

УДК 581.132:631.526.32:504.3

Оценка устойчивости сортов и форм декоративной яблони к загрязнению воздуха

А.Н. Юшков¹ , Н.В. Борzych¹

¹ФГБНУ «Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина», 393770, ул. Мичурина, 30, г. Мичуринск, Тамбовская область, Россия, info@fnc-mich.ru

Аннотация

В работе представлена оценка устойчивости различных сортов и форм декоративной яблони (*Malus spp.*) к загрязнению воздуха аммиаком и диоксидом серы. Исследования проведены с использованием метода визуализации индуцированной флуоресценции хлорофилла, который позволяет выявлять угнетение фотосинтетической активности на ранних стадиях воздействия газообразных загрязнителей. Объектами исследования являлись отечественные и зарубежные сорта декоративной яблони и контрольные сорта Антоновка обыкновенная, Лигол. Для моделирования условий загрязнения воздуха использовали герметичные камеры, в которых на растения воздействовали диоксидом серы (20 мг/м³) и аммиаком (40 мг/м³) с экспозицией 10 минут. Визуализация индуцированной флуоресценции хлорофилла позволила одновременно анализировать несколько объектов, учитывая их пространственную неоднородность. Метод продемонстрировал высокую чувствительность и эффективность для выделения устойчивых генотипов декоративной яблони к загрязнению воздуха. Изменения фотосинтетической активности оценивали по показателям максимального квантового выхода фотосистемы II (Fv/Fm) и эффективного квантового выхода (Y(II)) с использованием флуориметра Imaging-PAM. Результаты исследований показали, что эффективный квантовый выход, который являлся в рассматриваемом опыте наиболее чувствительным параметром, демонстрировал, как правило, значительное снижение в обработанных образцах. Наибольшая устойчивость к воздействию обоих газов выявлена у сорта Prairie Fire, высокая чувствительность отмечена у сортов Кармелита, Лигол и др., где снижение Y(II) было максимальным. Полученные данные подчеркивают значительную вариабельность устойчивости сортов к загрязнителям, что открывает перспективы для селекционного отбора и использования устойчивых форм в озеленении городской среды. На основании результатов исследования сорт Prairie Fire рекомендуется для использования в экологических программах, направленных на улучшение качества атмосферного воздуха.

Ключевые слова: декоративная яблоня, газоустойчивость, фотосинтез, флуоресценция хлорофилла, эффективный квантовый выход

The assessment of ornamental apple cultivars and forms resistance to air pollution

A.N. Yushkov¹ , N.V. Borzykh¹

¹I.V. Michurin Federal Scientific Center, 393770, ul. Michurina, 30, Michurinsk, Tambov region, Russia, info@fnc-mich.ru

Abstract

The study evaluates the resistance of various cultivars and forms of ornamental apple trees (*Malus spp.*) to air pollution caused by ammonia and sulfur dioxide. The research was conducted using the method of chlorophyll fluorescence imaging, which enabled early detection of photosynthetic activity suppression caused by gaseous pollutants. The study objects included domestic and foreign ornamental apple cultivars, as well as control cultivars Antonovka and Ligol.

To simulate air pollution conditions, sealed chambers were used, where the plants were exposed to sulfur dioxide (20 mg/m^3) and ammonia (40 mg/m^3) for 10 minutes. Chlorophyll fluorescence imaging allowed for the simultaneous analysis of multiple samples, considering their spatial heterogeneity. The method demonstrated high sensitivity and effectiveness in identifying resistant ornamental apple genotypes to air pollution. Changes in photosynthetic activity were assessed through the maximum quantum yield of photosystem II (F_v/F_m) and the effective quantum yield ($Y(II)$) using an Imaging-PAM fluorimeter. The results indicated that the effective quantum yield, the most sensitive parameter in the experiment, generally showed significant reductions in treated samples. The highest resistance to both gases was observed in cv. *Prairie Fire*, while high sensitivity was noted in such cultivars as *Carmelita*, *Ligol*, and others, which exhibited the greatest reduction in $Y(II)$. These findings highlight the significant variability in cultivar resistance to pollutants, opening opportunities for selective breeding and the use of resistant forms in urban greening. Based on the study's results, cv. *Prairie Fire* is recommended for use in ecological programs aimed at improving air quality.

Key words: ornamental apple tree, air pollution tolerance, photosynthesis, chlorophyll fluorescence, effective quantum yield

Введение

Устойчивость растений к загрязнению атмосферного воздуха является одним из ключевых факторов, определяющих их жизнеспособность и декоративность в условиях городской среды. Промышленные предприятия, производство энергии и транспортные системы остаются основными источниками загрязнителей воздуха, таких как твердые частицы, диоксид серы, оксиды азота и озон. Эти вещества могут серьезно нарушать физиологические процессы, замедлять рост растений и оказывать негативное воздействие на экосистемы в целом, что требует разработки эффективных стратегий для минимизации вредного воздействия. Базы данных ВОЗ по качеству окружающего воздуха свидетельствуют, что почти все население мира (99%) дышит воздухом, который не обладает необходимым качеством, что приводит к повышенным рискам для здоровья, связанным с сердечно-сосудистыми и респираторными заболеваниями (WHO global air quality guidelines, 2021). Зелёные насаждения играют важнейшую роль в поддержании его чистоты, поглощая загрязнители, снижая концентрации парниковых газов и улучшая биоразнообразие городских территорий (Safeena et al., 2021; Salsabila et al., 2022; Han et al., 2022).

Декоративные растения, такие как яблони (*Malus spp.*), являются неотъемлемым элементом благоустройства городской среды, способствуя её эстетической привлекательности и комфорту. Одновременно они выполняют роль природных фильтров, эффективно очищающих воздух. Однако успешное использование декоративных яблонь в озеленении возможно только при условии отбора сортов и форм, устойчивых к воздействию загрязнённого воздуха. Яблони отличаются огромным разнообразием генотипов, что открывает перспективы для идентификации и использования наиболее устойчивых форм в целях экологизации урбанизированных территорий.

Несмотря на существенный прогресс в изучении механизмов газоустойчивости растений, многие аспекты всё ещё остаются недостаточно изученными или вызывают научные дискуссии. Например, пути, посредством которых загрязнители вызывают окислительный стресс, изменяют эффективность фотосинтеза и нарушают метаболическую стабильность, сложны и многообразны, что требует дальнейших исследований (Zhang et al., 2016; Leppälä et al., 2022; Molina, Segura, 2021; Antenzio et al., 2024). Критический пробел заключается в стандартизации методов оценки устойчивости растений к загрязнению воздуха, особенно в условиях, максимально приближенных к реальным.

Научные исследования, направленные на оценку устойчивости декоративных растений к загрязнению воздуха, базируются на изучении физиологических и биохимических показателей, отражающих стрессовые реакции растений. Одним из таких методов является расчёт индекса толерантности к загрязнению воздуха (АРТИ), который учитывает содержание аскорбиновой кислоты, уровень хлорофилла, относительное содержание воды и кислотность листового экстракта. Этот индекс широко применяется для оценки устойчивости растений в полевых и лабораторных условиях (Kour, Adak, 2023). Несмотря на отмечаемую эффективность данной методики исследователи заинтересованы в более простом и быстром способе подбора устойчивого сорта.

Современные методы, такие как визуализация флуоресценции хлорофилла, значительно расширили возможности исследования стрессовых реакций растений, в том числе плодовых (Valcke, 2021; Rinmawii et al., 2024; Moustaka, Moustakas, 2023). Нами предложен способ оценки газоустойчивости древесных растений (Yushkov et al., 2024) путем искусственного моделирования загрязнения воздуха диоксидом серы или аммиаком с последующей регистрацией степени угнетения фотосинтетической активности листьев методом импульсной амплитудно-модулированной флуориметрии. Данный метод позволяет оперативно отследить изменения эффективности работы фотосистемы II и энергетического баланса в условиях воздействия загрязняющих веществ и оценить степень устойчивости растений к воздействию газов на ранних стадиях. Фотосистема II – функциональный комплекс электрон-транспортной цепи хлоропластов, который поглощая энергию света в ходе первичных фотохимических реакций, который через цепь окислительно-восстановительных реакций вызывает разложение воды и выделение кислорода.

Целью настоящей работы являлась оценка устойчивости сортов и форм декоративной яблони к загрязнению воздуха и выделение наиболее устойчивых генотипов путем визуализации физиологических изменений при моделировании стрессового воздействия.

Материалы и методы

Исследования проводились на базе лаборатории физиологии устойчивости и геномных технологий, входящей в состав Селекционно-генетического центра им. И.В. Мичурина с 2019 по 2024 годы. Насаждения расположены в городе Мичуринске Тамбовской области, в качестве биологических объектов использованы сорта декоративной яблони отечественной и зарубежной селекции (11 генотипов), входящие в генетическую коллекцию селекционного центра. Контрольными сортами служили Антоновка обыкновенная и Лигол. Возраст растений – 10 лет.

Для флуоресцентного анализа использовали метод импульсной амплитудно-модулированной флуориметрии (Schreiber, 2004) с применением хлорофиллфлуориметра Imaging-PAM и программного обеспечения Imaging Win (Imaging-PAM M-series Chlorophyll Fluorometer. Instrument description and information for users 2.152 / 07.06 9. Revised Edition, 2019).

Перед началом измерений образцы растений подвергали темновой адаптации в течение 30 мин. Далее на них воздействовали насыщающими вспышками света в режиме «световой кривой». Всего использовалось 12 насыщающих импульсов, каждый из которых длился 720 мс (60 мс на один импульс с интервалами в 20 секунд, интенсивность света составляла 2700 мкмоль/м²·с). Параметры измерительного света были следующими: интенсивность – 0,5 мкмоль/м²·с, частота – 1 Гц. Измерительный свет и насыщающие вспышки осуществляли 4 группы по 8 светодиодов синего цвета (длина волны 450 нм).

Флуоресцентные параметры анализировали по следующим показателям:

- максимальная квантовая эффективность фотохимических реакций фотосистемы II

(Fv/Fm) – нормализованное отношение, полученное путем деления переменной флуоресценции на максимальную флуоресценцию (коэффициент, представляющий максимальную потенциальную квантовую эффективность фотосистемы II, когда все реакционные центры открыты);

- эффективный квантовый выход фотосистемы II (Y(II)), представляет собой долю фотонов падающего света, которые фактически используются для фотохимических процессов. Это ключевой фактор, определяющий эффективность фотосинтеза и продуктивность сельскохозяйственных культур. Методика расчета этих показателей подробно описана в обзоре У. Шрайбера (2004).

В рамках эксперимента проводилось искусственное моделирование загрязнения воздуха диоксидом серы и аммиаком. Испытания проводили в герметичной камере объемом 0,23 м³, где в стаканчиках (50 мл) с дистиллированной водой (10 мл) размещали по 5 типичных листьев растений, взятых со средней части однолетних побегов. Отбор проб проводили в середине вегетационного периода (конец июня – июль) во время интенсивного роста побегов. Было проведено три серии экспериментов. Сбор листьев без признаков повреждения болезнями и вредителями осуществляли не менее чем с трех деревьев каждого сорта. Повторность опыта трехкратная. Данные представлены как среднее арифметическое и его стандартное отклонение. В контрольном варианте использовались листья, не подвергавшиеся действию газа. В качестве критерия восприимчивости растений к токсическому воздействию использовался уровень изменения показателей индуцированной флуоресценции в опытном варианте по сравнению с контрольным, рассчитанный в процентах.

Экспериментальные варианты включали:

- воздействие сернистым газом в концентрации 20 мг/м³, экспозиция 10 минут;
- воздействие аммиаком в концентрации 40 мг/м³, экспозиция 10 минут.

Концентрации загрязняющих веществ подбирались опытным путём, чтобы обеспечить оперативное получение реакции фотосинтетического аппарата растений при минимизации риска летальных повреждений тканей.

Обработку данных результатов исследований производили с помощью статистических пакетов программного обеспечения Microsoft Excel 2010 и Statistica 10 для Windows.

Результаты и их обсуждение

Яблоню характеризуют как среднеустойчивый вид среди древесных растений (Николаевский, 1979). Визуальная оценка максимального квантового выхода фотосистемы II (Fv/Fm) выявила отсутствие заметных различий между контрольными и обработанными образцами листьев различных генотипов после моделирования условий загазованности (рисунок 1).

У всех изученных образцов диоксид серы и аммиак не оказали заметного влияния на этот параметр, который считается одним из наиболее информативных и широко применяется для диагностики воздействия стрессовых факторов.

Зафиксированные колебания величины максимального квантового выхода при моделировании загрязнения воздуха оказались незначительными. Его значения снижались в опытном образце по сравнению с контролем от 1,1 (Ola, *M. pumila* var. *pendula*) до 6,3% (Малиновое ожерелье, *Prairie Fire*). Таким образом, использование для диагностики стресса, индуцированного загрязнением воздуха, показателя максимального квантового выхода не было достаточно эффективным.

Проведенные исследования подтвердили, что у всех изученных генотипов моделирование загрязнения воздуха достоверно (различия существенны при P<0,05)

влияло на параметры эффективного квантового выхода фотосистемы II ($Y(II)$). В этом случае между флуоресцентными изображениями контрольных и опытных образцов листьев, наблюдались четкие различия (рисунок 2).

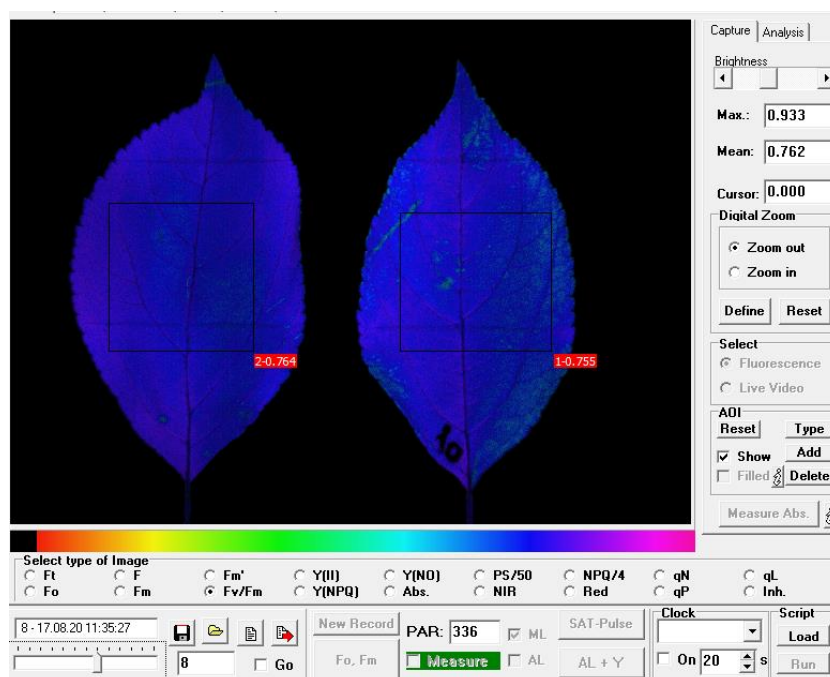


Рисунок 1 – Флуоресцентные изображения листьев сорта Комсомолец, максимальный квантовый выход фотосистемы II (слева контрольный вариант; справа опытный – после моделирования загрязнения воздуха диоксидом серы)

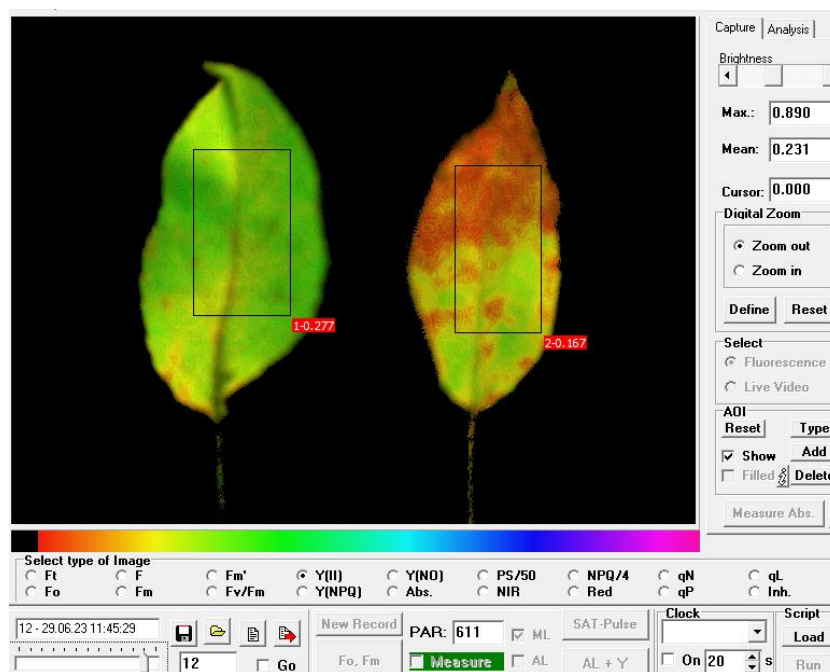


Рисунок 2 – Флуоресцентные изображения листьев сорта Малиновое ожерелье, эффективный квантовый выход фотосистемы II (слева контрольный вариант; справа опытный – после моделирования загрязнения воздуха диоксидом серы)

Контрольные листья, не подвергавшиеся воздействию загрязнителей, сохраняли стабильные значения параметров фотосинтеза, в то время как на флуоресцентных изображениях опытных образцов, обработанных диоксидом серы или аммиаком, были зафиксированы значительные изменения. При этом в диапазоне видимого света повреждений тканей не отмечалось, что позволяет предположить сохранение физиологической активности листовых пластинок и обратимость повреждений (рисунок 3).



Рисунок 3 – Листья контрольного сорта яблони Антоновка обыкновенная в видимом диапазоне (слева контрольный вариант; справа опытный – после моделирования загрязнения воздуха диоксидом серы)

Сравнительная оценка газоустойчивости исследуемых форм была произведена на основе расчета величины снижения эффективного квантового выхода под воздействием соответствующего стрессора (таблица 1).

Таблица 1 – Снижение фотосинтетической активности листьев яблони (эффективного квантового выхода фотосистемы II) под влиянием диоксида серы и аммиака

Сорт, форма яблони	Изменение эффективного квантового выхода фотосистемы II по сравнению с контролем, %, 40 мг/м ³ NH ₃ , 10 минут	Изменение эффективного квантового выхода фотосистемы II по сравнению с контролем, %, 20 мг/м ³ SO ₂ , 10 минут
Brandy Magic	3,3±0,15	-41,2±0,39
Prairie Fire	0,9±0,04	-4,0±0,29
Малиновое ожерелье	0,4±0,04	-41,8±0,72
Ola	-2,7±0,2	-43,5±0,32
Комсомолец	-3,9±0,13	-25,4±1,24
<i>M. pumila</i> var. <i>pendula</i>	-5,9±0,35	-20,7±0,64
Звезда	-5,9±0,06	-28,9±0,72
Манящий аромат	-7,1±0,06	-44,0±0,50
<i>M. sargentii</i>	-19,6±0,15	-18,2±0,39
Лигол (к)	-19,9±0,19	-31,9±0,35
Антоновка обыкновенная (к)	-20,4±0,33	-9,6±0,22
Кармелита	-25,0±0,59	-33,8±0,15

На основании данных, представленных в таблице 1, можно сделать выводы о степени устойчивости различных сортов и форм декоративной яблони к воздействию диоксида серы и аммиака, оцениваемой через снижение эффективного квантового выхода фотосистемы II. Снижение фотосинтетической активности под воздействием аммиака варьировало в пределах от 0,4% у сорта Малиновое ожерелье до 25,0% у сорта Кармелита. Минимальные изменения наблюдались также у сортов Prairie Fire (0,9%) и Brandy Magic (3,3%), что свидетельствует о высокой устойчивости этих сортов к данному загрязнителю. Напротив, сорта Кармелита (25,0%) и Антоновка обыкновенная (20,4%) продемонстрировали максимальную восприимчивость.

Под воздействием диоксида серы снижение квантового выхода было более выраженным. Минимальные изменения наблюдались у форм Prairie Fire (4,0%), Антоновка обыкновенная (9,6%) и *M. pumila* var. *pendula* (20,7%), что позволяет классифицировать эти сорта как устойчивые к этому стрессору. Максимальное угнетение фотосинтетической активности выявлено у сортов Манящий аромат (44,0%), Ola (43,5%) и Малиновое ожерелье (41,8%).

Сорт Prairie Fire выделяется как наиболее устойчивый к обоим видам загрязнителей, демонстрируя минимальные изменения фотосинтетической активности (0,9% для диоксида серы и 4,0% для аммиака). Формы Кармелита, Лигол (к) напротив, показали наибольшее снижение фотосинтетической активности под воздействием использованных в опыте газов, указывая на их более высокую чувствительность.

Заключение

Таким образом, метод визуализации индуцированной флуоресценции хлорофилла продемонстрировал высокую чувствительность и информативность для оценки степени угнетения фотосинтетической активности у декоративной яблони на ранних стадиях воздействия газообразных загрязнителей воздуха, таких как диоксид серы и аммиак. Данный подход позволяет одновременно проводить сравнительный анализ нескольких растительных объектов, учитывая их пространственную неоднородность. Изучение динамики показателя эффективного квантового выхода фотосистемы II ($Y(II)$) в режиме «световой кривой» обеспечило четкое разделение контрольных и обработанных образцов листьев. Это подтверждает перспективность метода для диагностики воздействия загрязнителей атмосферы на растения и выделения устойчивых генотипов для использования в условиях городской среды.

Представленные данные подтверждают значительную вариабельность устойчивости сортов декоративной яблони к загрязнению воздуха, что открывает перспективы для отбора наиболее устойчивых генотипов в целях использования их в условиях городской среды. Сорт Prairie Fire выделен, как наиболее устойчивый к обоим видам загрязнителей, т.к. у него зафиксированы минимальные изменения фотосинтетической активности. Дальнейшее изучение физиологических и биохимических механизмов устойчивости позволит оптимизировать селекционные программы и повысить эффективность озеленения.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «FGSU-2022-0002 Разработать модели идеального сорта по основным промышленным садовым культурам, усовершенствовать методы направленной и маркер-опосредованной селекции и на их основе создать новые генотипы с повышенной устойчивостью к комплексу биотических и абиотических стрессоров, с высокой продуктивностью и улучшенным качеством плодов, конкурентоспособных на российском и мировом рынках»

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Николаевский В.С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 280 с.
2. Antenozio M.L., Caissutti C., Caporusso F.M., Marzi D., Brunetti P. Urban air pollution and plant tolerance: omics responses to ozone, nitrogen oxides, and particulate matter // *Plants*. 2024. 13, 15. 2027. <https://doi.org/10.3390/plants13152027>
3. Han Y., Lee J., Haiping G., Kim K.H., Wanxi P., Bhardwaj N., Oh J.M., Brown R.J.C. Plant-based remediation of air pollution: A review // *Journal of Environmental Management*. 2022. 301. 113860. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113860>
4. Imaging-PAM M-series Chlorophyll Fluorometer. Instrument description and information for users 2.152 / 07.06 9. Revised Edition. 2019
5. Kour N., Adak P. Role of air pollution tolerance index (APTI) method for green belt development: a review // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. 195, 7. 856. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11424-1>
6. Leppälä J., Gaupels F., Xu E., Morales L.O., Durner J., Brosché M. Ozone and nitrogen dioxide regulate similar gene expression responses in arabidopsis but natural variation in the extent of cell death is likely controlled by different genetic loci // *Frontiers in Plant Science*. 2022. 13. 994779. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.994779>
7. Molina L., Segura A. Biochemical and metabolic plant responses toward polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals present in atmospheric pollution // *Plants*. 2021. 10. 2305. <https://doi.org/10.3390/plants10112305>
8. Moustaka J., Moustakas M. Early-stage detection of biotic and abiotic stress on plants by chlorophyll fluorescence imaging analysis // *Biosensors*. 2023. 13, 8. 796 <https://doi.org/10.3390/bios13080796>
9. Rinmawii L., Dhar S., Haokip S. Chlorophyll fluorescence imaging technique: Horticultural perspective // *Journal of Innovative Agriculture*. 2024. 11, 2. 11-16. <http://dx.doi.org/10.37446/jinagri/ra/11.2.2024.11-169>
10. Safeena S.A., Shilpa Shree K.G., P. Naveen Kumar, Tarak Nath Saha K.V. Prasad Studies for Determination of Air Pollution Tolerance Index of Ornamental Plant Species Grown in the Vertical Landscape System // *Biological Forum –An International Journal*. 2021. 13, 1. 388-399 <https://www.researchgate.net/publication/351579558>
11. Salsabila S.H., Kurniadie D., Withaningsih S. Evaluation of several plant species for the sustainability of green open spaces in three sectors // *Biodiversitas*. 2022. 23. 3861-3868. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230801>
12. Schreiber U. Pulse-Amplitude-Modulation (PAM) Fluorometry and Saturation Pulse Method: An Overview // *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis* / Papageorgiou GC, Govindjee (Eds.). Dordrecht: Springer, 2004. 279-319. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_11
13. Valcke R. Can chlorophyll fluorescence imaging make the invisible visible? // *Photosynthetica*. 2021. 59, SI. 381-398. <http://dx.doi.org/10.32615/ps.2021.0177>
14. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Bonn: World Health Organization, 2021. 300. PMID: 34662007
15. Yushkov A.N., Borzykh N.V., Saveleva N.N., Zemisov A.S., Chivilev V.V., Bogdanov R.E. Method for assessing the gas resistance of woody plants // *Journal of applied spectroscopy*. 2024. 90. 1255-1258. <https://doi.org/10.1007/s10812-024-01661-8>
16. Zhang P.Q., Liu Y.J., Chen X., Yang Z., Zhu M.H., Li Y.P. Pollution resistance assessment of existing landscape plants on Beijing streets based on air pollution tolerance index method //

Ecotoxicology and Environmental Safety. 2016. 132. 212-223.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.003>

References

1. Nikolaevsky, V.S. (1979). Biological bases of plant gas resistance. Science. (In Russian)
2. Antenzio, M.L., Caissutti, C., Caporusso, F.M., Marzi, D., & Brunetti, P. (2024). Urban air pollution and plant tolerance: Omics responses to ozone, nitrogen oxides, and particulate matter. *Plants*, 13(15), 2027. <https://doi.org/10.3390/plants13152027>
3. Han, Y., Lee, J., Haiping, G., Kim, K.H., Wanxi, P., Bhardwaj, N., Oh, J.M., & Brown, R.J.C. (2022). Plant-based remediation of air pollution: A review. *Journal of Environmental Management*, 301, 113860. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113860>
4. Heinz Walz GmbH. (2019). *Imaging-PAM M-series Chlorophyll Fluorometer: Instrument description and information for users (Version 2.152/07.06 9, Revised Edition)*.
5. Kour, N., & Adak, P. (2023). Role of air pollution tolerance index (APTI) method for green belt development: A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(7), 856. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11424-1>
6. Leppälä, J., Gaupels, F., Xu, E., Morales, L.O., Durner, J., & Brosché, M. (2022). Ozone and nitrogen dioxide regulate similar gene expression responses in *Arabidopsis*, but natural variation in the extent of cell death is likely controlled by different genetic loci. *Frontiers in Plant Science*, 13, 994779. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.994779>
7. Molina, L., & Segura, A. (2021). Biochemical and metabolic plant responses toward polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals present in atmospheric pollution. *Plants*, 10, 2305. <https://doi.org/10.3390/plants10112305>
8. Moustaka, J., & Moustakas, M. (2023). Early-stage detection of biotic and abiotic stress on plants by chlorophyll fluorescence imaging analysis. *Biosensors*, 13(8), 796. <https://doi.org/10.3390/bios13080796>
9. Rinmawii, L., Dhar, S., & Haokip, S. (2024). Chlorophyll fluorescence imaging technique: Horticultural perspective. *Journal of Innovative Agriculture*, 11(2), 11-16. <http://dx.doi.org/10.37446/jinagri/ra/11.2.2024.11-169>
10. Safeena, S.A., Shilpa Shree, K.G., Naveen Kumar, P., & Tarak Nath Saha, K.V. (2021). Studies for determination of air pollution tolerance index of ornamental plant species grown in the vertical landscape system. *Biological Forum – An International Journal*, 13(1), 388-399. <https://www.researchgate.net/publication/351579558>
11. Salsabila, S.H., Kurniadie, D., & Withaningsih, S. (2022). Evaluation of several plant species for the sustainability of green open spaces in three sectors. *Biodiversitas*, 23, 3861-3868. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230801>
12. Schreiber, U. (2004). Pulse-amplitude-modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: An overview. In G.C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Chlorophyll a fluorescence: A signature of photosynthesis* (pp. 279-319). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_11
13. Valcke, R. (2021). Can chlorophyll fluorescence imaging make the invisible visible? *Photosynthetica*, 59(SI), 381-398. <http://dx.doi.org/10.32615/ps.2021.0177>
14. World Health Organization (WHO). (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide* [Internet]. Geneva: WHO. PMID: 34662007.
15. Yushkov, A.N., Borzykh, N.V., Saveleva, N.N., Zemisov, A.S., Chivilev, V.V., & Bogdanov, R.E. (2024). Method for assessing the gas resistance of woody plants. *Journal of Applied Spectroscopy*, 90, 1255-1258. <https://doi.org/10.1007/s10812-024-01661-8>

16. Zhang, P.Q., Liu, Y.J., Chen, X., Yang, Z., Zhu, M.H., Li, Y.P. (2016). Pollution resistance assessment of existing landscape plants on Beijing streets based on air pollution tolerance index method. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.003>

Авторы:

Андрей Николаевич Юшков, д.с.-х.н., зав. лабораторией физиологии устойчивости и геномных технологий, ФГБНУ «Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина», a89050489146@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2180-0045
SPIN: 2987-1191

Надежда Вячеславовна Борzych, к.с.-х.н., в.н.с. лаборатории физиологии устойчивости и геномных технологий, ФГБНУ «Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина», n-bor@list.ru
ORCID: 0000-0003-4938-2743
SPIN: 1948-6372

Authors:

Andrey Yushkov, D.Sc. (Agriculture), Head of the Laboratory of Physiology of Resistance and Genomic Technologies, I.V. Michurin Federal Research Center, a89050489146@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2180-0045
SPIN: 2987-1191

Nadezhda Borzykh, PhD in Agriculture, Leading Researcher of Physiology of Resistance and Genomic Technologies, I.V. Michurin Federal Research Center, n-bor@list.ru
ORCID: 0000-0003-4938-2743
SPIN: 1948-6372

Отказ от ответственности: заявления, мнения и данные, содержащиеся в публикации, принадлежат исключительно авторам и соавторам. ФГБНУ ВНИИСПК и редакция журнала снимают с себя ответственность за любой ущерб людям и/или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.