

УДК 681.785+581.132

Б.Г. Агеев, А.Б. Антипов, Т.П. Астафурова, Н.А. Воробьева, Ю.Н. Пономарев, В.А. Сапожникова

## КИНЕТИКА ВЫДЕЛЕНИЯ CO<sub>2</sub> ТРАВЯНИСТЫМИ И ХВОЙНЫМИ РАСТЕНИЯМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОЗОНА

Представлены результаты оптико-акустических измерений кинетики темного дыхания растений при воздействии на них повышенной концентрации озона. Описан способ определения и контроля количества O<sub>3</sub> в окружающем воздухе. Эксперименты выполнены для травянистых (горох) и хвойных (кедр) растений. Обнаружено увеличение выделения CO<sub>2</sub> растениями, подвергнутыми воздействию озона.

Начиная с 50-х гг. не ослабевают интерес к проблеме повреждения растений при повышении концентрации атмосферного озона. Увеличение концентрации O<sub>3</sub> в приземном слое в различных регионах происходит по разным причинам. В промышленных зонах, например, где существует повышенное содержание углеводородов и оксидов азота, концентрация O<sub>3</sub> в 2–3 раза превышает фоновую (40–80 мкг/м<sup>3</sup> для средних широт) и увеличивается приблизительно на 1–2 % в год [1]. Для районов, окруженных лесными массивами, рост концентрации O<sub>3</sub> может наблюдаться за счет биогенных углеводородов (изопрен, терпены и т.д.), выделяемых древесными растениями [2].

Исследования по влиянию повышенных концентраций O<sub>3</sub> показывают, что у растений появляются повреждения, приводящие к хлорозу и некрозу листьев [3–5], при хронических воздействиях наблюдается снижение интенсивности фотосинтеза, уменьшение дыхания и роста корней [1, 6, 7] и т.д. Характер обнаруженных изменений зависит от видовых, возрастных и метаболических особенностей объектов [4, 5, 8, 9], условий их выращивания, действия сопутствующих факторов (свет, температура и т.п.) и доз озона [6, 10, 11]. Сравнительные исследования показали, что наибольшую чувствительность к озону проявляют сельскохозяйственные культуры, за ними следуют листовые породы, а затем – хвойные [1, 4]. Однако и в пределах этих групп отмечается большая неоднозначность реакций растений к различным дозам O<sub>3</sub>.

В настоящей статье представлены результаты экспериментов по исследованию выделения CO<sub>2</sub> проростками гороха, хвоей и почками кедра в процессе темного дыхания после воздействия повышенных концентраций озона. Измерения выделения CO<sub>2</sub> опытными растениями в условиях стресса проводились по методике, описанной в [12, 13].

### Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из оптико-акустического спектрометра на базе CO<sub>2</sub>-лазера, генератора озона, измерителя его концентрации и фумигационной камеры. Генератором озона создавался обогащенный озоном поток воздуха: компрессором ПР-7 воздух со скоростью 2 л/мин продувался через камеру, в которой была укрепленна высокочастотная безэлектродная ртутная лампа типа ВСБ-2. Концентрацию O<sub>3</sub> в потоке можно было менять регулировкой подаваемого на лампу напряжения.

Для измерения концентрации O<sub>3</sub> в потоке воздуха был использован модифицированный анализатор паров ртути, созданный в КТИ «Оптика» (г. Томск) [14]. Проведенная модификация РГА позволила измерять ослабление излучения ртутной лампы с  $\lambda = 254$  нм озono-воздушной смесью, которой заполнялась герметичная кювета РГА. Габариты РГА (70 × 35 × 10 см<sup>3</sup>) невелики, но встроенная в его газовую кювету четырехзеркальная шестиходовая оптическая система Чернина [15] позволяла создать длину пути луча  $L = 270$  см.

Устранение засветки и выделение линии излучения с  $\lambda = 254$  нм, для которой коэффициент поглощения O<sub>3</sub> хорошо известен [16], производились двумя фильтрами: интерференционным и УФС-5. Излучение модулировалось с частотой 120 Гц и на выходе из кюветы регистрировалось ФЭУ, результаты измерений обрабатывались на персональном компьютере. Для определения концентрации озона сравнивались значения сигналов с ФЭУ при продувке кюветы воздухом  $I_0$  и озono-воздушной смесью  $I$ . Концентрация O<sub>3</sub> в потоке определялась после установления стабильной величины пропускания  $T = I/I_0$  в кювете и равнялась  $C = 8 \text{ мг/м}^3$ .

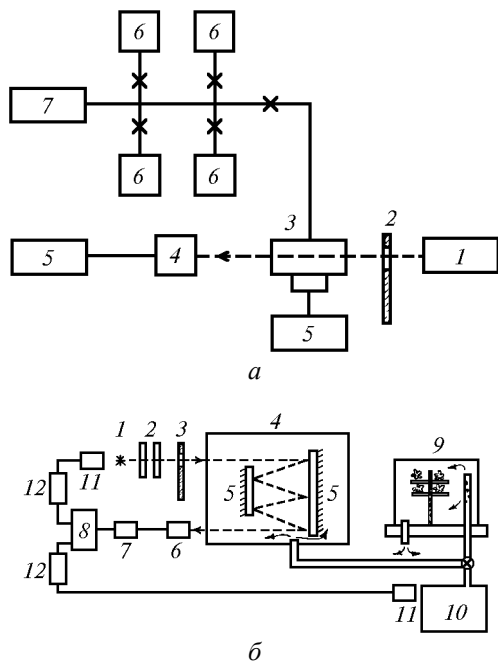


Рис. 1. Блок-схемы эксперимента: *a* (1 – CO<sub>2</sub>-лазер; 2 – модулятор; 3 – оптико-акустический приемник; 4 – измеритель мощности; 5 – система регистрации (предусилитель, селективный усилитель, преобразователь напряжения, самописец); 6 – экспозиционные камеры; 7 – вакуумный пост); *б* (блок-схема РГА и фумигационной камеры: 1 – УФ-лампа; 2 – светофильтры; 3 – модулятор; 4 – кювета; 5 – зеркала; 6 – ФЭУ; 7 – микровольтметр; 9 – фумигационная камера; 10 – генератор озона; 11 – фотодиод; 12 – усилитель)

На рис. 2 приведено изменение пропускания кюветы РГА в зависимости от времени при продувке ее озono-воздушной смесью (кривая 1) и воздухом (кривая 2), очищающим кювету после пребывания в ней O<sub>3</sub>. Из рис. 2 видно, что надежное измерение пропускания с помощью РГА можно производить спустя 5–10 мин после включения продувки. Кроме того, было установлено, что при прекращении продувки озono-воздушной смесью распад O<sub>3</sub> идет достаточно быстро и приблизительно через 8–10 мин пропускание в кювете увеличивается вдвое.



Рис. 2. Пропускание кюветы РГА при продувке ее озono-воздушной смесью от генератора (1) и воздухом (2). За единицу принято пропускание заполненной воздухом кюветы. Продувка воздухом начиналась после установления максимального поглощения озonoвой смесью

Для исследования влияния O<sub>3</sub> на растения была изготовлена закрытая фумигационная камера (ФК) объемом 6,5 л, через которую пропускался обога-

щенный O<sub>3</sub> воздух. Для работы с хвоей и почками кедра в центре ФК устанавливался стержень с прикрепленными к нему небольшими поддонами. Это приспособление легко удалялось, и его место занимали стаканчики с проростками гороха. Фумигационная камера имела тефлоновые шланги для входа и выхода озono-воздушной смеси. По ходу эксперимента производился контроль за концентрацией O<sub>3</sub> на входе и выходе ФК.

### Методика и результаты эксперимента

Объектами исследования служили 9-дневные проростки гороха, выращенные в лабораторных условиях [13], а также хвоя и почки быстро (Б) и медленно (М) растущих морфотипов кедра Томской (Т) и Алтайской (А) репродукции. После обработки O<sub>3</sub> растения помещались в чистые, закрытые экспозиционные камеры объемом 0,5 л (для хвои и почек) и 1 л (для гороха) при атмосферном давлении и выдерживались в них до начала измерений 1 или 2 ч. Измерение выделенного CO<sub>2</sub> производилось оптико-акустическим спектрометром (ОАС), ячейка которого заполнялась исследуемым газом из экспозиционных камер до давления 8 кПа, при котором ОАС имеет максимальную чувствительность. После забора пробы недостаток давления в камерах восполнялся запуском воздуха до атмосферного давления (P = 101 кПа).

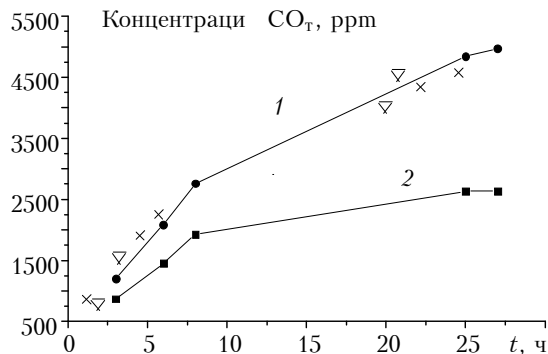


Рис. 3. Динамика выделения CO<sub>2</sub> проростками гороха: 1 – озонированными; 2 – контрольными

Контролем в эксперименте служили растения, находящиеся в нормальных условиях аэрации и помещенные в экспозиционные камеры одновременно с испытуемым материалом. На рис. 3, 4 представлены результаты измерения зависимости концентрации CO<sub>2</sub>, выделяемого растениями, от времени *t*, которое растение провели в закрытых экспозиционных камерах.

В каждый экспериментальный цикл входило измерение концентрации CO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе, для которого она хорошо известна: C<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 345 ppm [17]. Основываясь на этой информации и учитывая, что чувствительность ОАП линейна в диапазоне измеряемых концентраций CO<sub>2</sub>, мы представили динамику выделения CO<sub>2</sub> в единицах ppm (а для сравне-

ния результатов различных циклов – в ppm/m). Исследования, проведенные с проростками гороха, выявили активацию темнового дыхания у озонированных растений (см. рис. 3), что, вероятно, связано с увеличением энергопотребности компенсационных и репарационных процессов [1].

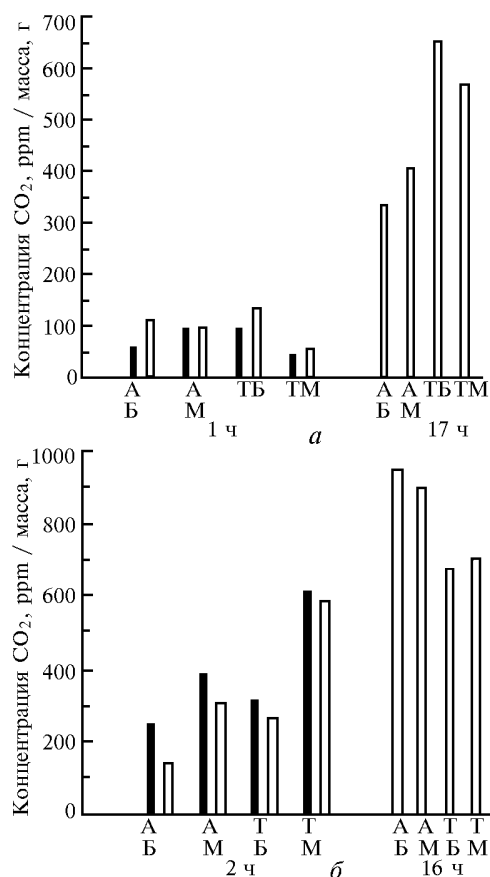


Рис. 4. Изменение концентрации CO<sub>2</sub>, ppm (приведена к единице массы) для четырех образцов хвои кедра (а), и почек кедра (б). ■ – контроль, □ – эксперимент

Интересно отметить, что экспериментальные данные по выделению CO<sub>2</sub> проростками, фумигированными O<sub>3</sub> в течение 1, 3 и 6 ч, хорошо ложатся на кривую 1, т.е. растения в условиях 3–6-часового стресса выделяют такое же количество CO<sub>2</sub>, как и растения после часового воздействия (приблизительно в 1,5 раза больше, чем в контроле). Отсутствие различий между приведенными результатами, возможно, связано с эффектом закрывания устьиц, который проявляется даже при кратковременной фумигации озоном, и дальнейшее поступление O<sub>3</sub> в ткани листа может ограничиваться [1], несмотря на высокое содержание O<sub>3</sub> в среде.

Результаты измерений для хвои кедра также показали, что выделение CO<sub>2</sub> усиливается у всех морфотипов по мере продолжительности воздействия озона (рис. 4,а), однако относительные различия наиболее отчетливо проявились у быстрорастущей формы кедра Томской репродукции (ТБ). Иначе реа-

гировали на действие озона почки (рис. 4,б). Интенсивность их дыхания в нормальных условиях аэрации была выше, чем у хвои, а устойчивость к повышенным концентрациям O<sub>3</sub> – ниже. Различия в интенсивности выделения CO<sub>2</sub> почками также проявились между морфотипами кедра Алтайской и Томской репродукции. Из рис. 4 видно, что кратковременное воздействие O<sub>3</sub> (1–2 ч) ингибирует выделение CO<sub>2</sub> почками кедра, чего не наблюдается у хвои тех же образцов. Сравнение концентраций CO<sub>2</sub> для почек и хвои при длительных экспозициях в атмосфере озона (16–17 ч) показывает, что морфотипы AB и AM имеют одинаковый отклик как для хвои, так и для почек.

Внутривидовые различия между органами растений в условиях озонового стресса обнаружены и другими авторами [1, 5], которые отмечают, что процессы деградации в развивающихся тканях при действии O<sub>3</sub> наблюдаются раньше и проявляются сильнее.

Таким образом, полученные результаты показывают, что интенсивность дыхательного обмена является чувствительным индикатором на действие повышенных концентраций озона. Попадая в ткани растений, O<sub>3</sub> реагирует с водной фазой с образованием активных форм кислорода – свободных радикалов, гидроксил-ионов и перекиси водорода, которые оказывают прямое или косвенное влияние на функциональную активность клетки. Обогащение тканей кислородом, образующимся при разложении O<sub>3</sub>, изменяет углеродный баланс, оказывая влияние в первую очередь на аэробную фазу дыхания. Для выяснения механизмов действия озона на растительные объекты необходимы дальнейшие исследования не только в лабораторных, но и в полевых условиях. Накопление базы данных позволит использовать их при моделировании атмосферно-биосферных взаимодействий.

Авторы выражают глубокую признательность В.И. Коваль-Ковальчук и Ю.А. Головацкому за активную помощь в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-05-64068).

1. Молдау Х. // Физиология растений. 1993. Т. 40. № 4. С. 532–538.
2. Белан Б.Д., Колесников Л.А., Лукьянов О.Ю. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 6. С. 635–638.
3. Erust D., Bodemann A., Schmelzer E. // J. Plant. Phys. 1996. V. 148. N 1/2. P. 215–221.
4. Gunthardt-Goerg M.S. // J. Plant. Phys. 1996. V. 148. N 1/2. P. 207–214.
5. Tuomainen J., Pellinen R., Roy S. et. al. // J. Plant. Phys. 1996. V. 148. N 1/2. P. 179–188.
6. Gerant D., Podor M., Griev P., et. al. // J. Plant. Phys. 1996. V. 148. N 1/2. P. 142–147.
7. Rao M.V., Hale B.A., Ormrod D.P. // J. Plant. Phys. 1995. V. 109. P. 421–432.
8. Kraft M., Weigel H.-J., Mejer G.-J., et. al. // J. Plant. Phys. 1996. V. 148. N 1/2. P. 148–154.
9. Wieser G., Havranek W.M. // J. Plant. Phys. 1996. V. 148. N 1/2. P. 189–194.

10. *Siefermann-Harms D.* // J. Plant. Phys. 1996. V. 148. N 1/2. P. 195–202.
11. *Thalmair M., Bauw G., Thiel S., et. al.* // J. Plant. Phys. 1996. V. 148. N 1/2. P. 222–228.
12. *Агеев Б.Г., Астафурова Т.П., Пономарев Ю.Н.* и др. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 7. С. 986–990.
13. *Агеев Б.Г., Астафурова Т.П., Пономарев Ю.Н., Сапожникова В.А.* // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 4–5. С. 437–448.
14. *Газоанализатор* ртутный РГА-11. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. АМЯ 2.700.001.Т.О. Томск: КТИ «Оптика», 1990.
15. *Чернин С.М., Барская Е.Г.* // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 12. С. 1310–1318.
16. *Перов С.П., Хргиан А.Х.* Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 280 с.
17. *Armbruster W., Fisher J.* // Appl. Opt. 1996. V. 35. N 12. P. 1931–1941.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск  
НИИ ББ при ТГУ, Томск

Поступила в редакцию  
29 сентября 1997 г.

*Ageev B.G., Antipov A.B., Astafurova T.P., Vorob'eva N.A., Ponomarev Y.N., Sapozhnikova V.A.* **Kinetics of the CO<sub>2</sub> Release by Herbaceous and Coniferous Plants Under the Ozone Action.**

Results of optoacoustic measurements of dark-respiration of plants at increased O<sub>3</sub> concentration are presented. The methods of O<sub>3</sub> production and control of its concentration in ambient air are described. Experiment have been performed with herbaceous (pea seedling) and coniferous (cedar) plants. Ozone-induced CO<sub>2</sub> release by plants is found.