

Научная статья
УДК 581.132
doi:10.37614/2949-1185.2024.3.1.008

КОГЕРЕНТНАЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛИСТОПАДНЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ДЕРЕВЬЕВ

Петр Александрович Кашулин¹, Наталия Васильевна Калачева²

^{1, 2}Полярно-альпийский ботанический сад-институт имени Н. А. Аврорина Кольского научного центра Российской академии наук, Кировск, Россия

Аннотация

В вегетационных сезонах 2014–2020 гг. исследовали многодневную динамику фотосинтетической активности аборигенных экотипов Кольского Севера осины и березы повислой методами амплитудно-модулированной флуоресцентной спектроскопии хлорофилла *in situ*. Обнаружена временная корреляция многодневного паттерна флуоресценции хлорофилла между листовыми пластинками индивидуальных крон и кронами соседних деревьев. Похолодания и другие изменения условий среды способствовали переходу независимой динамики листьев в согласованный квазициклический режим с последующей синхронизацией, наибольший уровень которой был отмечен осенью 2014 г. Предполагается, что внутри- и межкروновая когерентность фотосинтетических функций способствует большей устойчивости индивидуальных растений или их популяций.

Ключевые слова:

биосферные изменения, лесообразующие деревья, фотосинтез, флуоресценция хлорофилла, синхронность, устойчивость

Для цитирования:

Кашулин П. А., Калачева Н. В. Когерентная фотосинтетическая активность листопадных лесообразующих деревьев // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2024. Т. 3, № 1. С. 63–70. doi:10.37614/2949-1185.2024.3.1.008.

Original article

COHERENT PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY BETWEEN DECIDUOUS ARBOREAL TREES

Piotr A. Kashulin¹, Natalia V. Kalacheva²

^{1, 2}Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Kirovsk, Russia

Abstract

The long-term time course of photosynthetic activity in arboreal trees of aspen *Populus tremula* L. and birch *Betula pendula* Roth species native for Kola Subarctic was observed through 2014–2017 yr vegetation seasons in terms of PAM (Pulse Amplitude Modulated) foliage chlorophyll fluorescence measurements *in situ*. The temporal pairwise correlation chlorophyll fluorescence pattern between any leaf blades couple for the whole any single crone as well as for proximate tree crones was found. The abrupt temperature drops and other environmental changes promote transition to blades coherence, the most synchronicity between trees was observed in 2014th fall. The global synchronization between any leaf couple was often preceded by transition of the foliar blades photosynthetic activity in common coherent quasi-cyclic rhythm. It is suggested that mutual crone's intra and inter temporal organization and cooperative assimilation promote resistance and optimal realization of adaptive species potential.

Keywords:

biosphere changes, arboreal trees, photosynthesis, chlorophyll fluorescence, synchronicity, resistance

For citation:

Kashulin P. A., Kalacheva N. V. Coherent photosynthetic activity between deciduous arboreal trees. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities*, 2024, Vol. 3, No. 1, pp. 63–70. doi:10.37614/2949-1185.2024.3.1.008.

Введение

Ускорившиеся глобальные биосферные изменения обусловлены современными климатическими трендами и оказывают влияние на существование лесных экосистем. Влияние взаимосвязано и взаимозависимо. Леса играют ключевую роль в углеродном балансе атмосферы, поддерживая общую устойчивость биосферы. Они подвержены влиянию меняющихся факторов среды, в котором обнаруживаются ненаблюдаемые ранее изменения динамики продуктивности и устойчивости. Недавно была найдена пространственная синхронность продуктивности и развития деревьев среди

протяженных лесных массивов Евро-Азиатского континента [1], которую объясняют климатическими изменениями. Приросты древесных колец древостоев на больших географических пространствах в разных биомах синхронны. Физиолого-биохимические изменения и необычные пространственно-временные паттерны физиологической активности, лесной продуктивности могут быть индикаторами изменений климата в субконтинентальных масштабах и предвестниками отдаленных неблагоприятных последствий. Для оценки климатических рисков необходимы регулярные мониторинговые измерения физиологического состояния и ассимиляционной активности лесообразующих видов. Для этих целей желательно применение достаточно чувствительной и неповреждающей техники наблюдения. Таким требованиям отвечают современные оптические методы наблюдения фотосинтетической активности хлорофиллсодержащих структур растений на базе импульсно-модулированной флуоресцентной спектроскопии [2; 3].

На основе флуоресцентных измерений фотосинтетических параметров индикаторных деревьев лесообразующих доминантов Кольского Севера нами обнаружены различные режимы ассимиляции в разные месяцы вегетационного сезона. Взаимно не зависящая, нерегулярная динамика фотосинтеза разных листьев кроны одного или нескольких соседних деревьев при резких изменениях внешней среды могла переходить во взаимосогласованный синхронный режим. Возможно, что глобальная синхронизация [4] фотосинтетических структур на уровне популяций связана с континентальной синхронностью древесных приростов. Целью данной работы было более подробное исследование феномена, обсуждение физиологических механизмов, лежащих в его основе, на примере небольшой группы соседних лесообразующих деревьев двух листопадных видов, произрастающих в лесопарковой зоне Кольской Субарктики.

Материалы и методы

Для мониторинга использовали индикаторные деревья аборигенных экотипов растений осины *Populus tremula* L. и березы *Betula pendula* Roth из лесопарковой зоны предгорной долины Хибин.

Физиологическую активность фотосинтетического аппарата (ФСА) листьев оценивали, измеряя их собственную или искусственно активированную светодиодами импульсно-модулированную флуоресценцию.

Анализировали ее долю $Y(II)$, контролируемую фотосистемой II (ФС II). $Y(II) = Fv'/Fm'$, где $Fv' = Fm' - Fo'$ — переменная, Fo' — минимальная, Fm' — максимальная флуоресценция в условиях активирующего освещения. $Y(II)$ отражает долю энергии возбужденных реакционных центров, расходуемую на фотохимическую конверсию, которая близка к среднему квантовому выходу фотосинтеза и зависит от световых условий. Использовали также нормированную переменную флуоресценцию Fv/Fm , когда переменную и максимальную эмиссии измеряли вечером после темновой адаптации [3].

Индекс $Fv/Fm = (Fm - Fo)/Fm$ — нормированная переменная флуоресценция, отражает долю энергии возбужденных реакционных центров, расходуемую на фотохимическую конверсию, она пропорциональна среднему квантовому выходу фотосинтеза, зависит от световых условий и физиологического состояния ФСА.

Измерения флуоресценции не менее пяти разных листьев кроны проводили ежедневно в вечернее время портативным флуориметром PAM-2100, WALZ, Effetrich, ФРГ, начиная с весны до осеннего листопада. В качестве источника активирующего света использовали светодиод, излучающий импульсы света $\lambda = 655$ нм, интенсивностью $3000 \text{ мкЕ/м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, длительностью 800 мс. Интенсивность измеряющего импульсного света частотой 0,6 или 20 кГц не превышала $5 \text{ мкЕ/м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Неинвазивность метода обеспечивала получение данных о текущем состоянии ФСА одних и тех же листовых пластинок *in situ* вплоть до их опадения. Параллельно измеряли освещенность, УФ-радиацию и температуру анализатором ТКА-ПКМ. Интенсивность потока фотонов ФАР (фотосинтетически активная радиация) и локальную температуру в непосредственной близости листовой пластинки измеряли микроквантовым сенсором листовой клипсы Leaf-Clip Holder 2030-B флуориметра PAM-2100.

Результаты и обсуждение

Регулярные измерения флуоресцентных параметров ассимиляционных органов индикаторных деревьев раскрывают качественную картину динамики их физиологической активности. Наблюдения проводили в 2014–2020 гг. В каждом отдельном сезоне ежедневно записывали флуоресценцию одних и тех же листовых пластинок, каждый год использовали те же фрагменты деревьев. Динамика фотосинтетической активности наблюдаемых деревьев зависела от метеоусловий, меняясь во время сезона. В результате измерений обнаружено значительное повышение среднего уровня F_o в начале и конце вегетации. Перед массовым листопадом для разных видов характерно кратковременное повышение среднего уровня F_o в 2–3 раза. За подъемом следовало резкое падение $Y(II)$, отношения F_v/F_m , темновой F_o и максимальной F_m флуоресценции. В течение сезона происходили качественные изменения характера многодневной динамики измеряемых величин: она могла меняться от спорадической и независимой у разных листьев до квазициклической. Во втором случае при устойчивой суточной и многодневной инфрадианной цикличности с периодами в несколько дней в некоторые месяцы наблюдали появление синхронных режимов фотосинтетической активности кроны. Параллельное сравнение серий многодневных измерений флуоресценции разных листьев показало, что в этом случае общий разброс значений F_v/F_m и F_m разных листьев снижается, временные паттерны временных серий измерений становятся качественно схожими, происходит пространственная синхронизация фотосинтетической активности кроны (рис. 1).

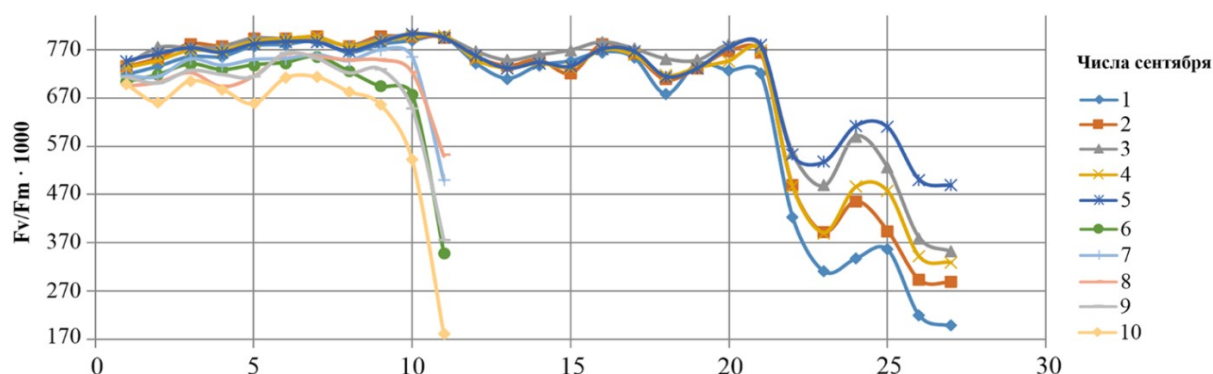


Рис. 1. Сравнительная динамика угасания фотоассимиляционной активности десяти листьев старовозрастного (1–5) и молодого (6–10) деревьев березы в сентябре 2014 г.

Степень синхронности фотосинтетической активности разных листьев оценивали по взаимной корреляции многодневных записей ее динамики. На матричном рис. 2 изображены распределения средних за месяц значений F_v/F_m пяти разных листьев осины и взаимные парные корреляции ежедневных измерений, характерные для августа. Дистанция между листьями варьировала в пределах 10–150 см, монотонно увеличиваясь с ростом пластохрона листа, от апекса ветки к ее основанию. Аналогичные зависимости получены и для максимальной флуоресценции хлорофилла листьев F_m .

Наиболее высокая степень синхронности фотосинтетической активности была отмечена в сентябре 2014 г., в год высокой солнечной активности. Непосредственно перед листопадом согласованную во времени динамику фотосинтеза наблюдали в пределах крон отдельных деревьев, между кронами деревьев одного или разных видов, растущих в пределах по меньшей мере 20 м одного от другого (рис. 3). Во втором случае расстояние между парами листьев варьировало в более широких пределах: от нескольких сантиметров до нескольких метров, дистанция между листьями, изображенными на рисунке, увеличивалась с их порядковым номером. Как видно на ячейках матричного рис. 2, в правом верхнем и нижнем левом углах, даже для наиболее удаленных пар листьев, пронумерованных у осины цифрами 1, 2, 3 и у березы — 4, 5 соответственно, согласованность динамики переменной флуоресценции

в сентябре была высока. В целом у этих и других изученных видов корреляционные связи фотосинтетической активности листы осенью были выше, чем летом. Наблюдаемые статистические связи выглядят как проявление «глобальной синхронизации», когда каждый отдельный элемент системы (в данном случае — листовая пластинка) синхронизируется с каждым другим [4].

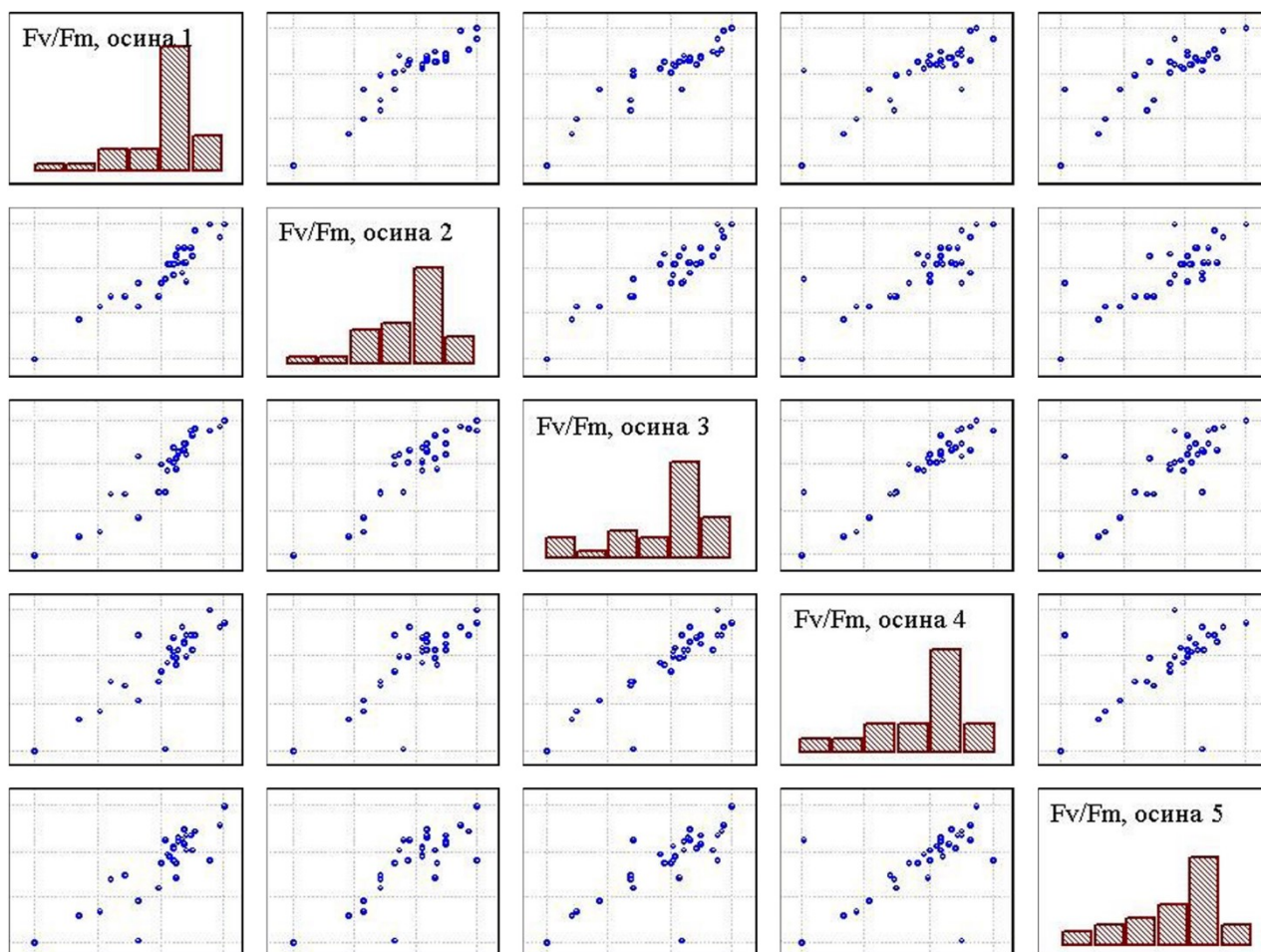


Рис. 2. Статистическая связь записи переменной флуоресценции пяти разных листьев кроны осины в августе. Показаны распределения средних значений флуоресценции листа и парные корреляции соответствующих временных рядов

В большинстве случаев переходу в синхронные режимы предшествовало появление устойчивой многодневной цикличности флуоресценции хлорофилла с дискретным набором основных частот и ростом амплитуды циклов, это заметно даже при качественной оценке паттерна динамики (см. рис. 1).

Для анализа ритмов, количественной оценки их робастности использовали частотные распределения спектральной мощности на основе Фурье-анализа временных серий. Для частотных спектров активности ФСА разных наблюдаемых видов характерны септанные (околонедельные) и семисептанные (полунедельные) ритмы. Происхождение таких ритмов в живых системах связывают с гелиогеофизическими факторами [5]. Частотные распределения спектров мощности флуоресценции листовых пластинок для серий измерений тех же деревьев представлены на рис. 4, видно, что околонедельные ритмы доминируют, а соответствующие максимумы частных распределений результатов для осины и березы совпадают.

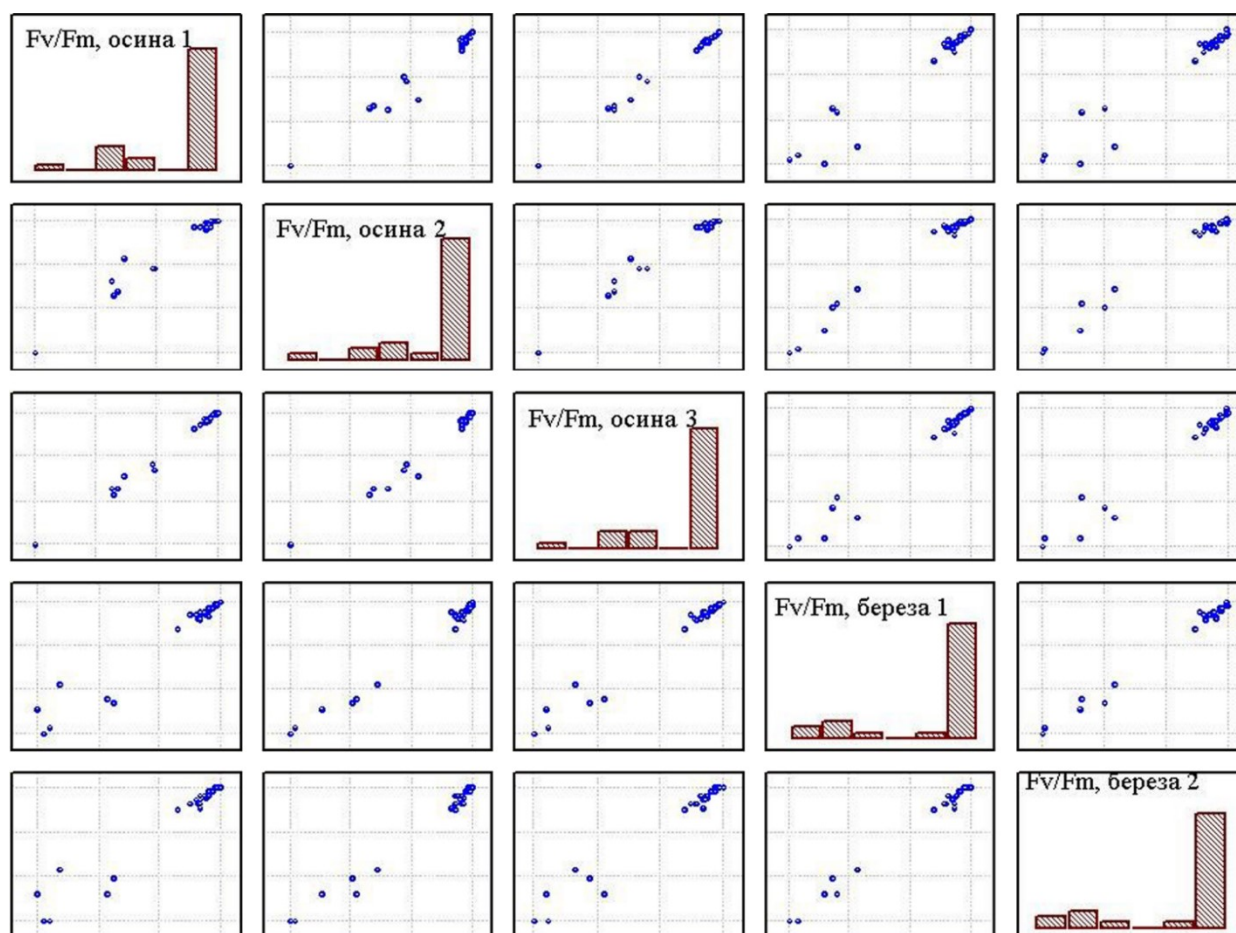


Рис. 3. Статистическая связь параметра Fv/Fm трех листьев осины и двух листьев березы в сентябре. На диагонали — распределения ежедневных значений

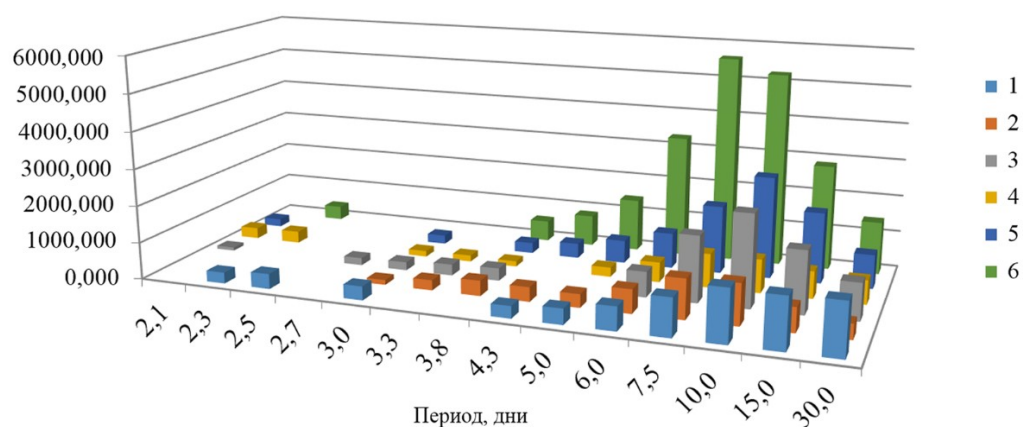


Рис. 4. Спектральная плотность десяти основных частот спектров мощности записи переменной флуоресценции трех листьев березы (1–3) и трех листьев осины (4–6)

Из теории нелинейных динамических систем следует, что цикличность и близость частот циклов могут способствовать их фазовой синхронизации [4; 6]. По нашим данным, совпадения или близость основных гармоник серий измерений имели место в сентябре 2014 г. и в другие годы наблюдений, например, в июне 2016-го. Аналогичные циклы в это время были зафиксированы и в спектрах мощности временных рядов измерений освещенности, солнечной УФ-радиации и температуры [7], которые непосредственно влияют на фотосинтез и ФСА. Синхронизирующая роль этих внешних факторов среды в настоящее время исследуется. Синхронизация плазмодия миксомицета *Physarum* гармонически изменяющимся градиентом температуры была обнаружена ранее [8]. В пользу участия внешнего затачика ритма в модуляции динамики фотосинтеза говорит совпадение или близость частот ритмов у ряда разных видов (черемуха, сирень венгерская, жимолость татарская, жимолость съедобная) в конце лета 2014 г. [7]. По мнению биоритмологов Центра хронобиологии Ф. Халберга, септаные (околонедельные) ритмы могут иметь и эндогенную природу, будучи «встроенными в геном» [9]. В то же время синхронизация может быть результатом спонтанной самоорганизации, слабо зависимой от внешних причин и природы синхронизирующего агента.

Зависимость взаимной лиственной корреляции фотосинтеза от интенсивности собственной эмиссии хлорофилла дает основание предполагать, что она может прямо или косвенно участвовать в синхронизации. В пользу этого говорит резкое усиление собственной темновой флуоресценции хлорофиллсодержащих структур растений разных видов в стрессовых условиях конца вегетативного сезона незадолго до массового листопада. Несколько меньшее усиление F_0 наблюдали в начале сезона вегетации, в мае и июне при пониженных температурах.

Излучаемая хлорофиллом эмиссия имеет большую длину волны, чем поглощаемая, и уже не может восприниматься «узкополосными» антенными комплексами ФСII, влияя на их флуоресценцию. Однако живые структуры растения способны излучать собственную сверхслабую и вторичную люминесценцию [10], индуцированную физическими агентами в широком диапазоне волн: от ближнего ультрафиолета до ИК-области. Излучение обусловлено делокализованным когерентным электромагнитным полем живых организмов и может выполнять регуляторные функции [11]. Его интенсивность зависит от температуры, спадает с расстоянием по гиперболическому закону и нелинейно, с экстремумом, зависит от плотности эмиттеров [12]. Исходя из этого, можно ожидать более высокую согласованную цикличность разных листовых пластинок старых деревьев с мощной кроной, что и наблюдали. У столетней березы наблюдали более отчетливую цикличность и синхронность, листья дольше удерживались осенью, чем у 20-летней. Причиной вторичного биогенного излучения могут быть и физические агенты космического происхождения [11], что согласуется с тем, что наиболее высокий уровень фотосинтетической синхронности нами был отмечен в 2014 г. — в период максимума солнечной активности.

Ассимиляционная цикличность может быть связана с активацией нефотохимических физиолого-биохимических путей утилизации поглощаемой световой энергии. Снижение переменной флуоресценции происходит при нефотохимическом тушении флуоресценции, отражаемом ростом индекса NPQ, и цикличность F_v/F_m может быть обусловлена чередованием активной ассимиляции с другими энергетически затратными процессами, например с метаболическим термогенезом. Ранее нами показано, что при внезапных осенних похолоданиях происходит скачок NPQ у листьев черемухи, сирени венгерской и жимолости татарской [13]. При изменении механизма дыхания может происходить периодический сброс протонного градиента внутренних мембран митохондрий без биохимического сопряжения, но с выделением тепла, способствуя холодоустойчивости растения и продлению сезона фотосинтеза. Одним из основных фотозащитных механизмов высших растений, влияющим на величину NPQ, является виолаксантиновый цикл, для которого необходим достаточный пул каротиноидов. В ходе циклического превращения виолаксантина в зеаксантин избыток поглощенной энергии в антенне ФСII диссипирует в тепло, приводя к нефотохимическому тушению флуоресценции хлорофилла [14]. Это позволяет замедлить резкие локальные падения температуры хлоропластов и сгладить неблагоприятные последствия холода.

Характер осеннего угасания фотосинтетической активности зависит от многих факторов, температуры, световых условий, собственной теплопродукции. Устойчивость к неблагоприятным условиям среды, эффективность ассимиляции, своевременная активация фотозащитных функций

хлоропластов и биохимических механизмов, ответственных за переход растения в состояние физиологического покоя, требуют пространственно-временной координации функций листьев и разных фрагментов кроны. Универсальным динамическим механизмом, обеспечивающим решение таких системных задач, являются биологические ритмы и синхронизация компонентов биологических систем, которые повышают устойчивость растений в экстремальных условиях.

Независимо от физиолого-биохимических причин роста собственной флуоресценции отдельных хлорофиллсодержащих структур, в экстремальных условиях происходит генерализованное усиление их дистанционного физического взаимодействия с возможным переходом в синхронный режим. В целом цикличность и синхронность повышают температурную и общую устойчивость растения, способствуют своевременной и более эффективной реализации адаптационного потенциала вида, помогая ему более или менее благополучно пережить резко меняющиеся экологические условия без привлечения дополнительных энергетических ресурсов и метаболических затрат.

Список источников

1. Shestakova T. A., Gutiérrez E., Kirdeyanov A. V., Camarero J. J., Génova M., Knorre A. A., Linares J. C., Resco de Dios V., Sánchez-Salguero R., Voltas J. Forests synchronize their growth in contrasting Eurasian regions in response to climate warming // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. 113 (3). P. 662–667.
2. Венедиктов П. С., Казимирко Ю. В., Кренделева Т. Е., Кукарских Г. П., Макарова В. В., Погосян С. И., Яковлева О. В. Изучение физиологического состояния древесных растений по характеристикам флуоресценции в коре однолетних побегов деревьев // *Экология*. 2000. № 5. С. 338–342.
3. Bolhar-Nordenkamp H. R., Long S. P., Baker N. R., Oquist G., Schreiber U., and Lachner E. G. 1989. Chlorophyll fluorescence as a probe for photosynthetic competence of leaves in the field: A review of current instrumentation. *Funct. Ecol.* Vol. 3. P. 497–514.
4. Пиковский А. С., Розенблум М. Г., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
5. Клейменова Н. Г., Троицкая В. А. Геомагнитные пульсации как один из экологических факторов среды // *Биофизика*. 1992. Т. 37, вып. 3. С. 567–572.
6. Björnstad O. N. Cycles and synchrony: Two “historical” experiments and one experience // *Journal of Animal Ecology*. 2000. Vol. 69. P. 869–873.
7. Кашулин П. А., Калачева Н. В. Цикличность фотосинтеза и геокосмические факторы // XIV Межд. научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки XXI века». М.: Cognitio, 2016. С. 14–19.
8. Колинко В. Г., Архангельская Т. А., Романовский Ю. М. Движение протоплазм плазмодия миксомицета *Physarum* в условиях меняющейся температуры // *Stud. Biophys.*, 1985. V. 106, № 3. P. 215–222.
9. Halberg F., Cornelissen G., Otsuka K., Katinas G., Schwartzkopf O. Physiological monitoring from bacteria and eukaryotic unicells to humans for chronoastrobiology and chronomedicine // *Proceedings of the 7th Annual meeting of Japanese Society for Chronobiology. The 1st Int. Symposium. Workshop on Chronoastrobiology and Chronotherapy, November 11th 2000. Kudan, Chiyodaku, Tokyo, 2000. P. 56–75.*
10. Тарусов Б. Н., Веселовский В. А. Сверхслабое свечение растений и их прикладное значение. МГУ, 1978. 151 с.
11. Кузин А. М. Роль природного радиоактивного фона и вторичного биогенного излучения в явлениях жизни. М.: Наука, 2002. 78 с.
12. Chang Jiin-Ju // *Indian Journal of Experimental Biology*. 2008. Vol. 46. No 5. P. 371–377.
13. Кашулин П. А., Калачева Н. В. Суточные ритмы фотосинтеза и устойчивость растений // *Вестник КНЦ РАН*. 2015. Т. 20, № 1. С. 85–92.
14. Demmig-Adams B. et al. *In vivo* functions of carotenoids in higher plants // *FASEB J.* 1996. V. 10. P. 403–412.

References

1. Shestakova T. A., Gutiérrez E., Kirdeyanov A. V., Camarero J. J., Génova M., Knorre A. A., Linares J. C., Resco de Dios V., Sánchez-Salguero R., Voltas J. Forests synchronize their growth in contrasting Eurasian regions in response to climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113 (3), pp. 662–667.
2. Venediktov P. S., Kazimirko YU. V., Krendeleva T. E., Kukarskih G. P., Makarova V. V., Pogosyan S. I., Yakovleva O. V. Izuchenie fiziologicheskogo sostoyaniya drevesnyh rastenij po harakteristikam fluorescencii v kore odnoletnih pobegov derev'ev. *Ekologiya*, 2000, no. 5, pp. 338–342. (In Russ.).
3. Bolhar-Nordenkamp H. R., Long S. P., Baker N. R., Oquist G., Schreiber U., and Lachner E. G. Chlorophyll fluorescence as a probe for photosynthetic competence of leaves in the field: A review of current instrumentation. *Funct. Ecol.*, 1989, Vol. 3, pp. 497–514.
4. Pikovskij A. S., Rozenblyum M. G., Kurts Yu. *Sinhronizatsiya. Fundamental'noe nelinejnoe yavlenie*. Moscow, Tekhnosfera, 2003, 496 p. (In Russ.).
5. Klejmenova N. G., Troickaya V. A. Geomagnitnye pul'sacii kak odin iz ekologicheskikh faktorov sredy. *Biofizika*, 1992, vol. 37, issue 3, pp. 567–572. (In Russ.).
6. Björnstad O. N. Cycles and synchrony: Two “historical” experiments and one experience. *Journal of Animal Ecology*, 2000, Vol. 69, pp. 869–873.
7. Kashulin P. A., Kalacheva N. V. Ciklichnost' fotosinteza i geokosmicheskie factory. *XIV Mezhd. nauchno-prakticheskaya konferenciya “Aktual'nye problemy nauki XXI veka”*. Moscow, Cognitio, 2016, pp. 14–19. (In Russ.).
8. Kolin'ko V. G., Arhangel'skaya T. A., Romanovskij Yu. M. Dvizhenie protoplazm plazmodiya miksomiceta Physarum v usloviyah menyayushcheysya temperatury. *Stud. Biophys.*, 1985, vol. 106, no. 3, pp. 215–222. (In Russ.).
9. Halberg F., Cornelissen G., Otsuka K., Katinas G., Schwartzkopf O. Physiological monitoring from bacteria and eukaryotic unicells to humans for chronoastrobiology and chronomedicine. *Proceedings of the 7th Annual meeting of Japanese Society for Chronobiology. The 1st Int. Symposium. Workshop on Chronoastrobiology and Chronotherapy*, November 11th 2000. Kudan, Chiyodaku, Tokyo, 2000, pp. 56–75.
10. Tarusov B. N., Veselovskij V. A. *Sverhslaboe svechenie rastenij i ih prikladnoe znachenie*. MGU, 1978, 151 p. (In Russ.).
11. Kuzin A. M. *Rol' prirodnogo radioaktivnogo fona i vtorichnogo biogennogo izlucheniya v yavleniyah zhizni*. Moscow, Nauka, 2002, 78 p. (In Russ.).
12. Chang Jiin-Ju. *Indian Journal of Experimental Biology*, 2008, Vol. 46, No 5, pp. 371–377.
13. Kashulin P. A., Kalacheva N. V. Sutochnye ritmy fotosinteza i ustojchivost' rastenij. *Vestnik KNC RAN*, 2015, vol. 20, no. 1, pp. 85–92. (In Russ.).
14. Demmig-Adams B. et al. In vivo functions of carotenoids in higher plants. *FASEB J.*, 1996, V. 10, pp. 403–412.

Информация об авторах

П. А. Кашулин — доктор биологических наук, главный научный сотрудник;

Н. В. Калачева — младший научный сотрудник.

Information about the authors

P. A. Kashulin — Dr. Sci. (Biological Sciences), Main Sci Researcher;

N. V. Kalacheva — Junior Researcher.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted 27.11.2023; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 05.12.2023.