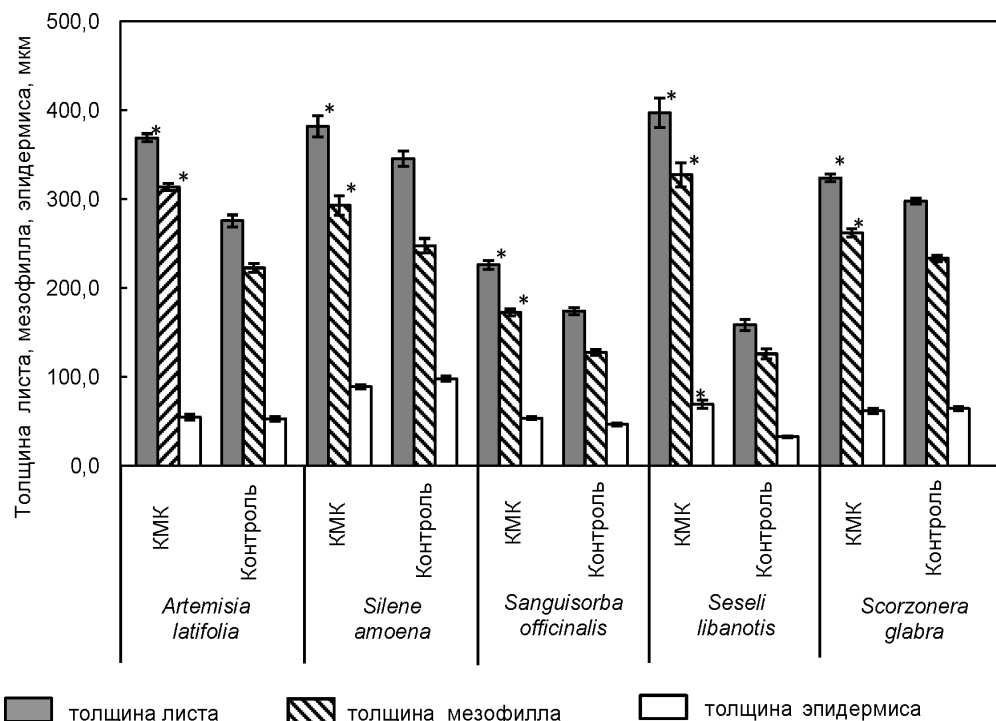


Рис. 1. Параметры листовой пластинки.

* – различия с контролем достоверны при уровне значимости $p < 0,05$

Таблица 1

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях

Вид	Местообитание	Концентрация пигментов, мг/г сух. в.			
		Хл <i>a</i>	Хл <i>b</i>	Хл <i>ab</i>	Кар
<i>Sanquisorba officinalis</i>	КМК	1,50 ± 0,14	0,70 ± 0,10	2,21 ± 0,24	0,56 ± 0,06
	Контроль	1,37 ± 0,13	0,73 ± 0,03	2,10 ± 0,16	0,46 ± 0,05
<i>Artemisia latifolia</i>	КМК	1,61* ± 0,08	0,86 ± 0,04	2,48* ± 0,11	0,58 ± 0,03
	Контроль	2,69 ± 0,42	1,26 ± 0,23	3,95 ± 0,64	0,68 ± 0,09
<i>Scorsonera glabra</i>	КМК	1,27 ± 0,14	0,60 ± 0,08	1,87 ± 0,22	0,39 ± 0,03
	Контроль	1,40 ± 0,07	0,65 ± 0,02	2,06 ± 0,08	0,42 ± 0,05
<i>Seseli libanotis</i>	КМК	1,29 ± 0,07	0,51* ± 0,01	1,80* ± 0,07	0,35* ± 0,02
	Контроль	2,94* ± 0,33	2,18 ± 0,29	5,12 ± 0,53	0,60 ± 0,09
<i>Silene amoena</i>	КМК	1,96 ± 0,21	1,25 ± 0,12	3,21 ± 0,31	0,80 ± 0,09
	Контроль	1,50 ± 0,17	1,02 ± 0,15	2,52 ± 0,32	0,74 ± 0,09

Примечание. * – различия с контролем достоверны при уровне значимости $p < 0,05$.

ческого загрязнения пигментный аппарат видов *Plantago major*, *Populus balsamifera* оказался устойчивым [9], [19]. Этими авторами было показано усиление синтеза антенных пигментов листа в условиях повышения антропогенной нагрузки. Известно, что добавочные пигменты светособирающих комплексов включают хлорофилл *b* и каротиноиды, которые обладают дополнитель-

но антиоксидантными функциями. Нами установлено, что у растений из окрестностей КМК (рис. 2) соотношение хл *a*/хл *b* практически не отличается от значений для растений из фоновой зоны, за исключением *Seseli libanotis*. Отношение хл *b* + каротиноиды/хл *a*, характеризующее долю антенных форм пигментов, также мало изменялось. Это свидетельствует о том, что раз-

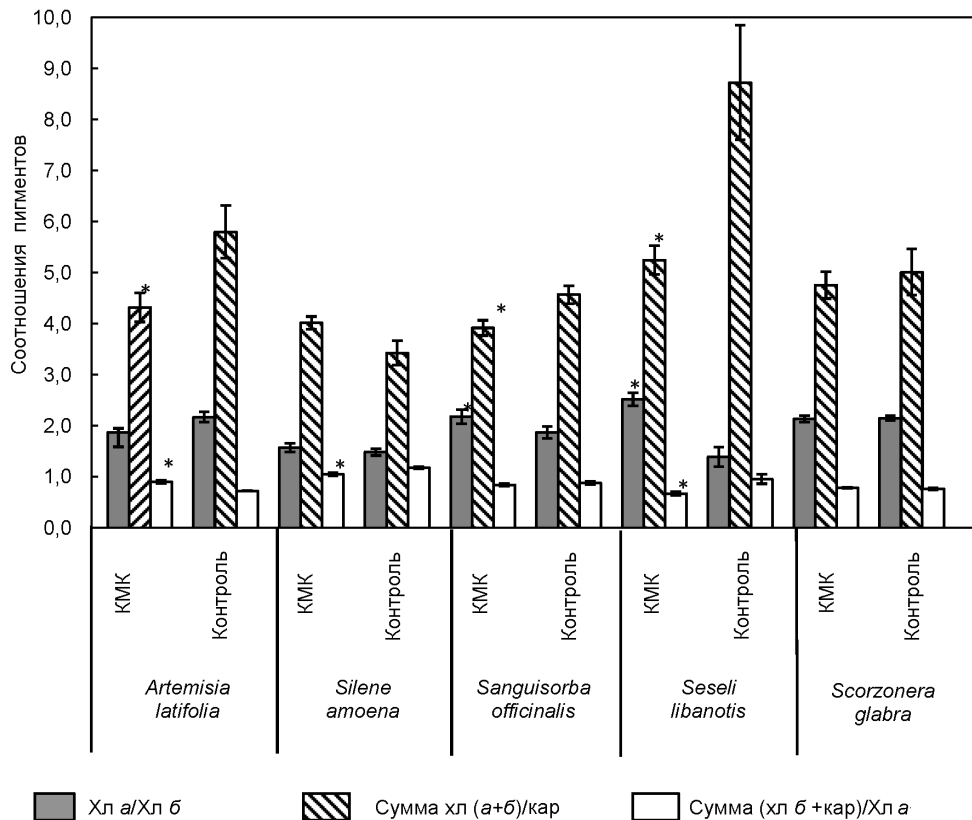


Рис. 2. Соотношение фотосинтетических пигментов в листьях.
* – различия с контролем достоверны при уровне значимости $p < 0,05$

мер фотосинтетической антенны в листьях растений в условиях КМК сохраняется на уровне фонового варианта и, вероятно, зависит в большей степени от условий освещения, а не степени загрязнения.

Поллютанты способны оказывать воздействие как на вегетативные, так и генеративные органы растений. Гипотеза, которую мы сформулировали в начале исследования, заключалась в том, что в окрестностях КМК растения имеют больше нарушений в генеративной сфере. Однако показатели фертильности пыльцы у растений, произрастающих в Карабаше и на фоновом участке, достоверно не отличаются (табл. 2).

Таблица 2
Фертильность пыльцевых зерен

Вид	Фертильность, %	
	КМК	Контроль
<i>Silene amoena</i>	93,0 ± 1,4	95,5 ± 1,7
<i>Sanguisorba officinalis</i>	94,5 ± 1,5	97,0 ± 0,8
<i>Artemisia latifolia</i>	97,5 ± 1,2	98,0 ± 1,0
<i>Seseli libanotis</i>	95,5 ± 1,7	97,5 ± 1,2
<i>Scorzonera glabra</i>	99,5 ± 0,4	98,6 ± 0,8

Вместе с тем в строении пыльцевых зерен модельных растений в окрестностях Карабаша зарегистрированы различные нарушения. У *Artemisia latifolia* наблюдается уменьшение числа апертур с трех в норме до двух и одной. Помимо этого, оболочка пыльцевых зерен значительно толще, чем у контрольных растений. У *Sanguisorba officinalis* встречаются не только трехпоровые пыльцевые зерна (норма), но и 4, 5, 6 и даже 8-поровые.

Формирование экзины, интины и детерминация апертур – сложный, не до конца изученный процесс [12], происходящий с участием различных клеточных органоидов, а изменение числа апертур свидетельствует о нарушениях этого процесса.

Изменение числа апертур нередко происходит у анеуплоидов, полиплоидов и гибридов [4]. В то же время есть данные об изменении числа апертур у диплоидов, произрастающих в условиях промышленного загрязнения [5], [13], но

в этих работах, в отличие от нашей, показано и значительное снижение фертильности пыльцы. В нашем исследовании изменение числа апертур происходило у фертильной пыльцы. Для детального понимания механизмов, приводящих к таким нарушениям, необходимы исследования на разных стадиях развития пыльцевых зерен с изучением их ультраструктуры под электронным микроскопом.

Кроме описанных нарушений, показано слипание пыльцевых зерен и наличие единичных пыльцевых зерен неправильной формы. Необходимо отметить, что и в контроле зафиксированы отдельные нарушения в строении пыльцевых зерен, но они встречаются единично.

ВЫВОДЫ

1. В условиях аэротехногенного загрязнения у большинства изученных видов обнаружено утолщение листовой пластинки, обусловленное увеличением толщины мезофилла листа. Толщина эпидермиса листа при этом не изменялась.

2. Показано, что растения из импактной и фоновой зон достоверно различались по содержанию фотосинтетических пигментов в листьях, однако характер этих различий был видоспецифичен. *Seseli libanotis* и *Artemisia latifolia* чувствительны к аэротехногенному загрязнению, при этом фотосинтетический аппарат *Sanguisorba officinalis*, *Scorzonera glabra* и *Silene repens* был устойчив к выбросам кислых газов и тяжелым металлам.

3. Уровень фертильности пыльцы изученных видов в окрестностях КМК был достаточно высоким и не отличался от контроля, тогда как в строении пыльцевых зерен выявлены нарушения, наиболее частым из которых было изменение числа апертур в оболочке пыльцы.

4. Анализ состояния вегетативных органов (лист) и мужской генеративной сферы позволил определить *Seseli libanotis* и *Artemisia latifolia* как виды-индикаторы техногенного загрязнения. *Sanguisorba officinalis*, *Scorzonera glabra* и *Silene repens*, обладая большей устойчивостью, могут быть рекомендованы к использованию в технологиях восстановления нарушенных земель.

* Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 15-04-08320 А и программы 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белогуб Е. В., Удачин В. Н., Кораблев Г. К. Карабашский рудный район (Южный Урал): Материалы к путеводителю геолого-экологической экскурсии. Миасс, 2003. 40 с.
2. Бессонова В. Н. Состояние среды как показатель загрязнения среды тяжелыми металлами // Экология. 1993. № 3. С. 45–50.
3. Гавриленко В. Ф., Жигалова Т. В. Большой практикум по фотосинтезу. М.: Академия, 2003. 256 с.

4. Гаврилова О. А., Тихонова О. А. Разнообразие форм пыльцевых зерен и их распределение у некоторых видов и гибридов крыжовниковых // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 3. С. 82–92.
5. Дзюба О. Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 198 с.
6. Коротеева Е. В., Вейсберг Е. И., Куянцева Н. Б. Оценка состояния лесной ценофлоры в зоне воздействия Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 1 (4). С. 1005–1011.
7. Коротеева Е. В., Веселкин Д. В., Куянцева Н. Б., Мумбер А. Г., Чашина О. Е. Накопление тяжелых металлов в разных органах березы повислой возле Карабашского медеплавильного комбината // Агрохимия. 2015. № 3. С. 94–102.
8. Линник В. Г., Хорошавин В. Ю., Пологрудова О. А. Деградация природных ландшафтов и химическое загрязнение в ближней зоне влияния Карабашского медеплавильного комбината // Вестник ТюмГУ. 2013. № 4. С. 105–114.
9. Максимова Е. В., Косицына А. А., Макурина О. Н. Влияние антропогенных факторов химической природы на некоторые эколого-биохимические характеристики растений // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2007. № 8 (58). С. 146–152.
10. Мокроносов А. Т., Шамова Т. В. Сравнительный анализ мезоструктуры фотосинтетического аппарата у мезофитных и ксерофитных растений // Мезоструктура и функциональная активность фотосинтетического аппарата. Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1978. С. 103–107.
11. Паушева З. П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1988. 271 с.
12. Пожидаев А. Е. Структура многообразия морфологического признака на примере расположения апертур пыльцы цветковых и естественная упорядоченность биологического многообразия, или – что такое многообразие (способы описания и интерпретации) // Труды Зоологического института РАН. Приложение № 1. 2009. С. 150–182.
13. Сероглазова Н. Г., Бакташева Н. М. Индикация чистоты окружающей среды по состоянию пыльцы растений, произрастающих в дельте р. Волги // Вестник МГОУ. Сер. «Естественные науки». Раздел I. Биология. 2012. № 1. С. 65–68.
14. Сморкалов И. А., Воробейчик Е. И. Почвенное дыхание лесных экосистем в градиентах загрязнения среды выбросами медеплавильных заводов // Экология. 2011. № 6. С. 429–435.
15. Улицкая Ю. Ю. Влияние интегрального технохимического загрязнения на анатомическое строение мезофилла листьев *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill. // Экология промышленного региона и экологическое образование: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Н. Тагил, 2004. С. 54.
16. Хан Л. В., Астафурова Т. П. Морфолого-функциональные адаптации хвойных деревьев к условиям городской среды // Материалы международной конференции «Актуальные вопросы экологической физиологии растений в XXI веке». Сыктывкар, 2001. С. 245.
17. Fazlieva E. R., Kiseleva I. S., Zhuikova T. V. Antioxidant Activity in the Leaves of *Melilotus albus* and *Trifolium medium* from Man-Made Disturbed Habitats in the Middle Urals under the Influence of Copper // Russian Journal of Plant Physiology. 2012. Vol. 59. № 3. P. 333–338.
18. Kalbande D. M., Dhadse S. N., Chaudhari P. R., Wate S. R. Biomonitoring of heavy metals by pollen in urban environment // Environ Monit Assess. 2008. Vol. 138. № 1. P. 233–238.
19. Kulagin A. A., Bakiev I. F. Balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) under technogenic conditions in Republic of Bashkortostan (Russia) // Materials of V International Young Scientists Conference “Biodiversity. Ecology. Adaptation. Evolution”. Odessa, ONU Publ., 2011. P. 162.
20. Majd A., Sharife M. R., Zare H. The effect of air pollutant of Arak aluminum factory on growth and development of certain species of Leguminosae // J. Sci. Univ. Teacher Educ. 1996. Vol. 7. P. 27–31.

Chukina N. V., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)
Kutlunina N. A., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)
Shaikhova D. R., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)
Sharnina T. F., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)
Sitnikov I. A., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)
Kiseleva I. S., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)

EXPRESS ESTIMATION OF VEGETATIVE AND REPRODUCTIVE ORGANS IN HERBACEOUS PLANTS FROM ENVIRONS OF KARABASH COPPER SMELTER

The article presents the results of photosynthetic parameters, pollen fertility and pollination efficiency in 5 plant species (*Scorzonera glabra*, *Sanguisorba officinalis*, *Silene amoena*, *Seseli libanotis*, *Artemisia latifolia*) under industrial emissions' impact of Karabash copper smelter. Significant differences in the leaf structure (leaf thickness, mesophyll thickness) and in the photosynthetic pigments' content of the plants inhabiting the background and impact zones of the territory were shown. A high level of pollen fertility in studied species both in control and impact sites was shown. Nevertheless, the lack of pollen in the stigma and various irregularities in the structure of pollen grains (change in the number of apertures) were revealed on disturbed territories. At the same time, the high efficiency of pollination contributes to the seeds' fertilization and their further development.

Key words: express-estimation, environmental contamination, leaf thickness, mesophyll thickness, photosynthetic pigments, fertility of pollen grains, number of apertures, shortage of pollen

REFERENCES

1. Belogub E. V., Udachin V. N., Korablev G. K. *Karabashskiy rudnyy rayon (Yuzhnyy Ural): Materialy k putevoditel'yu geologo-ekologicheskoy ekskursii* [Karabash ore district (South Urals). Materials to guide geological and ecological excursion]. Miass, 2003. 40 p.
2. Bessonova V. N. The state of pollen as an indicator of the environmental pollution with heavy metals. *Russian Journal of Ecology*. 1992. Vol. 22 (4). P. 45–50.
3. Gavrilenko V. F., Zhigalova T. V. *Bol'shoy praktikum po fotosintezu* [Large workshop on photosynthesis]. Moscow, Academy Publ., 2003. 256 p.
4. Gavrilova O. A., Tikhonova O. A. Diversity of pollen grain shapes, and their distribution across some grossulariaceae species and hybrids [Raznoobrazie form pyl'tsevykh zeren i ikh raspredelenie u nekotorykh vidov i gibridov kryzhovnikovykh]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science]. 2013. № 3. P. 82–92.
5. Dzyuba O. F. *Palinoindikatsiya kachestva okruzhayushchey sredy* [Palynoidication of environmental quality]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2006. 198 p.
6. Koroteeva E. V., Veysberg E. I., Kuyantseva N. B. Estimation of forest cenoflora state in zone of Karabash copper smelt industrial complex impact (South Urals) [Otsenka sostoyaniya lesnoy tsenoflory v zone vozdeystviya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata (Yuzhnyy Ural)]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2011. Vol. 13. № 1 (4). P. 1005–1011.
7. Koroteeva E. V., Veselkin D. V., Kuyantseva N. B., Mumber A. G., Chashchina O. E. Accumulation of Heavy Metals in the Different *Betula pendula* Roth Organs near Karabash Copper Smelter [Nakoplenie tyazhelykh metallov v raznykh organakh berezy povisloy voze Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata]. *Agrokhiimiya* [Agrochemistry]. 2015. № 3. P. 94–104.
8. Linnik V. G., Khoroshavin V. Yu., Pologrudova O. A. Degradation of natural landscapes and chemical pollution under the influence of Karabash copper smelting [Degradatsiya prirodnnykh landshaftov i khimicheskoe zagryaznenie v blizhney zone vliyaniya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata]. *Vestnik TyumGU* [Vestnik of Tumen State University]. 2013. № 4. P. 105–114.
9. Maksimova E. V., Kositsyna A. A., Makurina O. N. Influence of anthropogenic factors on the some ecological and biochemical characteristics of plants [Vliyanie antropogennykh faktorov khimicheskoy prirody na nekotorye ekologo-biokhimicheskie kharakteristiki rasteniy]. *Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaya seriya* [Vestnik of SSU. Natural science series]. 2007. № 8 (58). P. 146–152.
10. Mokronosov A. T., Shmakova T. N. Comparative analysis of the mesostructure of the photosynthetic apparatus of mesophyte and xerophyte plants [Sravnitel'nyy analiz mezostrukturny fotosinteticheskogo apparata u mezofitnykh i kserofitnykh rasteniy]. *Mezostrukturna i funktsional'naya aktivnost' fotosinteticheskogo apparata* [Mesostructure and functional activity of the photosynthetic apparatus]. Sverdlovsk, Ural University Publ., 1978. P. 103–107.
11. Pausheva Z. P. *Praktikum po tsitologii rasteniy* [Workshop on cytology of plants]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 271 p.
12. Pozhidaev A. E. Patterns of morphological variety of Angiospermous pollen aperture distribution and natural ordering of biological variety, or – what is a variety (problems of description and interpretation) [Struktura mnogoobraziya morfologicheskogo priznaka na primere raspolzheniya apertur pyl'tsy tsvetkovykh i estestvennaya uporyadochennost' biologicheskogo mnogoobraziya, ili – chto takoe mnogoobrazie (sposoby opisaniya i interpretatsii)]. *Trudy Zoologicheskogo instituta RAN. Prilozhenie № 1* [Proceedings ZIN. Supplement № 1]. 2009. P. 150–182.
13. Seroglazova N. G., Baktasheva N. M. Indication of environmental purity by the pollen of plants growing in the Volga delta [Indikatsiya chistoty okruzhayushchey sredy po sostoyaniyu pyl'tsy rasteniy, proizrastayushchikh v del'te r. Volgi]. *Vestnik MGOU. Seriya "Estestvennye nauki"* [Bulletin MSRU. Natural Sciences]. 2012. № 1. P. 65–68.
14. Smorkalov I. A., Vorobeychik E. L. Soil respiration of forest ecosystems in gradients of environmental pollution by emissions from copper smelters. *Russian Journal of Ecology*. 2011. Vol. 42. № 6. P. 464–470.
15. Ulitskaya Yu. Yu. Influence of integral techno chemical pollution on the anatomical structure of the mesophyll leaves *Betula pendula* Roth, and *Tilia cordata* Mill. [Vliyanie integral'nogo tekhnokhimicheskogo zagryazneniya na anatomicheskoe stroenie mezofilla list'ev *Betula pendula* Roth, i *Tilia cordata* Mill.]. *Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Ekologiya promyshlennogo regiona i ekologicheskoe obrazovanie"* [Proc. All-Russian scientific-practical Conf. "Ecology of the industrial region and environmental education"]. N. Tagil, 2004. P. 54.
16. Khan L. V., Astafurova T. P. Morphological and functional adaptation of conifers to the conditions of the urban environment [Morfologo-funktsional'nye adaptatsii khvoynnykh derev'ev k usloviyam gorodskoy sredy]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Aktual'nye voprosy ekologicheskoy fiziologii rasteniy v XXI veke"* [Proc. Int. Conf. "Actual problems of ecological physiology of plants in the XXI century"]. Syktyvkar, 2001. P. 245.
17. Fazlieva E. R., Kiseleva I. S., Zhukova T. V. Antioxidant Activity in the Leaves of *Melilotus albus* and *Trifolium* medium from Man-Made Disturbed Habitats in the Middle Urals under the Influence of Copper // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2012. Vol. 59. № 3. P. 333–338.
18. Kalbande D. M., Dhadse S. N., Chaudhari P. R., Wate S. R. Biomonitoring of heavy metals by pollen in urban environment // *Environ Monit Assess*. 2008. Vol. 138. № 1. P. 233–238.
19. Kulagin A. A., Bakiev I. F. Balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) under technogenic conditions in Republic of Bashkortostan (Russia) // *Materials of V International Young Scientists Conference "Biodiversity. Ecology. Adaptation. Evolution"*. Odessa, ONU Publ., 2011. P. 162.
20. Majd A., Sharife M. R., Zare H. The effect of air pollutant of Arak aluminum factory on growth and development of certain species of Leguminosae // *J. Sci. Univ. Teacher Educ*. 1996. Vol. 7. P. 27–31.