

ИВАН АНДРЕЕВИЧ СИТНИКОВ

студент 1-го курса магистратуры департамента «Биологический факультет» Института естественных наук и математики, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)
ivan11011994@gmail.com

ДАРЬЯ РАМИЛЬЕВНА ШАИХОВА

студент 1-го курса магистратуры департамента «Биологический факультет» Института естественных наук и математики, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)
darya.boo@mail.ru

НАДЕЖДА ВЛАДИМИРОВНА ЧУКИНА

кандидат биологических наук, доцент кафедры экспериментальной биологии и биотехнологий Института естественных наук и математики, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)
nady_dicusar@mail.ru

ИРИНА СЕРГЕЕВНА КИСЕЛЕВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры экспериментальной биологии и биотехнологий Института естественных наук и математики, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)
irina.kiseleva@urfu.ru

ВЛИЯНИЕ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ РАСТЕНИЙ *SCORZONERA GLABRA RUPR.**

Изучены структура мезофилла и содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений *Scorzonera glabra Rupr.*, произрастающих на территории Карабашского медеплавильного комбината в условиях аэрохеногенного загрязнения. Обнаружены изменения в структурно-функциональной организации фотосинтетического аппарата этих растений (увеличение толщины эпидермиса, объема клеток мезофилла, числа клеток и хлоропластов в единице площади листа, содержания хлорофилла *a* и каротиноидов), которые рассматриваются как адаптивные, позволяющие растениям длительное время произрастать в стрессовых условиях.

Ключевые слова: техногенное загрязнение, фотосинтетические пигменты, мезоструктура листа

Карабашский медеплавильный комбинат (КМК) «Карабашмедь» – предприятие, которое на протяжении длительного времени является мощным источником поллютантов. Большая часть аэроальных выбросов комбината состоит из газов и пыли: SO₂ (около 90 %), NO₂, CO, оксиды металлов (Zn, Cu, Pb, Fe, As) [2]. Многолетняя деятельность предприятия привела к серьезным экологическим последствиям. Значительные объемы техногенных выбросов с осадками попадали в почву, что способствовало существенному увеличению концентрации ксенобиотиков в пробах почвы в окрестностях КМК. В результате естественный почвенный покров вблизи комбината практически деградирован и трансформирован эрозионными преобразованиями в техногенный субстрат. Изменения произошли в структуре фитоценозов: почти полностью уничтожен древесный ярус, а многолетние травянистые растения (петрофитные и луговые мезофиты) формируют

пятна и куртины небольших размеров, не образующие сомкнутого покрова [12]. В таких условиях преимущество приобретают виды стресс-толерантной стратегии – многолетники, которые характеризуются небольшой скоростью роста и продуктивностью, не требовательны к ресурсам и способны переживать стрессовые условия.

Фотосинтетический аппарат растений, имеющий большую площадь контакта с воздушной средой, первым реагирует на токсическое воздействие поллютантов. Структурно-функциональные особенности ассимиляционного аппарата, такие как толщина листовой пластинки, мезофилла листа, эпидермиса, размеры клеток ассимиляционной паренхимы и хлоропластов, их количество в единице площади листа, содержание и соотношение фотосинтетических пигментов, отражают приспособленность вида к условиям среды. От функционирования ассимиляционного аппарата зависит эффектив-

ность процесса фотосинтеза, продуктивность и выживаемость вида в целом. В отечественной и зарубежной литературе описаны структурно-функциональные особенности листьев растений, произрастающих на территориях вблизи источников аэротехногенного загрязнения [8], [17], [19], [20]. Кроме того, в литературе имеются сведения о воздействии Карабашского медеплавильного комбината на растительные объекты. Например, А. Г. Мумбер с соавторами выполнили комплексную оценку воздействия выбросов КМК на состояние подроста сосны, включающую анализ накопления тяжелых металлов в различных органах, а также морфометрических показателей побегов и линейных размеров хвоинок [13]. Е. В. Коротеева с соавторами исследовали флоры лесных сообществ района г. Карабаш и показали значительное увеличение доли скальных видов и видов рудеральной стратегии. Установлены особенности строения травянистых растительных группировок, в том числе уникальных, с участием редкого плейстоценового реликта – *Scorzonera glabra* [4], [5]. Изучено накопление тяжелых металлов в биомассе растений и проведен анализ флюктуирующей асимметрии листа бересклета повислой в зависимости от расстояния от медеплавильного комбината [6]. Результаты экспресс-оценки состояния вегетативных и генеративных органов травянистых растений, обитающих на данной территории, проведенной нами в 2014 году, позволили выделить виды, обладающие устойчивостью к техногенному загрязнению [16]. В их числе редкий вид – козелец гладкий, для которого отмечено отсутствие достоверных изменений в содержании и соотношении фотосинтетических пигментов в листьях, а также показателей fertильности пыльцы в условиях высоких техногенных нагрузок. *Scorzonera glabra* в естественных местообитаниях произрастает в виде изолированных малочисленных ценопопуляций, формируя растения с небольшим числом побегов, цветоносов и листьев. В условиях техногенных нагрузок в отсутствие фитосреды он является главным ценообразователем, образуя надземную массу с большим количеством генеративных побегов [10]. Перечисленные факты послужили причиной для выбора *Scorzonera glabra* в качестве объекта нашего исследования.

Целью данной работы было изучение влияния выбросов Карабашского медеплавильного комбината на мезоструктуру листьев и содержание фотосинтетических пигментов в них у растений *Scorzonera glabra* Rupr.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили летом 2015 года в районе г. Карабаш Челябинской области на территории вблизи КМК (ЗАО «Карабашмедь»). Растительный материал собирали со склонов горы

Золотая, относящейся к Карабашскому горному массиву ($55^{\circ}29.16' N, 60^{\circ}15.22' E$) [14].

КМК – один из крупнейших источников загрязняющих веществ, действующий на территории Челябинской области еще с 1910 года. Максимальные объемы его выбросов достигали 360 тыс. тонн в год. Аэральные выбросы несут широкий спектр тяжелых металлов (ТМ): Cu, Zn, Pb, Cd и др. Дожди, проходя через шлейф газо-пылевых выбросов, образуют высокотоксичные осадки сульфатно-хлоридно-кальциевого типа с преобладанием катионной части металлов и повышенной минерализацией [3]. Они вызывают существенные изменения в химическом составе почвенного субстрата на данной территории. Индекс токсической нагрузки импактной территории составляет 20 условных единиц [6].

В нашем исследовании в качестве относительного контроля (фоновой зоны) рассматривали район горы Егоза, находящийся в южной части Среднего Урала, в 40 км северо-восточнее г. Карабаш. Гора Егоза относится к Сугомакскому горному массиву ($55^{\circ}45.06' N, 60^{\circ}26.95' E$) и представляет собой самую высокую точку горной цепи западной стороны Кыштыма [14]. Эта территория по комплексу эдафических и орографических факторов оптимально подходит в качестве фоновой зоны. Уровень инсоляции и увлажнения субстрата, характер подстилающих пород в этом районе аналогичны наблюдаемым на территории вблизи КМК. Обе зоны принадлежат к ультраосновным массивам, для которых свойственны схожие геохимические особенности. Однако концентрации ряда ТМ в образцах почвы с Карабашского массива в несколько раз, а иногда и на порядки, превышают значения в почвах горы Егоза. Так, например, по данным А. Ю. Тепиной с соавторами, кратность превышения валового содержания по меди, кадмию, цинку и железу в пробах с территории вблизи КМК составила 60, 23, 15 и 4 раза соответственно [14].

Scorzonera glabra Rupr. (*S. ruprechtiana* Lipsch. et Krasch.) – козелец гладкий, сем. Asteraceae, редкий вид, плейстоценовый реликт. В Челябинской области широко распространен по восточному склону Южного Урала в окрестностях Карабаша, Кыштыма и Миасса. Произрастает на обнажениях (гипсовых, известняковых), осыпях, скалистых останцах каменистых остеиненных склонов, преимущественно на основных и ультраосновных породах [9]. Гемикриптофит, стержнекорневой каудексообразующий травянистый многолетник, ксеромезофит.

На территории импактной зоны вид образует монодоминантные сообщества с проективным покрытием 2–6 %, с преобладанием генеративных и, в меньшей степени, сенильных особей. В типичных местообитаниях при отсутствии техногенной нагрузки встречаемость *S. glabra* незначительная. Вид обладает выраженным по-

лиморфизмом [10] и может служить удобной моделью для изучения адаптации растений к техногенному стрессу.

С пробных площадок, расположенных на расстоянии 10–20 м друг от друга, собирали по 5–10 полностью сформированных неповрежденных листьев с 10–15 генеративных особей.

Анализ показателей мезоструктуры фотосинтетического аппарата проводили согласно методике [21], используя листья, фиксированные в глутаровом альдегиде (3,5 %) в фосфатном буфере (рН = 7,2). Поперечные срезы листа получали на замораживающем микротоме М3-2 (Россия). Толщину листа, мезофилла и эпидермиса измеряли на поперечных срезах (n = 20) с использованием объект- и окуляр-микрометров с использованием светового микроскопа Meiji MT 4300L с цветной цифровой камерой CAM V400/1.3M. Подсчет количества клеток и хлоропластов (n = 20), а также определение их размеров (n = 30) проводили с использованием специализированного комплекса для анализа изображений Simagis Mesoplant (ООО «СИАМС», Россия).

Содержание фотосинтетических пигментов определяли спектрофотометрически в этанольной вытяжке (n = 9) согласно общепринятой методике [22] на спектрофотометре PD 303 UV Apel (Япония).

Первичная обработка данных осуществлялась в MS Excel 2016. Достоверность различий параметров оценивали при уровне значимости $p < 0,05$ при помощи критерия Манна – Уитни для непараметрической оценки в программе Statistica 8.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Листья растений *S. glabra* имели гомогенный тип строения мезофилла. Клетки ассимиляционной паренхимы листа не дифференцированы, отмечено наличие только губчатого мезофилла. Листья неопущенные, выражена кутикула.

Сравнительный анализ параметров мезоструктуры *S. glabra* показал, что по толщине листа растения из импактной и фоновой зон достоверно не отличаются (табл. 1). В среднем этот показатель составил 355 мкм, коэффициент вариации не превышал 15 %. Имеющиеся по этому вопросу в литературе данные противоречивы. С одной стороны, исследователи указывают на изменение данного показателя у растений при действии аэрозольных выбросов [16], [17], [18]. С другой стороны, модельные исследования, проведенные А. А. Кулагиным и Н. Г. Кужлевой на растениях тополя бальзамического, свидетельствуют, что действие сублетальных концентраций токсичных металлов и влияние металлов-макроэлементов на структуру листа имеют сходные эффекты. По мнению этих авторов, толщина листовой пластиинки не может быть использована как биоиндикационный признак [8].

В наших исследованиях установлено, что у растений *S. glabra*, произрастающих в зоне воздействия аэрозольных выбросов КМК, не происходит значительных изменений в толщине мезофилла, но существенно (на 25 %) увеличивается толщина эпидермиса (см. табл. 1), то есть проявляются признаки ксероморфности листьев. Многие авторы отмечают аналогичные изменения в условиях загрязнения и связывают их с усилением барьерной функции покровных тканей [3], [8], [18], [19], [20].

Результаты наших исследований показали, что у растений из импактной зоны объем мезофильных клеток и их количество в единице площади листа было выше, чем у растений из фоновой зоны (см. табл. 1). Известно, что в условиях загрязнения среды происходит увеличение объемов

Таблица 1
Параметры мезоструктуры листа растений *Sorzonera glabra*

Показатели	Импакт	Фон
Толщина листа, мкм		
среднее	357,7 ± 10,2	349,0 ± 12,0
мин – макс	288,0–417,0	263,0–482,0
дисперсия	2079, 1	2902,7
Толщина мезофилла, мкм		
среднее	284,5 ± 9,5	294,8 ± 12
мин – макс	217,0–342,0	211,0–420,0
дисперсия	1802,5	2880,2
Толщина эпидермиса, мкм		
среднее	73,2 ± 2,059*	55,1 ± 2,286*
мин – макс	59,0–93,0	39,0–74,0
дисперсия	84,8	104,5
Количество клеток мезофилла, тыс./см ²		
среднее	417,0 ± 15,3*	239,5 ± 9,4*
мин – макс	322,7–526,5	186,8–305,7
дисперсия	2,71	1,0
Объем клеток мезофилла, тыс. мкм ³		
среднее	20,1 ± 1,4*	16,2 ± 2,1*
мин – макс	11,0–38,3	6,5–50,2
дисперсия	72,8	135,0
Количество хлоропластов, млн/см ²		
среднее	10,0 ± 0,4*	5,8 ± 0,2*
мин – макс	7,8–12,7	4,5–7,3
дисперсия	2,7	1,0
Объем хлоропластов, мкм ³		
среднее	46,6 ± 2,2*	59,4 ± 2,3*
мин – макс	29,5–72,1	36,6–82,3
дисперсия	154,5	160,0

Примечание. Приведены средние значения ± ошибка среднего; * – различия признака достоверны при уровне значимости $p < 0,05$.

клеток ассимиляционной паренхимы, обусловленное, скорее всего, активным накоплением в них ТМ [3], [15]. Эти особенности строения листьев *S. glabra*, произрастающих на территории КМК (большее число более крупных клеток мезофилла), могут рассматриваться как защитно-приспособительные реакции фотосинтетического аппарата к высоким концентрациям поллютантов.

Анализ изменчивости таких признаков, как толщина листа, толщина мезофилла и объем клеток (по диапазону «min – max» и величине дисперсии), показал, что у растений из импактной зоны они варьируют в меньшей степени, чем из фоновой. Это может свидетельствовать о том, что в условиях почти столетнего воздействия аэротехногенных выбросов на склон горы Золотой вблизи КМК естественный отбор сохранил более устойчивые к поллютантам генотипы, характеризующиеся определенными адаптивными чертами строения листьев.

Адаптивные перестройки фотосинтетического аппарата могут затрагивать изменения фотоактивной поверхности, в частности размеры и число пластид в клетке [15]. В результате нашего исследования установлено, что у растений импактной зоны размеры хлоропластов меньше (на 25 %), а их количество в единице площади листа в 2 раза больше, чем у растений фоновой зоны (см. табл. 1). Такие изменения приводят к росту внутренней ассимиляционной поверхности, что является способом поддержания необходимого уровня фотосинтеза в этих условиях.

Хорошо известно, что функционирование фотосинтетического аппарата растений в условиях стресса в значительной степени определяется количеством пигментов и их соотношением [7]. Сравнительный анализ пигментов фотосинтетических пигментов в листьях *S. glabra* показал, что содержание хлорофилла *a* было выше у растений из импактной зоны по сравнению с растениями фоновой зоны (табл. 2). Известно, что такие металлы, как железо и медь, участвуют в процессе синтеза пигментов, следовательно, увеличение их содержания в среде может влиять на процессы синтеза и деградации пигментов в листьях [15]. Показано, например, что на начальных этапах воздействия медью накопление хлорофиллов в листьях происходит интенсивнее, чем в ее отсутствие [1].

Ранее рядом авторов отмечено усиление синтеза антенных пигментов в листьях растений под действием некоторых тяжелых металлов [7], [11], [17]. В нашей работе установлено, что в листьях растений *S. glabra* из импактной зоны содержание каротиноидов достоверно выше (см. табл. 2), чем в листьях растений фоновой зоны. Эта реакция пигментного аппарата может рассматриваться как адаптивная, поскольку известно, что каротиноиды, помимо антенной функции, выполняют

Таблица 2
Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений *Scorzonera glabra*

Показатели	Импакт	Фон
Хлорофилл <i>a</i> , мг/г сух. веса		
Среднее	5,903 ± 0,396*	4,404 ± 0,381*
макс	7,351	5,992
мин	4,174	3,287
Хлорофилл <i>b</i> , мг/г сух. веса		
Среднее	3,118 ± 0,317	2,860 ± 0,546
макс	4,780	6,528
мин	1,954	1,324
Каротиноиды, мг/г сух. веса		
Среднее	1,614 ± 0,082*	1,332 ± 0,116*
макс	2,077	1,983
мин	1,353	0,953
Хл <i>a</i> /Хл <i>b</i> + каротиноиды		
Среднее	1,283 ± 0,024*	1,113 ± 0,044*
макс	1,400	1,285
мин	1,191	0,918

Примечание. Приведены средние значения ± ошибка среднего; * – различия признака достоверны при уровне значимости $p < 0,05$.

также роль антиоксидантов, активно участвуя в инактивации свободных радикалов.

Одним из важных показателей состояния фотосинтетического аппарата в стрессовых условиях является отношение хлорофилла *a* к сумме добавочных пигментов (хлорофилла *b* и каротиноидов). Этот показатель используют также для оценки устойчивости растений к внешним стрессорам [23]. В наших исследованиях у растений импактной зоны отмечено увеличение данного соотношения, и это, наряду с данными о содержании хлорофилла *a* в листьях козельца, указывает на высокую устойчивость его пигментного аппарата к техногенному загрязнению (см. табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что в условиях долговременного стресса, вызванного токсическими выбросами медеплавильного завода, в листьях растений *Scorzonera glabra* происходят адаптивные изменения фотосинтетического аппарата: увеличение толщины эпидермиса усиливает его барьерную функцию при проникновении аэрополлютантов в лист; увеличение размеров клеток позволяет накапливать в них большее количество ТМ, являющихся главными компонентами выбросов КМК; рост числа хлоропластов в см^2 поверхности листа – компенсаторное поддержание фотосинтетической функции в стрессовых условиях.

Установлено, что пигментный аппарат листьев растений *Scorzonera glabra*, произрастающих в условиях аэробного загрязнения, устойчив к стрессовому воздействию. Увеличение содержания хлорофилла *a* и каротиноидов в листьях способствует большей эффективности использования световой энергии благодаря увеличению количества реакционных центров и антенных форм пигментов в фотосинтезирующих тканях.

Таким образом, установлено, что у растений *Scorzonera glabra*, произрастающих на территории Карабашского медеплавильного комбината в условиях аэробного загрязнения, про-

изошли изменения фотосинтетического аппарата, которые имеют очевидную адаптивную направленность. Эти изменения в значительной степени определяют эффективность протекания фотосинтетических процессов, возможность успешного роста и развития растений, а также формирование их высокой устойчивости к условиям техногенного стресса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность П. С. Лежнину, Н. А. Кутлуниной и Т. Ф. Шарниной за помощь в работе.

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 15-04-08380 А и программы 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.A03.21.0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Духовский П. В., Юкнис Р., Бразайтите И., Жукускайте Л. Реакция растений на комплексное воздействие природных и антропогенных стрессоров // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 2. С. 165–173.
2. Залесов С. В., Бачурина А. В. Изменение морфометрических показателей хвои сосны обыкновенной в условиях аэрометровых выбросов // Вестник Московского государственного университета леса. 2008. С. 36–38.
3. Зиннатова Э. Р. Морфофизиологические и биохимические адаптации дикорастущих видов растений к техногенному загрязнению в условиях Среднего Урала: Дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2014. 184 с.
4. Коротеева Е. В., Вейсберг Е. И., Гаврилкина С. В., Чашин П. В. Трансформированная растительность в зоне аэробного загрязнения Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) // Проблемы региональной экологии. 2014. № 6. С. 96–102.
5. Коротеева Е. В., Вейсберг Е. И., Куюнцева Н. Б. Оценка состояния лесной ценотропии в зоне воздействия Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13 (39). № 1 (4). С. 1005–1011.
6. Коротеева Е. В., Веселкин Д. В., Куюнцева Н. Б., Чашина О. Е. В градиенте влияния выбросов Карабашского медеплавильного комбината изменяется размер, но не флукутирующая асимметрия листа бересклета повислой // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 3. С. 364–367.
7. Кулагин А. А. Особенности развития тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях загрязнения окружающей среды металлами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2003. Т. 5. № 2. С. 334–341.
8. Кулагин А. А., Кужлева Н. Г. Об анатомических изменениях, происходящих в листьях *Populus balsamifera* L. на фоне избыточного содержания металлов в окружающей среде // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2005. Т. 7. № 1. С. 193–198.
9. Куликов П. В. Определитель сосудистых растений Челябинской области. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 970 с.
10. Лесина С. А., Коротеева Е. В. Онтогенез и экология произрастания *Scorzonera glabra* в Челябинской области // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 12 (131). С. 204–206.
11. Максимова Е. В., Косицына А. А., Макурина О. Н. Влияние антропогенных факторов химической природы на некоторые экологобиохимические характеристики растений // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2007. № 8 (58). С. 146–152.
12. Михеев А. Н., Залесов С. В. Видовой состав живого напочвенного покрова на разных градиентах высот в районе техногенного загрязнения ЗАО «Карабашмедь» // Леса России и хозяйство в них. Екатеринбург, 2013. Т. 44. № 1 (44). С. 44–46.
13. Мумбэр А. Г., Чашина О. Е., Куюнцева Н. Б., Потапкин А. Б. Влияние кислотных выбросов Карабашского медеплавильного комбината на жизненное состояние подроста сосны в Ильменском государственном заповеднике (Южный Урал) // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1 (4). С. 1230–1236.
14. Тептина А. Ю., Павлов А. Г., Морозова М. В. Аккумуляция Ni представителями семейства *Brassicaceae* на почвах ультраосновных пород Южного и Среднего Урала // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. № 4 (157). С. 110–117.
15. Чукина Н. В., Борисова Г. Г. Изменение структурно-функциональных характеристик фотосинтетического аппарата *Elodea densa* Planch. под действием тяжелых металлов // Поволжский экологический журнал. 2012. № 4. С. 447–454.
16. Чукина Н. В., Кутлунина Н. А., Шахова Д. Р., Шарнина Т. Ф., Ситников И. А., Киселева И. С. Экспресс-оценка состояния вегетативных и генеративных органов травянистых растений в окрестностях Карабашского медеплавильного комбината // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2015. № 8 (153). С. 80–86.
17. Чукина Н. В., Филимонова Е. И., Файрузова А. И., Борисова Г. Г. Морфофизиологические особенности листьев *Betula pendula* Roth на золоотвалах среднего Урала // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. № 6 (159). С. 68–75.
18. Dineva S. B. Leaf blade structure and the tolerance of *Acer negundo* L. (Box elder) to the polluted environment // Dendrobiology. 2005. Vol. 53. P. 11–16.

19. Gomes M. P., Marques T. C. L. L., Nogueira M. O. G., Castro E. M., Soares Â. M. Ecophysiological and anatomical changes due to uptake and accumulation of heavy metal in *Brachiaria decumbens* // *Scientia Agricola*. 2011. Vol. 68. № 5. P. 566–573.
20. Gostin I. N. Air pollution effects on the leaf structure of some *Fabaceae* species // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2009. Vol. 37. № 2. P. 57.
21. Ivanova L. A., P'yankov V. I. Structural adaptation of the leaf mesophyll to shading // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2002. Vol. 49. № 3. P. 419–431.
22. Lichtenhaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // *Methods in enzymology*. 1987. Vol. 148. P. 350–382.
23. Monni S., Uhlig C., Junttila O., Hansen E., Hyynnen J. Chemical composition and ecophysiological responses of *Empetrum nigrum* to aboveground element application // *Environmental Pollution*. 2001. Vol. 112. № 3. P. 417–426.

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

AEROTECHNOGENIC POLLUTION EFFECTS ON PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF *SCORZONERA GLABRA* RUPR

This research aims to determine the level of photosynthetic pigments' concentration and to identify the structure of mesophyll in *Scorzonera glabra* Rupr. leaves under exposure to aerotechnogenic pollution. The obtained samples were collected in the vicinity of Karabash copper smelter. The increase in epidermal thickness, the number and volume of mesophyll cells, the number of chloroplasts and concentration of chlorophyll a and carotenoids in plant leaves from the impact zone was identified and compared to the control zone. Clearly, these differences in photosynthetic apparatus are seen as adaptive features, which allow individual plants to grow naturally in polluted areas.

Key words: environmental contamination, photosynthetic pigments, mesostructure

REFERENCES

1. Dukhovskiy P. V., Yuknis R., Brazaytite I., Zhukauskayte L. Plant Response to Integrated Impact of Natural and Anthropogenic Stress Factors [Reaktsiya rasteniy na kompleksnoe vozdeystvie prirodnnykh i antropogennykh stressorov]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology]. 2003. Vol. 50. № 2. P. 165–173.
2. Zalesov S. V., Bachurina A. V. *Pinus silvestris* L. needles morphometric data changes in the conditions of air and industrial pollution [Izmenenie morfometricheskikh pokazateley khvoi sosny obyknovennoy v usloviyakh aeropromvybrosov]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* [Bulletin of Moscow state forest university]. 2008. P. 36–38.
3. Zinnatova E. R. *Morfofiziologicheskie adaptatsii dkorastushikh vidov rasteniy k tekhnogennomu zagryazneniyu v usloviyakh Srednego Urala: Dis. ... kand. biol. nauk* [Morpho-physiological and biochemical adaptation of wild plants to pollution in the Middle Ural. Author's abstr. PhD biol. sci. diss.]. Ufa, 2014. 184 p.
4. Koroteeva E. V., Veysberg E. I., Gavrilina S. V., Chashin P. V. Transformed vegetation in the air polluted zone of Karabash copper plant in Southern Urals [Transformirovannaya rastitel'nost' v zone aeraul'nogo zagryazneniya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata (Yuzhnyy Ural)]. *Problemy regional'noy ekologii*. 2014. № 6. P. 96–102.
5. Koroteeva E. V., Veysberg E. I., Kuyantseva N. B. Estimation of forest cenoflora state in zone of Karabashskiy cooper-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, Russian Academy of Sciences]. 2011. Vol. 13 (39). № 1 (4). P. 1005–1011.
6. Koroteeva E. V., Vesklin D. V., Kuyantseva N. B., Chashchina O. E. The gradient effect of emissions from the Karabash copper smelter changes size, but not fluctuating asymmetry of birch leaves drooping [V gradiente vliyaniya vybrosov Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata izmenyaetsya razmer, no ne fluktuiruyushchaya asimmetriya lista berezy povisloy]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2015. Vol. 460. № 3. P. 364–367.
7. Kulagin A. A. Features of development of a balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) in conditions of pollution of the environment by metals [Osobennosti razvitiya topolya bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera* L.) v usloviyakh zagryazneniya okruzhayushchey sredy metallami]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara scientific center, Russian Academy of Sciences]. 2003. Vol. 5. № 2. P. 334–341.
8. Kulagin A. A., Kuzhleva N. G. About anatomic changes occurring in balsam poplar leaves (*Populus balsamifera* L.) on a background of the superfluous contents of metals in the environment [Ob anatomiceskikh izmeneniyakh, proiskhodyashchikh v list'yah *Populus balsamifera* L. na fone izbytochnogo soderzhaniya metallov v okruzhayushchey srede]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the samara scientific center, Russian Academy of Sciences]. 2005. Vol. 7. № 1. P. 193–198.
9. Kulikov P. V. *Opredelitel' sosudistiykh rasteniy Chelyabinskoy oblasti* [The vascular plants of Chelyabinsk region]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2010. 970 p.
10. Lesina S. A., Koroteeva E. V. The ontogenetic and the ecological *Scorzonera glabra* in Chelyabinsk region [Ontogenet i ekologiya proizrastaniya *Scorzonera glabra* v Chelyabinskoy oblasti]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Herald of Orenburg State University]. 2011. № 12 (131). P. 204–206.
11. Maksimova E. V., Kositsyna A. A., Makurina O. N. The influence of chemicals factors on some ecological-biochemical characteristics of plants [Vliyanie antropogennykh faktorov khimicheskoy prirody na nekotorye ekologo-biookhimicheskie kharakteristiki rasteniy]. *Vestnik SamGU. Estestvenno-nauchnaya seriya* [Herald of Samara State University]. 2007. № 8 (58). P. 146–152.

12. Mikhеев A. N., Zalesov S. V. The live ground cover specific compound on the different gradients of height in the area of industrial pollution ZAO "Karabashmed" [Vidovoy sostav zhivogo napochvennogo pokrova na raznykh gradientakh vysot v rayone tekhnogennogo zagryazneniya ZAO "Karabashmed"]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Russian Forest and forestry in]. Ekaterinburg, 2013. Vol. 44. № 1 (44). P. 44–46.
13. Mumber A. G., Chashina O. E., Kuyantseva N. B., Potapkin A. B. Influence of acid emissions from Karabash copper smelter on the vital status of pine undergrowth in Ilmen state nature reserve (South Urals) [Vliyanie kislotnykh vybrosov Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata na zhiznennoe sostoyanie podrosta sosny v Il'menskom gosudarstvennom zapovednike (Yuzhnyy Ural)]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara scientific center, Russian Academy of Sciences]. 2014. Vol. 16. № 1 (4). P. 1230–1236.
14. Tepina A. Yu., Paukov A. G., Morozova M. V. Accumulation of Ni by species of Brassicaceae on ultramafic soils of Southern and Middle Urals [Akkumulyatsiya Ni predstaviteleyami semeystva Brassicaceae na pochvakh ul'traosnovnykh porod Yuzhnogo i Srednego Urala]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologicheskie nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Biological Sciences]. 2016. № 4 (157). P. 110–117.
15. Chukina N. V., Borisova G. G. Changes of the structural-functional characteristics of the photosynthetic apparatus of *Elodea densa* Planch. under the influence of heavy metals [Izmenenie strukturno-funktional'nykh kharakteristik fotosinteticheskogo apparaata *Elodea densa* Planch. pod deystviem tyazhelykh metallov]. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal* [Povolzhskiy Journal of Ecology]. 2012. № 4. P. 447–454.
16. Chukina N. V., Kutchina N. A., Shaihova D. R., Sharina T. F., Sitnikov I. A., Kiseleva I. S. Express estimation of vegetative and reproductive organs in herbaceous plants from environs of Karabash copper smelter [Ekspress-otsenka sostoyaniya vegetativnykh i generativnykh organov travyanistykh rasteniy v okrestnostyakh Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologicheskie nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Biological Sciences]. 2015. № 8 (153). P. 80–86.
17. Chukina N. V., Filimonova E. I., Fayruzova A. I., Borisova G. G. The morphological features of leaves *Betula pendula* Roth on ash dumps of the average [Morfofiziologicheskie osobennosti list'ev *Betula pendula* Roth na zolootvalakh srednego Urala]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologicheskie nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Biological Sciences]. 2016. № 6 (159). P. 68–75.
18. Dineva S. B. Leaf blade structure and the tolerance of *Acer negundo* L. (Box elder) to the polluted environment // Dendrobiology. 2005. Vol. 53. P. 11–16.
19. Gomes M. P., Marques T. C. L. L., Nogueira M. O. G., Castro E. M., Soares Á. M. Ecophysiological and anatomical changes due to uptake and accumulation of heavy metal in *Brachiaria decumbens* // Scientia Agricola. 2011. Vol. 68. № 5. P. 566–573.
20. Gostin I. N. Air pollution effects on the leaf structure of some Fabaceae species // Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 2009. Vol. 37. № 2. P. 57.
21. Ivanova L. A., P'yankov V. I. Structural adaptation of the leaf mesophyll to shading // Russian Journal of Plant Physiology. 2002. Vol. 49. № 3. P. 419–431.
22. Lichtenhaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in enzymology. 1987. Vol. 148. P. 350–382.
23. Monni S., Uhlig C., Junntila O., Hansen E., Hyynnen J. Chemical composition and ecophysiological responses of *Empetrum nigrum* to aboveground element application // Environmental Pollution. 2001. Vol. 112. № 3. P. 417–426.

Поступила в редакцию 07.11.2016