УДК 574.45

Влияние повышенных концентраций черного углерода в атмосфере на фотосинтез в листьях березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.) в Центральной Якутии

П.Г. Мордовской*, Т.Х. Максимов, М.Р. Григорьев, Е.В. Старостин, А.А. Неустроев
Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», Якутск, Россия
*Эл. почта: mordovskoipg@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.11.2023; принята к печати 27.02.2024

Черный углерод (ЧУ) характеризуется способностью поглощать солнечную радиацию и относительно недолговременным периодом осаждения. Основным источником черного углерода в атмосфере Центральной Якутии являются природные пожары. Цель исследования – выявить влияние различных концентраций черного углерода в воздухе на фотосинтез в листьях березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.). Мониторинг концентрации черного углерода и фотосинтеза проводился на лесной научной станции «Спасская падь» (30 км севернее от г. Якутска). Установлено, что высокие концентрации черного углерода в атмосфере, связанные со значительным снижением фотосинтетически активной радиации, приводят к нарушениям фотосинтетических процессова в листьях.
Ключевые слова: *мониторинг черного углерода, природные пожары, фотосинтез*

Effects of increased levels of black cabon in the air on photosynthesis in leaves of the birch tree *Betula platyphylla* Sukacz. in Central Yakutia

P.G. Mordovskoi*, T.Kh. Maksimov, Ye.V. Starostin, A.A. Neustroyev
Yakutsk Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
*E-mail: mordovskoipg@yandex.ru

Black carbon absorbs solar radiation. Its sedimentation period is relatively short. The main sources of airborne black carbon in Central Yakutia is forest fires. The objective of the present study is to assess the effects of different back carbon levels in the air on photosynthesis in the leaves of the birch tree *Betula platyphylla* Sukacz. Airborne black carbon monitoring was carried out at the forest research station Spasskaya Pad' located 30 km to the north from Yakutsk. It was found that elevated black carbon levels in the air significantly compromise photosynthetic process in birch leaves.
Keywords: *black carbon monitoring, natural fires, photosynthesis*

Введение

Природные пожары – это источник парниковых газов (углекислый и угарный газ, оксиды азота, метан и др.) и аэрозолей (взвешенные твердые частицы, черный углерод) [8, 6], которые влияют на биогеоценоз локальных выгоревших территорий [3] и на обширные территории при перемещении воздушных масс с повышенным содержанием загрязняющих веществ. Также черный углерод снижает солнечную радиацию [5], что должно негативно влиять на фотосинтез в растениях. Наиболее чувствительны к загрязнению атмосферы первичные этапы фотосинтеза. Например, увеличение концентрации углекислого газа вызвало увеличение фотосинтетической активности листьев яровой пшеницы [9]; угарный газ и оксиды азота в повышенных концентрациях при длительном воздействии вызывают нарушения в физиологических процессах у клубники [12]. Большое количество внешних факторов и различия по их влиянию на фотосинтез растений делают актуальными исследования воздействия повышенных концентраций черного углерода на фотосинтез в короткий вегетационный сезон Центральной Якутии.

Условия, объекты и методы исследования

Исследования проводили на лесной научной станции «Спасская падь» в 30 км севернее от г. Якутска (62°14′ с.ш., 129°37′ в.д.). Климат Центральной Якутии отличается резкой континентальностью, с продолжительной холодной зимой и коротким теплым летом.

Объектом исследования выбрана широко распространённая в Центральной Якутии береза плосколистная (*Betula platyphylla* Sukacz.) [2] – послепожарный пионерный вид с большей фотосинтетической активностью, чем у хвойных растений, играющий большую роль в бюджете углерода лесных экосистем криолитозоны [4].

Суточные измерения фотосинтетически активной радиации и фотосинтетической активности, устьичной проводимости и транспирации в листьях березы плосколистной проводили при помощи инфракрасного анализатора ADC LCi (ADC BioScientific, Великобритания) с 06:00 до 10:00 ежечасно и с 12:00 до 06:00 каждые 3 часа. Для исследования выбирали здоровые зеленые листья без видимых повреждений на средней кроне взрослых деревьев. Отобранный лист помещали в прозрачную камеру анализатора (площадью 2,5×2,5 см) таким образом, чтобы поверхность листа располагалась перпендикулярно относительно линии к солнцу. По полученным значениям газообмена CO_2 и H_2O через инфракрасный газоанализатор рассчитывается уровни фотосинтеза, транспирации и устьичной проводимости. Величины фотосинтетически активной радиации (ФАР) определяли при помощи ФАР-

Статья опубликована на сайте журнала "Криосфера" в окончательной версии в № 1 за 2024 г. В корректуры и подписки в статью внесены изменения. Ссылка на оригинал: https://doi.org/10.15356/cryo.2024.01.06 Для цитирования: Мордовской П.Г., Максимов Т.Х., Григорьев М.Р., Старостин Е.В., Неустроев А.А. Влияние повышенных концентраций черного углерода в атмосфере на фотосинтез в листьях березы плосколистной (Betula platyphylla Sukacz.) в Центральной Якутии // Криосфера. 2024. Т. XXVIII. № 1. С. 16–24. Доступна по адресу: https://cryosphere.ru/ru/archive/2024/1/article/mordovskoi.html

датчика, расположенного рядом с прозрачной камерой. В работе отслежены три березы. Возраст деревьев 70-80 лет. Данные были получены 2, 10, 16 и 25 июня, 1, 8, 14, 22 и 29 июля, 7, 12, 19 и 26 августа и 1 и 9 сентября. Результаты представляют собой средние по трем листьям

Непрерывный мониторинг массовой концентрации черного углерода в атмосферном воздухе проводили на высоте 10 метров с использованием абсорбционного фотометра COSMOS BCM3130 (Kanomax, Япония) [7, 10, 11, 13] с частотой измерения 1 мин.

Температура, количество осадков и другие метеорологические параметры были измерены автоматической метеостанцией WXT 520 (Vaisala, Финляндия), расположенной на лесной научной станции «Спасская падь» в непосредственной близости от экспериментальной площадки.

Результаты и их обсуждение

В исследованиях фотосинтеза растений важнейшую роль имеет определение переходов вегетационного периода и сезонного перехода весна-лето и лето-осень. Согласно локальным метеонаблюдениям, фенологическая весна по Т.Н. Буториной [1] на лесной станции «Спасская падь» в 2021 году для Сибири наступила 30 апреля, когда произошел переход дневных температур выше 0°С. Фенологическое лето наступило 8 июня, когда среднесуточные температуры превысили +15°С. Фенологическая осень наступила 24 августа после перехода среднесуточных температур ниже +15°С.

На рис. 1 представлен суточный ход процессов фотосинтеза березы плосколистной. Наибольшая интенсивность фотосинтеза наблюдается в дневное время при максимальном воздействии фотосинтетически активной радиации. Средние значения устьичной проводимости и скорости транспирации в летний период увеличиваются в утреннее время и снижаются в течение дня. Скорость транспирации зависит от состояния устьиц листа, температуры, влажности, скорости ветра, влажности и минерального состава почв.

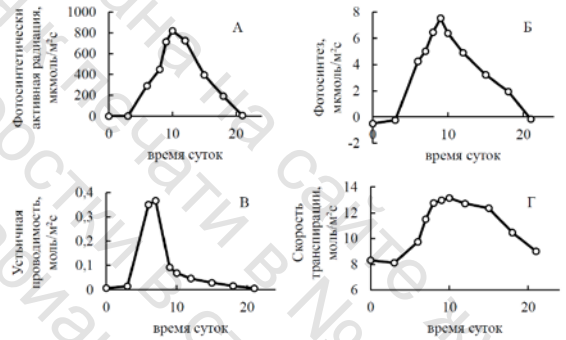

Рис. 1. Суточный ход процессов фотосинтеза березы плосколистной в летний вегетационный период с 8 июня по 24 августа 2021 г. А – фотосинтетически активная радиация, Б – фотосинтез, В – устьичная проводимость, Г – скорость транспирации

Массовая концентрация черного углерода в летний период 2021 года представлена на рис. 2. Максимальная массовая концентрация ЧУ зафиксирована 12 августа и составила 19,4 мкг/м^3. Пиковые значения были зафиксированы в период высокой задымленности от природных пожаров (ПП), что подтверждается данными спутникового мониторинга природных пожаров FIRMS (Fire Information for Resource Management System, США) 12 августа 2021 г. в Центральной Якутии. Задымленность и количество очагов ПП значительно снизились к 17 августа, средняя концентрация ЧУ в этот день составила 0,16 мкг/м^3 (рис. 3).

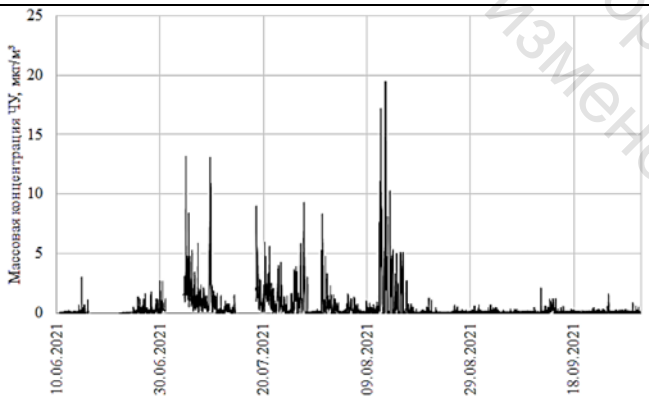

Рис. 2. Массовая концентрация черного углерода в приземном воздухе на станции Спасская Падь в летний период 2021 года

Статья опубликована на сайте журнала "Криосфера" в № 1 г. 2024 г. до корректуры и верстки. Статья может быть изменена в окончательном варианте в большей степени по формате. В окончательном варианте возможны изменения.

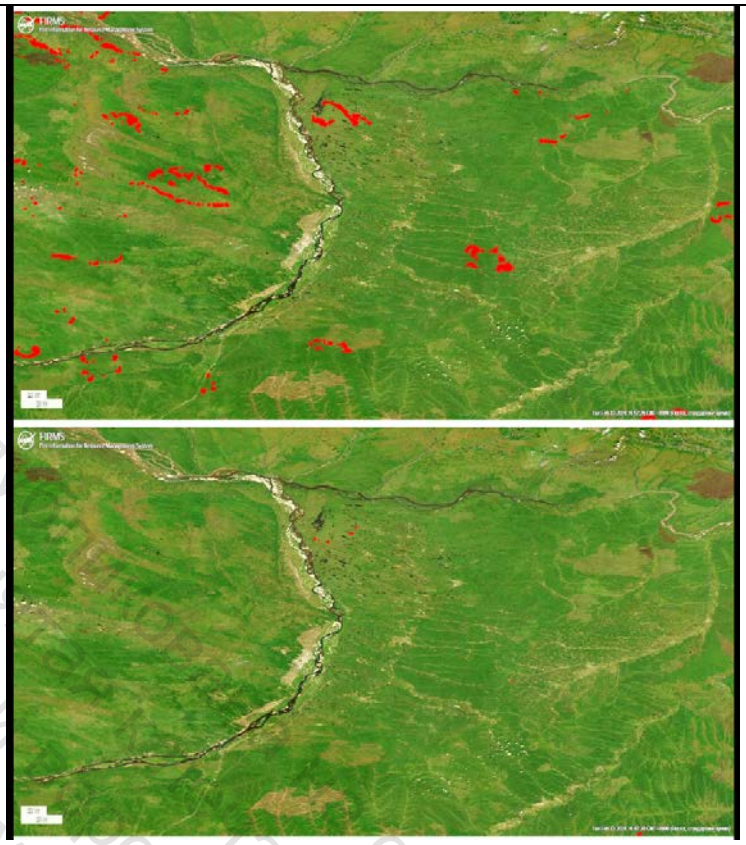

Рис. 3. Спутниковые данные FIRMS действующих ПП 12 и 17 августа 2021 г. в Центральной Якутии. Красные точки – очаги ПП

Уровни фотосинтетически активной радиации, устьичной проводимости, фотосинтеза и скорости транспирации при различных уровнях загрязнения воздуха ЧУ представлены на рис. 4, где данные разделены на три группы: утренние (с 6 до 10 ч.), дневные (12 и 15 ч.) и вечерние (18 и 21 ч.). Для наглядности графиков использована логарифмическая шкала массовой концентрации ЧУ.

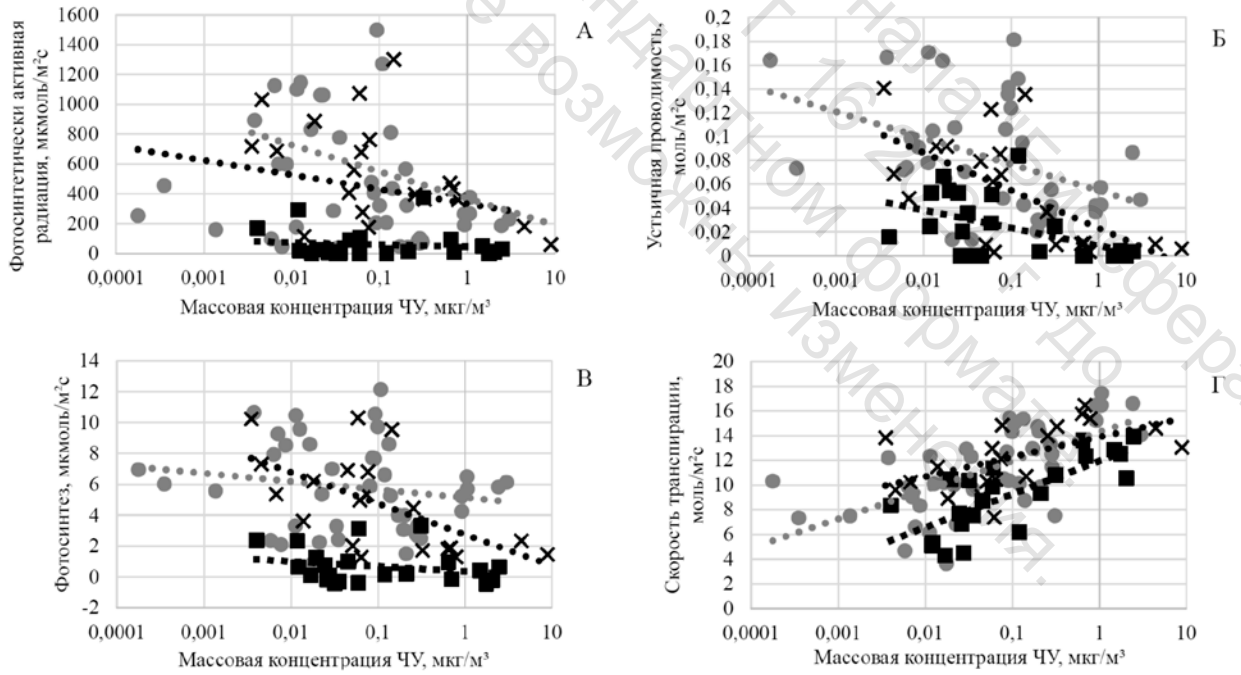

Рис. 4. Влияние массовой концентрации ЧУ на фотосинтетически активную радиацию (А), устьичную проводимость (Б), фотосинтез (В), скорость транспирации (Г): утреннее (серые круги, линия тренда – серые круглые точки), дневное (черные крестики, линия тренда – черные круглые точки) и вечернее (черные квадраты, линия тренда – черные квадратные точки) время.

Статья опубликована на сайте журнала "Биосфера" как принята к печати в виде Т 16 42 до корректуры и верстки. Стандартном формате возможны изменения. В окончательном варианте

В табл. 1 показаны средние значения данных параметров при различных массовых концентрациях ЧУ, также разделенные на три группы: чистый воздух от 0 до 0,1 мкг/м^3, умеренное загрязнение от 0,1 до 1 и сильное загрязнение свыше 1 мкг/м^3.

Табл. 1

Средние значения (M±m) фотосинтетически активной радиации, устьичной проводимости и фотосинтеза при различных массовых концентрациях ЧУ (n - число измерений)

Средние значения	**ЧУ, мкг/м^3**		
	0-0,1 (n=48)	0,1-1 (n=28)	свыше 1 (n=10)
Фотосинтетически активная радиация, мкмоль фотонов/м²с	456±121	308±130	153±84
Устьичная проводимость, моль CO_2/м²с	0,064±0,013	0,044±0,018	0,023±0,018
Фотосинтез, мкмоль CO_2/м^{2}с	4,85±0,98	3,88±1,24	3,62±1,87
Скорость транспирации, моль H_2O/м²с	9,37±0,80	12,73±1,07	14,19±1,38

Наибольшее прямое воздействие ЧУ в воздухе оказывает на поток ФАР (рис. 4А). Средний уровень ФАР при массовой концентрации ЧУ до 0,1 мкг/м3 составил 456 мкмоль фотонов/м²с, повышение массовой концентрации ЧУ до 1 мкг/м^3 вызывает снижение ФАР до 308 мкмоль фотонов/м²с, свыше 1 мкг/м^3 – до 153 мкмоль фотонов/м²с, соответственно. Следует учесть, что осажденный на листьях или хвое деревьев ЧУ не оказывает влияния на фотосинтез растений ввиду своего микронного размера. Исключением могут быть катастрофически высокая массовая концентрация ЧУ в непосредственной близости от природного пожара [14].

На рис. 4Б показана зависимость устьичной проводимости от массовой концентрации ЧУ в воздухе. Устьичная проводимость листьев регулирует процессы фотосинтеза и транспирации и в среднем составляет 0,064 моль CO_2/м²с для листьев березы повислой при малых концентрация ЧУ до 0,1 мкг/м^3. Повышение массовой концентрация ЧУ в воздухе до 0,1-1 мкг/м³ вызывало снижение средней устьичной проводимости до 0,044 моль CO_2/м²с, высокие массовые концентрации ЧУ свыше 1 мкг/м³ еще более снизили среднюю устьичную проводимость до 0,023 моль CO_2/м^{2}с.

На рис. 4В заметно негативное воздействие черного углерода на процесс фотосинтеза: при умеренном загрязнении снижение на 20%, при сильном загрязнении – на 25% по сравнению с чистым воздухом. Снижение фотосинтеза наблюдается несмотря на повышение концентрации CO_2 в дымовом следе от природных пожаров. Конечно, также необходимо учитывать расстояние от места наблюдения до природного пожара, так как углекислый газ, в отличие от ЧУ, постепенно поднимается в верхние слои атмосферы

На рис. 4Г показана зависимость скорости транспирации от массовой концентрации ЧУ. Видно, что повышение массовой концентрации ЧУ в воздухе вызывает увеличение скорости транспирации воды в листьях березы повислой независимо от времени суток, что может быть связано со снижением влажности воздуха в период дымового воздействия от природных пожаров или кратковременной засухи, которая стала причиной активности природных пожаров. Также повышение скорости транспирации является защитной реакцией растения на локальное повышение температуры воздуха вследствие поглощения солнечного тепла ЧУ.

Таким образом, повышение массовой концентрации ЧУ в воздухе оказывает прямое стрессовое воздействие на листовой аппарат березы плосколистной. Реакцией растения на стресс являются снижение устьичной проводимости на 30% и снижение интенсивности фотосинтеза более 60%. Следует отметить, что прямое воздействие ЧУ обусловлено снижением фотосинтетически активной радиации в утреннее и дневное время. Косвенное воздействие повышенных концентраций ЧУ может быть связано с изменением скорости транспирации листьев березы плосколистной.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FWRS-2021-0047 (раздел по черному углероду) и FWRS-2021-0042 (раздел по фотосинтезу).

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Буторина ТН, Крутовская ЕА. Сезонные ритмы природы Средней Сибири. М.: Наука; 1972.
2. Караваев МН. Растительный мир Якутии. Якутск: Якуткнигоиздат; 1971.
3. Санников СН. Лесные пожары как фактор преобразования структуры, возобновления и эволюции биогеоценозов. Экология. 1981;(6):23-33.
4. Уткин АИ. Леса Центральной Якутии. М.: Наука; 1965.
5. Чубарова НЕ, Горбаренко ЕВ, Незваль ЕИ, Шиловцева ОА. Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмосковье. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011;47(6):790.

Статья опубликована на сайте журнала "Биосфера" № 1 2022 г. до корректуры и выверки статьи в окончательном варианте. В окончательном варианте возможны изменения.

6. Швиденко АЗ, Щепащенко ДГ. Климатические изменения и лесные пожары в России. Лесоведение. 2013;(5):50-61.

Общий список литературы / References

1. Butorina TN, Krutovskaya EA. Sezonnyye Ritmy Prirody Sredney Sibiri [Seasonal Rhythms of Nature in Central Siberia]. Moscow: Nauka; 1972. (In Russ.)
2. Karavayev MN. Rastitel'nyy Mir Yakutii [Flora of Yakutia]. Yakutsk: Yakutknigoizdat; 1971. (In Russ.)
3. Sannikov SN. [Forest fires as a factor in the transformation of structure, renewal and evolution of biogeocenoses]. Ekologiya. 1981;(6):23-33. (In Russ.)
4. Utkin AI. Lesa Tsentralnoy Yakutii [Forests of Central Yakutia]. Moscow: Nauka; 1965. (In Russ.)
5. Chubarova NYe, Gorbarenko YeV, Nezval YeI, Shilovtseva OA. Aerosol and radiation characteristics of the atmosphere during forest and peat fires in 1972, 2002, and 2010 in the Moscow Region. Izvestiya RAN Fizika Atmosfery i Okeana. 2011;47(6):790. (In Russ.)
6. Shvidenko AZ, Schepaschenko DG. Climate changes and wildfires in russia. Lesovedeniye. 2013;(5):50-61. (In Russ.)
7. Abatzoglou JT, Williams AP, Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices. Geophys Res Lett. 2019;46 (1):326-36.
8. Andreae MO, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. Glob Biogeochem Cycles. 2001;15(4):955-66.
9. Garcia RL, Long SP, Wall GW, Osborne CP, Kimball BA, Nie GY, Pinter PJ, Lamorte RL, Wechsung F. Photosynthesis and conductance of spring-wheat leaves: field response to continuous free-air atmospheric CO_2 enrichment. Plant Cell Environ. 1998;21(7):659-69.
10. Miyakawa T, Mordovskoi P, Kanaya Y. Evaluation of black carbon mass concentrations using a miniaturized aethalometer: Intercomparison with a continuous soot monitoring system (COSMOS) and a single-particle soot photometer (SP2). Aerosol Sci Technol. 2020; 54:1-24.
11. Miyazaki Y. Performance of a newly designed continuous soot monitoring system (COSMOS). J Environ Monitor. 2008;10:1195-201.
12. Muneer S, Kim TH, Choi BC, Lee BS, Lee JH. Effect of CO, NO_x and SO_2 on ROS production, photosynthesis and ascorbate–glutathione pathway to induce *Fragaria×annasa* as a hyperaccumulator. Redox Biol. 2014;2:91-8.
13. Ohata S. Estimates of mass absorption cross sections of black carbon for filter-based absorption photometers in the Arctic. Atm Measurement Tec. 2021;14:6723-48.
14. Yamaguchi M. Effects of long-term exposure to black carbon particles on growth and gas exchange rates of *Fagus crenata*, *Castanopsis sieboldii*, *Larix kaempferi* and *Cryptomeria japonica* seedlings. Asian J Atm Environ. 2012;6:259-67.

Статьи опубликованы на сайте журнала "Биосфера" корректировке, редактированию и верстке. В окончательном варианте возможны изменения. Стандартно № 1 Т. 16 2024 г. До