

МЕТОДЫ БИОМОНИТОРИНГА ВОЗМОЖНЫХ УТЕЧЕК CO₂ ИЗ ХРАНИЛИЩ

А.И. Сафонов

Донецкий национальный университет, биологический факультет, Донецк, Украина

Представлены результаты обзора современных публикаций о фитоиндикационных эффектах повышенных концентраций углекислого газа в окружающей среде. Выделены возможности реализации программ биомониторингового характера на базе кафедр биологического факультета Донецкого национального университета.

Цель обзора: показать перспективы изучения растительных организмов для диагностики качества состояния окружающей среды в аспекте повышенных концентраций CO₂ для реализации регионального экологического фитоиндикационного мониторинга (как части запланированного биомониторинга на национальном уровне) в промышленно развитых регионах.

Фитоиндикационная экологическая экспертиза рассматривается нами как комплекс мероприятий мониторингового характера по установлению значимости реакции растительных организмов на действие конкретного фактора среды – специфическая индикация различных уровней организации живой материи и масштабов использования для ландшафтных единиц. Таким образом, мы рассматриваем любую информацию, которую можно извлечь из состояния растительного организма на различных уровнях организации, как часть индикаторной базы, используемой для мониторинговых и экспертных программ.

Если рассматривать идею возможности использования растений для оценки и индикации нежелательных повышенных концентраций углекислого газа в окружающей среде, то необходимо иметь в виду многочисленные аспекты реакции растительных организмов на действие углекислоты с учетом специфики лабораторно-исследовательского подхода и уровней организации природной материи:

- изучение хлоропластов и перехода путей фотосинтеза к теплomu и сухому климату [1]; комбинированные последствия влияния повышенной концентрации углекислого газа на фотосинтез у высших растений в контролируемых системах экологического жизнеобеспечения [10];

- анализ изменения атмосферного CO₂ как характерной особенности экологической истории в период развития сосудистых растений, адаптационные механизмы растений в условиях разных концентраций углекислого газа, увеличение CO₂ для увеличения продуктивности – количественная генетика и селекционные подходы; делается предположение, что радикальные изменения в газовом составе атмосферы (при катастрофических изменениях климата) могут существенно сказаться на фенотипе растений; возможны существенные скачки в урожайности, изменение ферментного состава, структурные перестройки в растениях, необходимые для фотосинтеза C₄ в листьях C₃ – эволюционный контекст и физиологическая интеграция реакции растений на изменения концентраций углекислого газа [14];

- физиологические процессы активности фотосинтеза, эффективности урожайности и концентрации углекислого газа в контролируемых условиях, фотодыхание и таксономическая зависимость в использовании различных групп растений – при уменьшении эффективности фотодыхания, стратегии расходования углекислого газа в ассимиляционных органах различных групп растительных организмов [24];

- различные технологии оценки углеродного баланса в горных экосистемах по изменению древесной биомассы, чистой продукции экосистем и почвенного углеродного концентрирования [7];

- эволюционное значение углекислого газа с появлением эукариот на протяжении миллиардов лет [3]; изучение ископаемых листьев растений для установления

ретроспективных сценариев биологического прошлого среды и для прогнозирования климата на основе уровней углекислого газа в среде – высокая информативность биомеханических и биохимических признаков при многомерном подходе [11];

- моделирование климатических сценариев по изменению сообществ растительных организмов и микроекосистем соответствующих точек на поверхности земли [3]; оценка углеродного баланса при выращивании кипарисовых посадок и сборе урожая в умеренных лесах [22]; взаимоотношение типов сообществ древесного и травяного состава в их конкуренции в отдельных регионах планеты, что связано с углеродным циклом в глобальном масштабе [4]; оценка воздействия повышенных концентраций CO_2 на адвентивные растения (занесенные, растения флоры других регионов), сравниваются декоративные растения [20];

- коррелятивные процессы изменения климата и состояния лесных экосистем, 12 прогнозных сценариев, объединяющих рост биомассы, процессы распада, гниения, дыхания, возможные пожары и катастрофические вмешательства насекомых, выброс парниковых газов (с моделью углеродного бюджета канадского лесного сектора), мониторинг лесных массивов в ответ на глобальные климатические изменения, современные адаптированные стратегии лесного хозяйства, глобальные усилия по минимизации трансформирующего воздействия климата на леса [17];

- влияние повышенных концентраций углекислого газа на растения в условиях различных почвенных структур (биофизических параметров почвы), температура, влагоемкость и влажность почвы, оценка биомассы и урожая растений, корневые индексы, ферментативная активность [21];

- физиологические реакции мхов в условиях повышенных концентраций углекислоты – теория расширения термотолерантности фотосинтеза, особая чувствительность мохообразных к фактору углекислого газа в условиях теплового стресса [5];

- физиологические реакции различных видов лишайников в условиях загрязнения среды токсичными газами [9];

- устьичные реакции лабораторных тест-растений на различные концентрации углекислого газа в воздухе – эпидермальный фактор структурирования при росте растений в условиях различных экологических сценариев, получение требуемой устьичной плотности при генетических манипуляциях [6];

- трансформации в структуре мезофилла листовых пластинок, роль специальных белков, способствующих диффузии углекислого газа и проницаемости мембранных структур в естественных условиях выращивания лабораторных растений, связь этих процессов с освещенностью и увлажнением – оценка мезофилльной проводимости CO_2 [8]; мезофилльная проводимость в листьях однодольных и эффект Пекле, длительность фотосинтетических ферментов [12]; колебания в атмосфере концентрации углекислого газа в сторону его увеличения могут и приводят к изменению межконкурентных отношений сорняков и культурных растений на примере помидоров и амаранта: эти экспериментальные данные доказывают, что увеличение CO_2 может усугубить конкурентные отношения между группами растений C_3 и C_4 путей фотосинтеза при увеличении засухи – или физиологической недоступности влаги [23];

- обнаружение утечки углекислого газа по спектральным характеристикам растительности (имитационный эксперимент) для оценки воздействия высокой концентрации CO_2 в почве на растительные объекты – по соотношению хлорофилла и каротиноидов, уменьшение вегетационного индекса, соотношение хлорофилла А и В [13];

- организация мониторинга утечки углекислого газа в атмосферу из-под земли по методу нескольких спектральных изображений растительности, основанном на индуцированном растительном стрессе; результаты регрессионного анализа отражения и нормализованного разностного вегетационного индекса с течением времени показывают значительную корреляцию между концентрацией углекислого газа и изображениями, что свидетельствует об эффективности этого метода для контроля утечки CO_2 ; осуществлен анализ вегетационных индексов [18];

- негативные последствия для биоразнообразия, которые могут возникнуть в результате реализации программы неуместной (неправильной, некорректной) посадки деревьев, если даже эта программа направлена на уменьшение атмосферных выбросов углекислого газа для эффективного способа изменения климата: уничтожение аборигенной (местной) флоры и растительности для новых посадок древесных насаждений, посадка пород деревьев, которые могут проявлять инвазионную способность и нарушить фитосанитарный баланс территории, древесные насаждения негативно могут сказаться на ключевые экосистемы и быть причиной опасных процессов, например пожар, нарушение гидрологического режима; при этом возможные ошибки в экологическом менеджменте: монотипичность посадок – уменьшается экологическая ценность, количественная экологическая неопределенность, невозможность осуществления прогнозных сценариев по реакции местных жителей (аборигенных видов) на появляющиеся экологические проблемы в регионах эксперимента [15];

- технологии строительства и функциональной активности при создании "зеленых крыш" на крышах домов для смягчения последствия загрязнения; предполагается разработка усовершенствованных растущих субстратов, использования городских крыш в сельском хозяйстве, связывание углерода, оценка воздействия на здоровье человека [19];

- экспериментальные установки по определению углеродного баланса при переносе растений из одного климатического региона в другой и наоборот: факторы влажности и засухи, воздействия на экосистемы в микрокосмах [25];

- важные вопросы в стратегии жизни человеческого населения рассматриваются через призму критериев анализа городской среды, загрязнения окружающей среды [16].

Практические геологические секвестрации потребуют долгосрочного мониторинга для определения возможной утечки в атмосферу CO₂. Одним их потенциальных методов мониторинга является мультиспектральное изображение отражаемости растительности для определения утечки с помощью изучения стресса у растений, вызванного CO₂. Было использовано несколько спектральных характеристик для одновременной регистрации для зеленого, красного и близкого к инфракрасному изображений в режиме реального времени при определенных условиях калибровки. Результаты регрессионного анализа по группам отражений и нормализованного разностного вегетационного индекса с течением времени показывают значительную корреляцию этого показателя со степенью удаления от источника загрязнения, что свидетельствует о пригодности этого метода для контроля утечки углекислого газа [18]

Таким образом, тематически вопросы изучения высоких концентраций углекислого газа охватывают широкий спектр проблем [26], решение которых требует не только комплексного подхода, многоплановой диагностики, но и имеют важнейшее практическое значение. Представленный обзор обобщает данные 76 публикаций [26], которые были выбраны из списков 20 тыс. источников современной литературы ведущих научно-исследовательских лабораторий и авторитетный издательств.

Таким образом, представлены результаты работы ученых 164 научно-исследовательских институтов и лабораторий из 27 стран: основные публикации лабораторий из стран: США (47), Китай (20), Австралия (14), Испания (11), Швеция (10), Великобритания (9); их значительно дополняют государства: Германия (8), Япония (8), Канада (7), Израиль (5), Индия (4), Италия (3), Швейцария (2), ЮАР (2), Бельгия (2), единично представлены работы стран: Франция, Греция, Словения, Малайзия, Индонезия, Ирак, Корея, Новая Зеландия, Дания, Ирландия, Чехия, Пакистан. Указанная статистика не является репрезентативной по государствам, заинтересованным в решении вопросов влияния углекислого газа на растительные организмы, способы диагностики высоких концентраций этого газа в окружающей среде; однако эти данные важны для тематики поставленных задач и целей обзора. Наиболее значимыми публикациями из представленных в списке выделяются те, тематика которых пересекается с климатическими эффектами – ретроспективными и прогнозными, приборами и способами, а также подходами к оцениванию утечки углекислого газа и реакции растительных сообществ на эти факторы

стресса. Биологические вопросы, сопряженные с различными (преимущественно высокими или повышенными) концентрациями углекислого газа имеют разнонаправленный вектор и обсуждаются как в эволюционном, климатическом, глобально-континентальном, так и в узкоспециализированных молекулярно-генетических и структурно-физиологических вопросах на уровне одной клетки, тканей, органов, систем органов, отдельных организмов, популяций и даже гетерогенных сообществ уровня биомов. Такой подход позволил не только очертить важность проблематики, но и подобрать некоторые принципиальные возможности реализации научных программ учеными биологического факультета Донецкого национального университета.

Учитывая специфику работы научных направлений на кафедрах факультета и совместные интересы естественнонаучного блока Донецкого национального университета, перспективными и возможными для реализации являются следующие направления, касающиеся экспериментального изучения влияния высоких или повышенных концентраций углекислого газа в окружающей среде: фитоиндикационный аспект, реализация мониторингового скрининга с помощью растений, картирование и зонирование территорий, представляющих экологических риск, установление порогов чувствительности биоиндикаторов в сообществах аборигенных видов, диагностика трансформации природных ландшафтов на примере урбаногосистем, диагностика степени пригодности первичных ландшафтов к хозяйственной деятельности, автоматизированные системы оценки динамики меняющихся показателей фактора среды; разработка программ по изучению поведенческих стратегий растений в условиях трансформированной среды промышленного региона; проведение экологических экспертиз на территориях разного целевого назначения; оценка уровней загрязненности и степеней нарушенности экотопов с целью усиленной комплексной корректировки ситуации с учетом полифакторного анализа.

При такой специфике реализации программ ученым необходимо соответствующее аппаратное обеспечение на уровне хлорофилла, клеток функциональных тканей, датчиков для комплексного мониторинга, систем визуализации данных.

Список литературы

1. Baldocchi D. The grass response // *Nature*. Vol 476, 11 August 2011. – 160-162.
2. Beerling D.J. Atmospheric carbon dioxide: a driver of photosynthetic eukaryote evolution for over a billion years? // doi:10.1098/rstb.2011.0276. – *Phil. Trans. R. Soc. B.* – (2012) 367. – 477-482.
3. Bergengren J.C., Waliser D.E., Yung Y.L. Ecological sensitivity: a biospheric view of climate change // doi 10.1007/s10584-011-0065-1. – *Climatic Change*. (2011) 107. – 433-457.
4. Bond W.J., Midgley G.F. Carbon dioxide and the uneasy interactions of trees and savannah grasses // doi:10.1098/rstb.2011.0182. – *Phil. Trans. R. Soc. B.* – (2012) 367. – 601-612.
5. Coe K.K., Belnap J., Grote E.E., Sparks J.P. Physiological ecology of desert biocrust moss following 10 years exposure to elevated CO₂: evidence for enhanced photosynthetic thermotolerance // *Physiologia Plantarum* 144, 2012. – 346-356.
6. Doheny-Adams T., Hunt L., Franks P.J. Genetic manipulation of stomatal density influences stomatal size, plant growth and tolerance to restricted water supply across a growth carbon dioxide gradient // doi:10.1098/rstb.2011.0272. – *Phil. Trans. R. Soc. B* (2012) 367. – 547-555.
7. Etzold S., Ruehr N.K., Zweifel R., Dobbertin M. The Carbon Balance of Two Contrasting Mountain Forest Ecosystems in Switzerland: Similar Annual Trends, but Seasonal Differences // doi: 10.1007/s10021-011-9481-3. – *Ecosystems* (2011) 14. – 1289-1309.
8. Flexas J., Ribas-Carbo´ M., Hanson D.T., Bota J., Otto B., Cifre J., McDowell N. Tobacco aquaporin NtAQP1 is involved in mesophyll conductance to CO₂ in vivo // doi: 10.1111/j.1365-313X.2006.02879.x. – *The Plant Journal* (2006) 48. – 427-439.
9. Häffner E., Lomský B., Hynek V. Air pollution and lichen physiology. Physiological Responses of Different Lichens in a Transplant Experiment Following an SO₂-Gradient // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 131: 2001. – 185-201.

10. Hu E., Tong L., Liu H. Mixed effects of CO₂ concentration on photosynthesis of lettuce in a closed // *Ecological Engineering* 37 (2011). – 2082-2086.
11. Jordan G.J. A critical framework for the assessment of biological palaeoproxies: predicting past climate and levels of atmospheric CO₂ from fossil leaves // *New Phytologist*. (2011) 192. – 29-44.
12. Kodama N., Cousins A., Tu K.P., Barbour M.M. Spatial variation in photosynthetic CO₂ carbon and oxygen isotope discrimination along leaves of the monocot triticale (*Triticum X Secale*) relates to mesophyll conductance and the Péclet effect // doi: 10.1111/j.1365-3040.2011.02352.x. *Plant, Cell and Environment* (2011) 34. – 1548-1562.
13. Lakkaraju V.R., Zhou X., Apple M.E., Dobeck L.M. Studying the vegetation response to simulated leakage of sequestered CO₂ using spectral vegetation indices // *Ecological Informatics*. – 5 (2010). – 379-389.
14. Leakey A.D.B., Lau J.A. Evolutionary context for understanding and manipulating plant responses to past, present and future atmospheric [CO₂] // doi:10.1098/rstb.2011.0248. – *Phil. Trans. R. Soc. B* (2012) 367. – 613-629.
15. Lindenmayer D.B., Hulvey K.B., Hobbs R.J., Colyvan M., Felton A., Possingham H., Steffen W., Youngentob K., Gibbons P. Avoiding bio-perversity from carbon sequestration solutions // *Conservation Letters*. 5 (2012). – 28-36.
16. Manning W.J. Urban environment: Defining its nature and problems and developing strategies to overcome obstacles to sustainability and quality of life // *Environmental Pollution*. – 159 (2011) 1963-1964.
17. Metsaranta J.M., Dymond C.C., Kurz W.A., Spittlehouse D.L. Uncertainty of 21st century growing stocks and GHG balance of forests in British Columbia, Canada resulting from potential climate change impacts on ecosystem processes // *Forest Ecology and Management*. 262 (2011). – 827-837.
18. Rouse J., Shaw J.A., Lawrence R.L., Lewicki J.L., Spangler L.H. Multi-spectral imaging of vegetation for detecting CO₂ leaking from underground // doi. 10.1007/s12665-010-0483-9. – *Environ. Earth Sci.* (2010) 60: 313–323.
19. Rowe D.B. Green roofs as a means of pollution abatement // *Environmental Pollution*. 159 (2011). – 2100-2110.
20. Runion G.B., Finegan H.M. Effects of Elevated Atmospheric CO₂ on Non-Native Plants: Comparison of Two Important Southeastern Ornamentals // *Environ. Control Biol.* – Volume 49, № 3. – 2011. – 107-117.
21. Saha S., Chakraborty D., Pal M., Nagarajan S. Impact of elevated CO₂ on utilization of soil moisture and associated soil biophysical parameters in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. – 142 (2011). – 213-221.
22. Ueyama M., Kai A., Ichii K., Hamotani K., Kosugi Y., Monjia N. The sensitivity of carbon sequestration to harvesting and climate conditions in a temperate cypress forest: Observations and modeling // *Ecological Modelling*. 222 (2011). – 3216-3225.
23. Valerio M., Tomecek M.B., Lovelli S., Ziska L.H. Quantifying the effect of drought on carbon dioxide-induced changes in competition between a C₃ crop (tomato) and a C₄ weed (*Amaranthus retroflexus*) // doi: 10.1111/j.1365-3180.2011.00874.x *European Weed Research Society Weed Research*. 2011, 51. – 591–600.
24. Vats S.K., Kumar S., Ahuja P.S. CO₂ sequestration in plants: lesson from divergent strategies // *Photosynthetica*. – 49 (4). – 2011. – 481-496.
25. Wu Z., Koch G.W., Dijkstra P., Bowker M.A. Responses of Ecosystem Carbon Cycling to Climate Change Treatments Along an Elevation Gradient // doi: 10.1007/s10021-011-9464-4. – *Ecosystems* (2011) 14. – 1066-1080.
26. Навчально-методичний посібник з курсу "Промислова ботаніка" / А.І. Сафонов. – Донецьк: ДонНУ, 2012. – 194 с.