XXIII Пущинские чтения по фотосинтезу и Всероссийская конференция с международным участием «Фотосинтез: современное понимание ключевого процесса биосферы»

Пущино, 16 – 21 июня 2025 г.

Программа конференции

Тезисы докладов

Пущино - 2025

«Фотосинтез: современное понимание ключевого процесса биосферы».
Сборник тезисов.
– Пущино, 2025. – 99 с.
ISBN: 978-5-6050635-2-0

Наши спонсоры и партнеры:

Основным направлением деятельности компании АЗИМУТ ФОТОНИКС является поставка оптоэлектронных компонентов ведущих мировых производителей на территории России, разработка новых проектов, а также техническая и информационная поддержка клиентов.

Автономная некоммерческая организация «Аналитика и Высокие Технологии» (АНО «АВТех») – инжиниринговая производственная компания, с опытом работы более 35 лет. Российский производитель лабораторного оборудования AWTech.

Компания Феномика специализируется на поставке высокотехнологичных решений для цифрового фенотипирования растений, спектрального анализа, технологий маркерной селекции, а также предлагает инженерные услуги полного цикла по проектированию и строительству теплиц и фитотронов
www.phenomics.ru

Поставляем современное оборудование, реагенты и расходные материалы. Обеспечиваем методическую поддержку в сфере геномики, протеомики, клеточных технологий, ветеринарии, агрогеномики, пищевой безопасности, клинической диагностики, биофармацевтики и криминалистики. Делаем возможной работу российских лабораторий на мировом уровне.

Компания ЛАБИНСТРУМЕНТЫ поставляет оборудование для ботаники и физиологии растений, для измерения газообмена растений и почв, для изучения фотосинтеза и измерения респирации, для карбоновых полигонов, для мониторинга параметров окружающей среды (атмосфера, почва, вода, освещенность) и многое другое!

«Август» – крупнейшая российская компания по производству средств защиты растений. Фирма сочетает высокотехнологичное производство с научными разработками, активно внедряя наукоёмкие решения. «Август» создал новый суперсовременный НИЦ, где продолжит масштабную исследовательскую деятельность для разработки инновационных средств защиты растений и развития биотехнологий.

Организационный комитет

Председатель**:** Борисова-Мубаракшина М.М., д.б.н.

Сопредседатель**:** Савченко Т.В., д.б.н.

Секретарь**:** Терентьев В.В., к.б.н.

Члены оргкомитета:

Козлов И.В.

Коровина Е.С.

Стерелюхина И.Г.

Хасимов М.Х.

Хоробрых А.А., к.б.н.

Жармухамедов С.К., к.б.н.

Тихонов К.Г., к.б.н.

Пиголев А.В., к.б.н.

Шитов А.В., к.б.н.

Смолова Т.Н.

Яныкин Д.В., к.б.н.

Дегтярев Е.А., асп.

Грязнова У.В., асп.

Программный комитет:

Цыганков А.А., д.б.н., председатель

Ашихмин А.А. к.б.н., сопредседатель

Члены программного комитета:

Аллахвердиев С.И., д.б.н., чл-корр. РАН

Борисова-Мубаракшина М.М., д.б.н.

Иванов Б.Н., д.б.н.

Лось Д.А., проф., д.б.н.

Мамедов М.Д., д.б.н.

Надточенко В.А., проф., д.х.н.

Рубин А.Б., академик РАН

Савченко Т.В., д.б.н.

Семенов А.Ю., проф., д.б.н.

Соловченко А.Е., проф., д.б.н.

Тихонов А.Н., проф., д.ф.-м.н.

Программа XXIII Пущинских чтений по фотосинтезу

16 июня, понедельник

10:00-15:00 Регистрация участников

15:00-15:15 Официальное открытие XXIII Пущинских чтений по фотосинтезу. Вступительное слово председателя программного комитета **Цыганкова Анатолия Анатольевича** и председателя организационного комитета **Борисовой-Мубаракшиной Марии Мансуровны.** Поздравление юбиляра д.б.н. **Ерохина Юрия Евдокимовича**, ученого, стоявшего у истоков Института фотосинтеза АН СССР и Пущинских чтений по фотосинтезу.

15:15-15:30 **Приветственная речь представителя администрации наукограда Большого Серпухова**

15:30-16:30 **Семенов Алексей Юрьевич** (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия) «Изучение светозависимого переноса зарядов в реакционных центрах фотосистемы 1 с использованием импульсной микросекундной абсорбционной спектрометрии и высокочастотной ЭПР-спектроскопии: памяти профессора Клауса Мебиуса»

16:30-17:30 **Савченко Татьяна Викторовна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) «Фотосинтез в нелистовых тканях: организация и функционирование фотосинтетического аппарата, биологическое значение»

17:30 **Музыкальное приветствие**

18:00 **Фотографирование участников конференции**

18:10-20:00 **Приветственный фуршет в ИФПБ**

Программа Всероссийской конференции с международным участием «Фотосинтез: современное понимание ключевого процесса биосферы»

17 июня, вторник

9:00-9:10 Открытие Всероссийской конференции с международным участием «Фотосинтез: современное понимание ключевого процесса биосферы»

Секция «Первичные процессы фотосинтеза и функционирование фотосинтетической электрон-транспортной цепи»

Председатели: Забелин А.А. и Хоробрых А.А.

9:15-9:55 **Черепанов Дмитрий Александрович** (ФИЦ ХФ РАН, Москва, Россия) Исследование первичных реакций разделения зарядов в фотосистеме II растений и цианобактерий методом широкополосной фемтосекундной лазерной спектроскопии (пленарный доклад)

9:55-10:10 Кофе-брейк

10:10-10:30 **Проскуряков Иван Игоревич** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Синглет-триплетное деление возбуждения каротиноидов LH1 и LH2 комплексов фототрофных бактерий

10:30-10:50 **Васильева Людмила Григорьевна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Подходы к повышению термостабильности мутантного фотосинтетического реакционного центра *Cereibacter sphaeroides*

10:50-11:10 **Неверов Константин Викторович** (Институт биохимии им. А. Н. Баха, Москва, Россия) Фотовосстановление цитохрома *c*, сенсибилизированное димерами хлорофилла в составе белков семейства WSCP

11:10-11:30 **Шитов Александр Васильевич** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Уникальная карбоангидразная активность Фотосистемы 2

11:30 -11:50 **Выступление спонсора: Ляхов Павел Николаевич** (компания «АВТех») Уникальные разработки КБ АВТЕХ. РФ

11:50-13:30 Обед

13:30-13:50 **Забелин Алексей Александрович** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Исследование фотоиндуцированного разделения зарядов в реакционном центре *Chloroflexus aurantiacus* при комнатной и криогенной температурах

13:50-14:10 **Христин Антон Михайлович** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Спектральные свойства возбужденного первичного донора электрона в реакционных центрах пурпурной бактерии *Rhodobacter sphaeroides* на фемтосекундной шкале времени

14:10-14:30 **Петрова Анастасия Александровна** (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия) Исследование взаимодействия фотосистемы 1 с экзогенными редокс-медиаторами: аскорбатом, 2,6-дихлорфенолиндофенолом и *N,N,N',N'*-тетраметил-*p*-фенилендиамином

14:30-14:50 **Яныкин Денис Валерьевич** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Влияние каротиноидного состава на стабильность и светоиндуцированное окислительное повреждение комплексов LH2, выделенных из *Ectothiorhodospira haloalkaliphila*

14:50-15:10 **Маркин Роман Валерьевич** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Изменение pH люмена тилакоидов на свету при увеличении концентрации бикарбоната в среде

15:10-15:30 Кофе-брейк

Секция «Метаболизм фотосинтезирующих организмов. Биоэнергетика фотосинтеза»

Председатель: Руденко Н.Н.

15:30-16:10 **Иванов Борис Николаевич** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Биоэнергетику хлоропластов контролируют карбоангидразы? (пленарный доклад)

16:10-16:30 **Волгушева Алёна Александровна** (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия) Фотообразование водорода микроводорослями *Chlorella sorokiniana* при кратковременном фотоингибировании

16:30-16:50 **Гречаник Вера Игоревна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Адаптация микроводорослей к недостатку элементов питания в аэробных и анаэробных условиях

17:00-17:40 Концерт музыки для гобоя и клавесина. Исполнители: **Анастасия Косарская и Мария Руднева**

18 июня, среда

Секция «Фотосинтез как фактор продуктивности сельскохозяйственных растений»

Председатель: Козулева М.А.

09:30-9:50 **Кособрюхов Анатолий Александрович** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Реакция фотосинтетического аппарата растений пшеницы на изменение соотношения КС/ДКС в спектре облучения растений

9:50-10:10 **Иванов Анатолий Алексеевич** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Влияние света с разным соотношением КС/ДКС на фотосинтетические и ростовые параметры салата и его устойчивость к свету высокой интенсивности

10:10-10:30 **Чуракова Светлана Алексеевна** (ФАНЦ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, Киров, Россия) Изменения работы фотосистемы II злаковых культур в зависимости от фазы развития

10:30-10:50 **Степанова Наталия Вячеславовна** (Институт биоинженерии им. К.Г. Скрябина ФГУ ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Россия) Выявление механизмов влияния зеленого света на эффективность эмбрионального фотосинтеза растений гороха (*Pisum sativum* L.)

10:50-11:05 Кофе-брейк

11:05-11:25 **Выступление спонсора: компания «Феномика»**

11:30-12:00 **Мастер-класс от компании «Феномика»**

12:00-14:00 Обед

Секция «Компьютерное моделирование и биоинформатика в исследованиях фотоавтотрофов»

Председатель: Васильева Л.Г.

14:00-14:40 **Асташев Максим Евгеньевич** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия) Исследование нелинейной реакции хлорофилла на периодическое световое воздействие при вызванном засухой стрессе (пленарный доклад)

14:40-15:00 **Сухов Владимир Сергеевич** (Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия) Разработка комбинированной модели оптических свойств и фотосинтеза в листе двудольных растений

15:00-15:20 **Курков Василий Андреевич** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия) Классификация биологических пигментов путем моделирования их оптических свойств с использованием методов эволюционной оптимизации.

15:20-15:40 **Чесалин Денис Дмитриевич** (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия) Многопараметрическое моделирование спектров поглощения каротиноидов

15:40-15:55 Кофе-брейк

16:00-18:30 **Стендовая сессия**

19 июня, четверг

Секция «Механизмы, обеспечивающие скоординированную регуляцию фотосинтеза и процессов роста, развития и адаптации растений к условиям окружающей среды»

Председатели: Шитов А.В., Тихонов К.Г. и Ашихмин А.А.

09:00-9:40 **Борисова-Мубаракшина Мария Мансуровна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Пул пластохинона и активные формы кислорода – важнейшие участники регуляции фотосинтетической активности высших растений (пленарный доклад)

9:40 -9:55 Кофе-брейк

9:55-10:15 **Лысенко Евгений Анатольевич** (Институт физиологии растений РАН, Москва, Россия) Умеют ли растения выводить кадмий из хлоропластов?

10:15-10:35 **Пашковский Павел Павлович** (Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия) Роль фитохромов в регуляции метаболизма плодового и ультраструктуры хлоропластов в листьях томата при различных соотношениях красного и дальнекрасного света

10:35-10:55 **Часов Андрей Васильевич** (Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия) Фотосинтетическая активность как маркер физиологического состояния Bryobiotina в стрессовых условиях

10:55-11:15 **Руденко Наталья Николаевна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Влияние выключения синтеза карбоангидраз стромы хлоропластов αCA1 и βCA1 на фотосинтез в растениях *Arabidopsis thaliana*

11:15 -11:35 **Строкина Валерия Владимировна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Роль фоторецепторов в ответных реакциях фотосинтетического аппарата при действии света высокой интенсивности

11:35-12:00 **Выступление спонсора: компания «Азимут Фотоникс»**

12:00-13:00 Обед

13:00-14:00 **Мастер-класс от компании «Азимут Фотоникс»**

14:00-14:20 **Юдина Любовь Михайловна** (ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия) Распространяющиеся низкоамплитудные электрические сигналы и их роль в регуляции фотосинтеза и устойчивости пшеницы к почвенной засухе

14:20-14:40 **Новичонок Елена Валентиновна** (Институт леса КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия) Изменение первичных процессов фотосинтеза у подроста ели после лесохозяйственных мероприятий и их связь с продуктивностью растений

14:40-15:00 **Надеева Елена Михайловна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Фотосинтез и заморозки: роль стромальной α-карбоангидразы 1 в адаптации *Arabidopsis thaliana* к пониженной температуре

15:00-15:15 Кофе-брейк

15:15-15:35 **Ветошкина Дарья Васильевна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) State transitions: функция при действии абиотических стрессовых факторов

15:35-15:55 **Козулева Марина Алексеевна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Роль АТФ в защите фотосистемы I от фотоингибирования

15:55-16:15 **Вильянен Дарья Валентиновна** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) DNP-INT и DBMIB как pH-чувствительные зонды для исследования цитохромного b_6f комплекса

16:15-16:35 **Николаев Анатолий Андреевич** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Роль сериновой протеазы в ретроградном механизме уменьшения размера антенны фотосистемы 2 в условиях избытка света у высших растений

17:00 **Автобусная экскурсия по городу Серпухов** (бесплатно)

20 июня, пятница

Секции «Новые подходы в изучении фотосинтеза» и «Вопросы эволюции фотосинтетических систем и фотосинтезирующих организмов»

Председатель: Савченко Т.В.

09:15-9:55 **Фролов Андрей Александрович** (Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия) Метаболомика и протеомика как инструменты современных физиологических исследований (пленарный доклад)

9:55-10:35 **Мирошниченко Дмитрий Николаевич** (ФИБХ РАН, Пущино, Россия) Современные методы и подходы генетической инженерии растений (пленарный доклад)

10:35-10:40 Кофе-брейк

10:40-11:00 **Стадничук Игорь Николаевич** (Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия) Оранжевый каротиноидный белок как следовый маркер эволюционного родства пластид и цианобактерий

11:00-11:20 **Обухов Юрий Николаевич** (Институт биохимии им. А. Н. Баха, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия) Исследование динамики возбужденных состояний хлорофилла в водорастворимом белке BoWSCP методом фемтосекундной спектроскопии

11:20-11:40 **Золин Юрий Александрович (**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия) Использование RGB индексов для оценки состояния растений в условиях почвенной засухи и засоления на примере пшеницы

11:50-13:30 Обед

Секция «Экологические аспекты фотосинтеза. Фотосинтез как фактор формирования биосферы»

Председатель: Пиголев А.В.

13:30-14:10 **Антал Тарас Корнелиевич** (Псковский государственный университет, Псков, Россия) Анализ кинетических кривых световой индукции (OJIP кривых) фотосинтетически активного фитопланктона (пленарный доклад)

14:10-14:30 **Хрущев Сергей Сергеевич (**МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия) Применение комплекса математических методов для оценки состояния фотосистемы II водорослей *Chlorella vulgaris* в условиях стресса

14:30-14:50 **Булаткин Геннадий Александрович** (ИФПБ РАН, Пущино, Россия) Новая методика оценки влияния агроэкосистем на содержание CO_2 в атмосфере Земли

14:50-15:30 **Красновский Александр Александрович** (Институт биохимии им. А.Н. Баха РАН, Москва Россия) Свет и хлорофилл: важнейшие вехи в истории ранних исследований **(**пленарный доклад)

15:30 **Завершение научной работы конференции, подведение итогов конкурса молодых учёных**

17:00-21:00 **Банкет на открытом воздухе на территории ИФПБ РАН** (платный - 500 рублей)

21 июня, суббота

Экскурсионная программа (за отдельную плату), включающая обзорную экскурсию по Туле с посещением исторического центра города и культурно-выставочного комплекса «Л. Н. Т.», переезд в Ясную Поляну, обед в ресторане «Дворянская Усадьба», экскурсию по музею-усадьбе Л. Н. Толстого с прогулкой по заповеднику и посещением Дома писателя. Отъезд в 8:00 от Института фундаментальных проблем биологии.

Стендовая сессия

Андрюшаев Л.Е., Золин Ю.А., Гребнева К.В., Попова А.Ю., Сухов В.С., Сухова Е.М. Использование неоднородности RGB индекса на основе синего и зеленого каналов для оценки характеристик фотосинтеза при действии стрессоров на примере гороха посевного

Билова Т.Е. Маргарит А.А., Фролова Н.В., Орлова А.А., Соболева А.В., Мурашко Е.А. Силинская С.А., Зубова М.Ю., Аксенова М.А., Жихрева А.В., Алхаже К., Черевацкая М.А., Фролов А.А. Комбинированная стратегия анализа метаболомов растений и других фотосинтетических организмов

Волошин Р.А., Жармухамедов С.К., Аллахвердиев С.И. Биогибридный солнечный элемент с закрепленными на пористом слое TiO_2 тилакоидными мембранами

Гончарова М.А., Заднепровская Е.В., Волошин Р.А., Габриелян Д.А., Лобус Н.В., Аллахвердиев С.И. Сравнение фотосинтетического и биохимического профиля зеленой микроводоросли *Desmodesmus armatus* ARC06 выращиваемой на различных вариантах аэрации

Гурина А.К., Лукашева Е.М., Горбач Д.П., Данько К.В., Бондаренко П.М., Янчик Д.А., Малыгин К.П., Шумилина Ю.С., Фролова Н.В., Леонова Т.С., Фролов А.А. Протеомика как методологическая платформа современной физиологии растений

Климова А.В., Галибина Н.А., Новичонок Е.В., Никерова К.М., Софронова И.Н. Некоторые биохимические аспекты адаптации при изменении первичных процессов фотосинтеза у подроста ели европейской в ответ на лесохозяйственные мероприятия

Лукашева Е. М., Соловьева М. А., Горбач Д. П., Соболева А. В., Фролов А. А. Bottom-up протеомный подход при изучении гликирования белков хлоропластов

Орлова А.А., Соболева А.В., Силинская С.А., Цветкова Е.В., Мешалкина Д.А., Жихрева А.В., Мурашко Е.А., Алхаже К., Лихачева О.В., Редина В.В., Трофимов И.А., Бугеро Н.В., Фролов А.А. Методологическая платформа фитохимического анализа: от поиска новых биологически активных веществ к перспективным фармацевтическим и нутрицевтическим препаратам

Попова А.Ю., Сухова Е.М., Сухов В.С., Юдина Л.М. Влияние электрических сигналов на фотосинтетические параметры и устойчивость пшеницы к засухе при предварительной обработке абсцизовой кислотой

Саввина Н.А., Лысенко Е.А. Влияние теплового шока на редактирование хлоропластной мРНК ndhB

Семенова Н.А., Захаров Д.А., Степанова Е.В., Саримова С.Р. Улучшение вкусовых и ароматических характеристик базилика душистого (*Ocimum basilicum* L.) с использованием наночастиц оксида магния

Стародубов А.С., Большаков М.А., Ашихмин А.А., Яныкин Д.В. Участие каротиноидов в образовании липофильных и гидрофильных органических гидропероксидов и их взаимодействие с белками светособирающих комплексов LH 2 пурпурной серной бактерии *Ectothiorhodospira haloalkaliphila*

Тихонов К.Г., Савченко Т.В. Особенности переменной флуоресценции хлорофилла в коре клёна ясенелистного

Хоробрых А.А., Дегтярёв Е.А., Пиголев А.В., Мирошниченко Д.Н., Долгов С.В., Савченко Т.В. Отрицательная роль жасмоновой кислоты в устойчивости пшеницы к избыточному свету

Хоробрых С.А., Iijima Y., Shibata D., Mano J. Состав оксилипиновых карбонилов в различных компартментах хлоропласта

Христин М.С., Смолова Т.Н., Хоробрых А.А. Восстановление и взаимодействие митохондриального цитохрома с-550 с облученными УФ светом препаратами марганец стабилизирующего белка PsbO и мембранами ФС2

Шелепова О.В., Баранова Е.Н., Судариков К.А., Савостьянова Л.И., Митрофанова И.В Параметры фотосинтетической активности в качестве маркеров биотического стресса *Chrysanthemum coreanum* (H. Levl. et Vaniot) Nakai ex T. Mori

Изучение светозависимого переноса зарядов в реакционных центрах фотосистемы 1 с использованием импульсной микросекундной абсорбционной спектрометрии и высокочастотной ЭПР-спектроскопии: памяти профессора Клауса Мебиуса

Семёнов А.Ю.

НИИ физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского Московского государственного университета
e-mail: semenov@belozersky.msu.ru

Выдающийся физико-химик и биофизик Клаус Мёбиус был пионером разработки и применения методов высокочастотной ЭПР-спектроскопии в исследовании фотосинтеза для изучения кинетики переноса электрона и определения расстояния между центрами спиновой плотности ион-радикальных пар, образующихся в фотосинтетических реакционных центрах. Под его руководством была создана уникальная установка, позволяющая регистрировать кинетику восстановления окисленного лазерной вспышкой димера хлорофилла P_{700}^{+}, а также окисления фотовосстановленного филлосемихинон-аниона A_1^{-} в комплексах фотосистемы 1 (ФС 1) из цианобактерий, а также с высокой точностью определять расстояние между P_{700}^{+} и A_1^{-} на основе измерения частоты модуляции спада сигнала электронного спинового эха (ESEEM). С помощью этой установки удалось продемонстрировать, что перенос электронов в комплексах ФС 1 происходит преимущественно по ветви редокс-кофакторов *A*. С помощью импульсной абсорбционной спектрометрии и высокочастотной ЭПР-спектроскопии нами совместно с группами К. Мебиуса (Берлин) и Дж. Вентуроли (Болонья) было показано, что природный биопротектор – дисахарид трегалоза существенно влияет на кинетику переноса электрона в комплексах ФС 1. Высушивание в стекловидной трегалозной матрице при комнатной температуре приводило к существенному замедлению кинетики прямого переноса электрона вследствие ограничения конформационной подвижности белка подобно тому, как это происходит при криогенных температурах. Пигмент-белковый комплекс ФС 1 в высушенной трегалозной матрице переходил в состояние обратимого ангидробиоза и мог длительно храниться при комнатной температуре, полностью восстанавливая функциональную активность при последующей гидратации.

Полученные результаты имеют принципиально важное значение для выяснения молекулярного механизма переноса электрона в фотосинтетических реакционных центрах и влиянии на него сети водородных связей и конформационной подвижности белка.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-74-00025

Фотосинтез в нелистовых тканях: организация и функционирование фотосинтетического аппарата, биологическое значение

Савченко Т.В.

Пущинский научный центр биологических исследований, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Московская область, Россия
e-mail: savchenko_t@rambler.ru

У наземных растений лист является основным фотосинтезирующим органом, однако хлоренхимные ткани могут присутствовать и в других органах растений, включая стебли, части цветков, плоды, семена, и даже корни. В хлоропластах этих тканей протекают световые реакции фотосинтеза и происходят метаболические превращения углерода, в том числе осуществляется ассимиляция углекислого газа. Множество фактов свидетельствует о том, что нелистовой фотосинтез играет важную роль в продуктивности растений и устойчивости к стрессам. К сожалению, до настоящего времени ряд ключевых вопросов, касающихся фотосинтеза в нелистовых органах, таких как особенности структурной организации фотосинтетического аппарата, его устойчивость или восприимчивость к различным факторам окружающей среды, остаются малоизученными, ничего не известно о механизмах, регулирующих активность нелистового фотосинтеза. Важно отметить, что прошедшие несколько лет характеризуются значительным ростом интереса к данным вопросам. Представляемая лекция обобщает и систематизирует современные литературные данные и результаты собственных исследований лаборатории по нелистовому фотосинтезу, касаясь эволюционного происхождения нелистового фотосинтеза, его биологических функций и экологической роли, особенностей организации и функционирования фотосинтетического аппарата в нелистовых органах. Будут рассмотрены метаболические пути превращения углерода в нелистовых хлоренхимных тканях, а также затронуты вопросы, связанные с необходимостью выработки новых методических подходов для адекватной оценки активности фотосинтетических процессов в нелистовых тканях.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 24-16-00142

Всероссийская конференция с международным участием «Фотосинтез: современное понимание ключевого процесса биосферы»

Секция 1

Первичные процессы фотосинтеза и функционирование фотосинтетической электрон-транспортной цепи

Секция 2

Метаболизм фотосинтезирующих организмов. Биоэнергетика фотосинтеза

Секция 3

Механизмы, обеспечивающие скоординированную регуляцию фотосинтеза

и процессов роста, развития и адаптации растений к условиям окружающей среды

Секция 4

Фотосинтез как фактор продуктивности сельскохозяйственных растений

Секция 5

Компьютерное моделирование и биоинформатика в исследованиях фотоавтотрофов

Секция 6

Искусственный фотосинтез. Синтетическая биология

Секция 7

Экологические аспекты фотосинтеза. Фотосинтез как фактор формирования биосферы

Секция 8

Вопросы эволюции фотосинтетических систем и фотосинтезирующих организмов

Секция 9

Новые подходы в изучении фотосинтеза

Влияние грамицидина и СССР на световую кривую реакции Хилла у изолированных хлоропластов гороха

Бородин В.Б.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Федеральный исследовательский центр "Пущинский научный центр биологических исследований РАН", Пущино, Россия
e-mail: borodin_ibbp@mail.ru

Изучено влияние СССР (карбонилцианид м-хлорфенилгидразон, соединение, обладающее одновременно свойствами протонофора и ADRY-реагента) и ионофора грамицидина на световую кривую реакции Хилла у изолированных хлоропластов гороха. Изучение было проведено в условиях повышенной, замедляющей электронный транспорт, кислотности среды внутри тилакоидов. Показано, что соотношение между положительным протонофорным действием и отрицательным ADRY-действием СССР на реакцию Хилла изменяется в зависимости от условий измерений (концентрация СССР, степень освещенности хлоропластов). Отрицательное и положительное действия СССР на реакцию Хилла были наиболее сильными соответственно на начальном участке и на плато световой кривой реакции Хилла. Влияние грамицидина на реакцию Хилла также зависело от интенсивности падающего на хлоропласты света. Оно начинало проявляться главным образом при интенсивностях света выше 5 Вт/м^2 и усиливалось по мере увеличения освещенности хлоропластов. Результаты, полученные в присутствии и в отсутствие грамицидина, показали, что восходящий участок световой кривой реакции Хилла при повышенной кислотности среды внутри тилакоидов не является линейным, как это предполагают классические представления о фотосинтезе, а скорее имеет дугообразный вид. Результаты исследования рассмотрены с точки зрения влияния СССР и грамицидина на pH среды внутри тилакоидов и последующего влияния внутритилакоидного pH на электронный транспорт в зависимости от интенсивности света. Дана оценка значимости вывода о дугообразности восходящего участка световой кривой реакции Хилла при повышенной кислотности внутри тилакоидов для фотосинтетических исследований *in vivo*.

Обработка высокими температурами и гидроксиламином вызывает сходные изменения в форме OJIP кривых

Волошин Р.А.[1*], Юсупов Д.А.[2], Жармухамедов С.К.[3], Аллахвердиев С.И.[1,3]
[1]Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, г. Москва, Россия
[2]Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, г. Рязань, Рязанская область, Россия
[3]Институт фундаментальных проблем биологии ФИЦ ПНЦБИ РАН, г. Пущино, Московская область, Россия.
*e-mail: voloshinr@ifr.moscow

OJIP тест – широко распространенный метод анализа первичных фотосинтетических реакций. Он обладает высокой чувствительностью, однако интерпретация результатов часто вызывает определенные трудности. Так, например, различные факторы, повреждающие кислород-выделяющий комплекс (КВК) приводят к различным изменениям в форме OJIP. В наших экспериментах и в работе Булычева наблюдалось относительное возрастание J-пика, за которым следовал спад сигнала флуоресценции [1,2]. В то же время в работах Strasser и Brestic наблюдалось появление более раннего пика K [3,4].

В данной работе мы определяем как ряд факторов повреждающих КВК (высокие температуры, инкубация с гидроксиламином) влияет на индукционную кривую флуоресценции тилакоидных мембран. Оценка фотосинтетической активности проводилась с помощью ячейки Кларка (оценка кислород-выделяющей активности) и в биогибридной электрохимической ячейке (оценка электрогенной активности).

Нами показано, что обработка тилакоидов гидроксиламином (20мМ, около 30 минут) и температурная обработка (50 ℃, около 1 часа) приводят к схожим изменениям в форме OJIP кривой: падение сигнала после J-пика и отсутствие J-P стадии роста.

Характерный спад сигнала после J-пика появляется только после 2 часов инкубации при 45 ℃ и после 30 минут инкубации при 50 ℃. Кривые флуоресценции после двухчасовой обработки при 45 ℃ и после тридцатиминутной инкубации при 50 ℃ имеют идентичную форму. То есть повышение температуры на 5 градусов равносильно увеличению длительности инкубации в 4 раза. Параметр Fv/Fm более стабилен к высоким температурам и гидроксиламину чем параметр Fv/Fo. Тилакоидные мембраны, прошедшие длительную температурную обработку или обработку гидроксиламином не были способны генерировать ток в фотоэлектрохимической ячейке.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-14-00033

[1]. R. Voloshin, M. Goncharova, S.K. Zharmukhamedov, B.D. Bruce, S.I. Allakhverdiev, In vitro photocurrents from spinach thylakoids following Mn depletion and Mn-cluster reconstitution, Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg. 1866 (2025) 149523. doi:10.1016/j.bbabio.2024.149523.
[2]. A.A. Bulychev, W.J. Vredenberg, Modulation of photosystem II chlorophyll fluorescence by electrogenic events generated by photosystem I, Bioelectrochemistry. 54 (2001) 157–168. doi:10.1016/S1567-5394(01)00124-4.
[3]. M. Brestic, M. Zivcak, PSII Fluorescence Techniques for Measurement of Drought and High Temperature Stress Signal in Crop Plants: Protocols and Applications, in: Mol. Stress Physiol. Plants, Springer India, India, 2013: pp. 87–131. doi:10.1007/978-81-322-0807-5_4.
[4]. B.J. Strasser, Donor side capacity of Photosystem II probed by chlorophyll a fluorescence transients, Photosynth. Res. 52 (1997) 147–155. doi:10.1023/A:1005896029778.

Исследование фотоиндуцированного разделения зарядов в реакционном центре *Chloroflexus aurantiacus* при комнатной и криогенной температурах

Забелин А.А.*, Ковалев В.Б., Христин А.М., Хатыпов Р.А., Шкуропатов А.Я.
ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино, Московская обл.
*e-mail: zabelin.bio@gmail.com

В докладе обсуждаются результаты исследования первичной фотохимии в реакционных центрах (РЦ) нитчатой аноксигенной фотосинтезирующей бактерии *Chloroflexus (Cfl.) aurantiacus*, полученные с применением фемтосекундной абсорбционной дифференциальной спектроскопии и глобального анализа данных в сочетании с химической модификацией состава хромофоров РЦ. Показано, что высокоэффективное первичное разделение зарядов между возбужденным первичным донором электрона (P^*) и фотоактивным бактериофеофитином *a* (H_A) в РЦ *Cfl. aurantiacus* может осуществляться через альтернативные пути переноса электрона как при комнатной (295 K) [1], так и при криогенной (100 K) [2] температурах. Доминирующим (вклад 65-70%) является безактивационный двухстадийный пикосекундный процесс $P^* \rightarrow P^+B_A^- \rightarrow P^+H_A^-$, протекающий с участием короткоживущего промежуточного состояния $P^+B_A^-$ в качестве реального химического интермедиата (B_A – мономерная молекула бактериохлорофилла в активной по переносу электрона А-ветви кофакторов) и с инвертированной кинетикой для двух стадий электронного переноса [$P^+B_A^-$ распадается до $P^+H_A^-$ быстрее (временная константа 0.5 пс при 295 K и 0.18 пс при 100 K), чем образуется из P^* (временные константы 4 пс и 1.7 пс соответственно)]. Значительный вклад (30-35%) вносит также несколько более медленный одностадийный перенос электрона $P^* \rightarrow P^+H_A^-$ (константа времени 13 пс при 295 K и 20 пс при 100 K) с $P^+B_A^-$ играющим роль виртуального интермедиата по механизму суперобмена. Измерения на феофитин *a*-модифицированных РЦ, в которых энергетика разделения зарядов была изменена путем химического замещения молекулы бактериофеофитина H_A молекулой феофитина *a* [3], позволяют предполагать, что образование состояния $P^+H_A^-$ при физиологических температурах может дополнительно реализовываться посредством термически активируемого двухстадийного переноса электрона. Результаты работы сравниваются с данными, известными для РЦ эволюционно отдаленных аноксигенных пурпурных бактерий, и анализируются с точки зрения выявления универсальных особенностей энергетики, динамики и механизма первичного преобразования световой энергии в бактериальном фотосинтезе.

Работа выполнена за счёт средств госзадания № 1024031400173-8-1.6.4;1.6.7.

[1]. Zabelin A. et al. (2025) Photosynth. Res., 163, 2.
[2]. Zabelin A. et al. (2023) BBA-Bioenergetics, 148976.
[3]. Zabelin A. et al. (2021) Photosynth. Res., 149, 313–328.

Первичные световые реакции фотосинтеза и продуктивность растений тритикале

Косогова Т.М.
ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», Луганск, Россия
*e-mail: inbotanlit87@list.ru

К неблагоприятным факторам, вызывающим значительное снижение продуктивности сельскохозяйственных культур, относится повышенная температура в комплексе с повышенной относительной влажностью. Прорастание семян контролируется фитогормонами, которые способствуют повышению устойчивости растений, растительных клеток, органелл к экстремальным условиям среды. Так, 6–бензиламинопурин (БАП) стимулирует формирование гран и ламел стромы хлоропластов, то есть структур, в которых протекают световые реакции фотосинтеза [4].

Цель – моделировать первичные световые реакции фотосинтеза, изучить возможность повышения с помощью БАП активности хлоропластов и продуктивности растений тритикале, выращенных из зерновок со сниженными посевными качествами.

Объектом исследования был пшенично-ржаной амфидиплоид тритикале (сорт АД–206). Для изучения причин снижения всхожести зерновок тритикале под действием высокой температуры (40 °С) и относительной влажности воздуха (100 %) использовали метод, описанный нами ранее [3].

Интенсивность фотосинтетического фосфорилирования (ФФ) и фотохимическую активность хлоропластов (ФХА) определяли методом, описанным Гавриленко с соавторами [2], в присутствии кофакторов – феназинметасульфата и $[K_3Fe(CN)_6]$. Содержание фосфора неорганического определяли по методу Чена с соавторами [6], хлорофилла в суспензии хлоропластов – по методу Арнона [5].

Известно, продуктивность растений зависит от интенсивности фотосинтетических реакций [1, 2]. Это и обусловило необходимость определения влияния неблагоприятных условий на интенсивность ФФ и ФХА изолированных хлоропластов, выделенных из флагового листа растений тритикале, в фазу появления колоса. На основании полученных данных можно сформулировать вывод, в хлоропластах, изолированных из флагового листа растений тритикале в фазу появления колоса, выращенных из семян со сниженными посевными качествами и обработанных БАП, повышается скорость потока электронов и интенсивность реакций циклического и нециклического фотосинтетического фосфорилирования. Можно допустить, обработка таких зерновок регуляторами роста способствует стимуляции энергетического и восстановительного потенциала хлоропластов, а это может обусловить большую эффективность ассимиляции CO_2 и синтеза органических веществ.

Таким образом, с помощью БАП можно повысить продуктивность растений, выращенных из семян со сниженными посевными качествами.

[1]. Володарский Н.И., Быстрых Е.Е. (1983). Активность первичных реакций фотосинтеза как показатель уровня продуктивности растений**.** Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и водного режима в полевых условиях. Иркутск, 167 с.
[2]. Гавриленко В.Ф., Ладыгина М.Е., Хандобина Л.М. (1975). Большой практикум по физиологии растений. М.: Высшая школа, 392 с.
[3]. Косогова Т.М. и др. (1985). Влияние ускоренного старения семян тритикале на всхожесть, темпы роста проростков и функциональную активность хлоропластов. Доклады высшей школы. Биологические науки, № 8. 73–77.
[4]. Кулаева О.Н. (1982). Гормональная регуляция физиологических процессов у растений на уровне синтеза РНК и белка. М.: Наука, 82 с.
[5]. Arnon D. (1949). Copper enzimes in isolated chloroplasts: polyphenol-oxydase in Beta vulgaris. Plant Physiol. ,24, N1, 3.
[6]. Chen P., Toribara T., Warner H. **(**1956**).** Microdetermination of phosphorus. Anal. Chem., 28 (N.11), 1756.

Изменение pH люмена тилакоидов на свету при увеличении концентрации бикарбоната в среде

Маркин Р.В.*, Иванов Б.Н., Козулева М.А.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН - обособленное подразделение ФИЦ Пущинский научный центр биологических исследований РАН, Пущино, Россия
*e-mail: romanmarkin998@gmail.com

Возникающий в ходе фотосинтетического электронного транспорта градиент pH на мембране тилакоидов необходим для синтеза АТФ и запуска ряда процессов регуляции фотосинтеза. Выдвигалось предположение [1], что тилакоидные и люменальные карбоангидразы (КА) – ферменты, катализирующие взаимоконверсию CO_2 и бикарбоната, – могут оказывать влияние на pH люмена.

В работе изучали влияние увеличения концентрации бикарбоната в суспензии тилакоидов гороха посевного (*Pisum sativum*) с 0.4 до 10.4 мМ на градиент pH на тилакоидной мембране, а также на зависящие от величины pH люмена процессы, которые можно использовать для косвенной оценки величины pH люмена. Возможное участие КА мембраны и люмена тилакоидов оценивали при помощи сульфонамидных ингибиторов КА: мафенида и этоксизоламида.

Добавка бикарбоната в суспензию тилакоидов приводила к трехкратному уменьшению концентрации NH_4Cl, необходимой для достижения половины максимального разобщения электронного транспорта. Поскольку NH_4Cl, действуя как разобщитель, уменьшает градиент pH на мембране тилакоидов, уменьшение необходимой концентрации NH_4Cl указывает на увеличение pH люмена при добавке бикарбоната в суспензию.

Оценка градиента pH на мембране тилакоидов гороха при помощи измерения тушения флуоресценции 9-аминоакридина показывает, что как увеличение концентрации бикарбоната в среде реакции, так и добавка ингибиторов КА приводят к уменьшению градиента pH, что свидетельствует об увеличении pH люмена тилакоидов. В присутствии гидрофильного ингибитора КА мафенида pH люмена возрастает в большей степени, чем в присутствии липофильного ингибитора КА этоксизоламида.

Таким образом, показано, что увеличение концентрации бикарбоната в среде реакции приводит к повышению pH люмена тилакоидов. Эффект ингибиторов КА указывает на вовлеченность тилакоидных КА в регуляции градиента pH на мембране: как минимум одна КА вероятно находится с внешней стороны тилакоидной мембраны, тогда как другая КА вероятно расположена за гидрофобным барьером, и действие этой КА противоположно по направлению. Какие КА ответственны за наблюдаемые эффекты, пока не установлено.

[1]. Иванов Б.Н., Руденко Н.Н., 2024 Участие карбоангидраз хлоропластов высших С3 растений в адаптационных изменениях фотосинтетических реакций

Фотовосстановление цитохрома *c*, сенсибилизированное димерами хлорофилла в составе белков семейства WSCP

Неверов К.В.[1,2*], Обухов Ю.Н.[1], Крицкий М.С.[1]
[1]Институт биохимии им. А. Н. Баха, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия;
[2]Биологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия.
*e-mail: neverovk@mail.ru

Растительные белки семейства WSCP (Water Soluble Chlorophyll-binding Proteins) являются водорастворимыми комплексами, локализованными вне мембранных структур хлоропластов и не участвующими в фотосинтезе. Холоформы WSCP представляют собой гомотетрамеры, связывающие до четырёх молекул хлорофилла (Хл) *a* или Хл *a* + Хл *b*. Молекулы Хл упакованы во внутренней гидрофобной зоне холоформ в виде двух димеров, что повторяет структуру реакционных центров (РЦ) фотосистем, где димеры Хл («специальная пара») являются первичными донорами электрона при фотосинтезе. Несмотря на структурную аналогию укладки хромофоров в РЦ и WSCP, фотохимическая редокс-активность Хл в холобелках WSCP систематически не изучалась.

Ранее нами была продемонстрирована возможность фотоиндуцированного Хл в WSCP восстановления цитохрома *c* в растворе с низким содержанием кислорода [1]. Для изучения механизм этой реакции в данной работе были проведены исследования фотовосстановления цитохрома белком BoWSCP из *Brassica oleracea* (соотношение Хл *a* к Хл *b* = 9:1) в растворах с разным содержанием O_2.

Фотовосстановление цитохрома *c* было зарегистрировано при облучении препаратов BoWSCP красным светом ($\lambda \geq 650$ нм) в насыщенных воздухом растворах, а также в частично деаэрированной среде. Было установлено, что скорость фотопроцесса линейно зависит от концентрации как кислорода, так и цитохрома, что указывает на то, что процесс является редокс-реакцией второго порядка. В бескислородной среде фотовосстановления цитохрома *c* не наблюдалось.

Ионы Cu^{2+} и супероксиддисмутаза (СОД) ингибировали процесс фотовосстановления цитохрома, что указывает на участие в редокс-реакции анион-радикала супероксида, который может генерироваться фотовозбуждённым димером Хл в BoWSCP. Эффект СОД усиливался каталазой, очевидно, вследствие дезактивации H_2O_2, являющейся ингибитором СОД.

Добавление к системе азида натрия – тушителя синглетного кислорода – в концентрации 100-300 мкМ увеличивало скорость фотовосстановления цитохрома; при повышении концентрации NaN_3 до 30 мМ процесс ингибировался. При этом константа ингибирования реакции отличалась от константы тушения азидом $^1O_2$, что говорит о том, что $^1O_2$ не принимает участия в наблюдаемом фотопроцессе.

Модельные эксперименты с темновой генерацией супероксида в системе ксантин-ксантиноксидаза позволили количественно оценить квантовый выход фотогенерации супероксида холобелком BoWSCP.

В процессе эксперимента фотодеградация Хл в белке была незначительной и полностью исчезала при удалении O_2 из среды. Стехиометрическое отношение восстановленного цитохрома к окисленному Хл составляло 2,5-3, что указывает на альтернативный хлорофиллу источник электронов для цитохрома. Предполагается, что таким источником могут выступать аминокислотные остатки белкового матрикса WSCP.

[1]. Обухов, Ю. Н., Неверов, К. В., Малеева, Ю. В., & Крицкий, М. С. (2023). *Доклады РАН. Науки о жизни*, 509(1), 88.

Исследование взаимодействия фотосистемы 1 с экзогенными редокс-медиаторами: аскорбатом, 2,6-дихлорфенолиндофенолом и *N,N,N',N'*-тетраметил-*p*-фенилендиамином

Петрова А.А.[1]*, Козулева М.А.[2], Милановский Г.Е.[1], Трубицин Б.В.[3], Тихонов А.Н.[3], Черепанов Д.А.[1], Семёнов А.Ю.[1]
[1]НИИ Физико-химической биологии имени А.Н. Белозерского МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2]Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино, Россия
[3]Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
*e-mail: draparnaldia@gmail.com

Фотосистема 1 (ФС1) катализирует светозависимый перенос электрона от экзогенного высокопотенциального донора электрона к внешнему низкопотенциальному акцептору. *In vivo* донорами и акцепторами служат водорастворимые белки – пластоцианин, ферредоксин и т.п. Они сопрягают перенос электрона в ФС1 и цитохромном-b_6f-комплексе с реакциями ассимиляции неорганических соединений. *In vitro* при работе с выделенными комплексами ФС1 в качестве доноров и акцепторов применяются редокс-медиаторы. Чаще всего это аскорбат (Аск) в паре с 2,6-дихлорфенолиндофенолом (ДХФИФ) либо *N,N,N',N'*-тетраметил-*p*-фенилендиамином (ТМФД). Ранее в работах нашей научной группы было показано, что в условиях стационарного освещения Аск и ДХФИФ способны акцептировать электроны от терминальных железо-серных кластеров F_A/F_B ФС1 [1, 2]. В то же время ДХФИФ, в отличие от ТМФД, служит медиатором переноса электрона от акцепторной стороны ФС1 на молекулярный кислород.

В настоящей работе мы более детально исследовали акцепторные свойства Аск по отношению к ФС1 в условиях стационарного освещения методом ЭПР в X-полосе. Динамика ЭПР-сигнала монодегидроаскорбата (МДА) различалась в пробах, содержащих интактные комплексы ФС1 и комплексы F_X-core, лишенные железо-серных кластеров F_A/F_B. В обоих случаях, как восстановление P_{700}^+, так и его окисление ускорялось с увеличением концентрации Аск. Полученные данные дают основание сделать вывод о том, что на стационарном свету в отсутствие других редокс-медиаторов Аск служит как донором, так и акцептором электронов и в интактных, и в F_X-core комплексах ФС1. Донором электронов и там, и там, по-видимому, является полностью восстановленный Аск. При этом акцепторами для интактных и F_X-core комплексов служат разные формы Аск: в первом случае – полностью окисленный дегидроаскорбат, во втором – МДА.

Кроме того, мы исследовали акцепторные свойства Аск, ДХФИФ и ТМФД при возбуждении ФС1 насыщающей лазерной вспышкой. Были получены зависимости кинетики восстановления P_{700}^+ от концентраций всех трёх редокс-медиаторов. Показано, что наиболее эффективно обратный перенос электрона подавляется ДХФИФ, который способен акцептировать электроны от ФС1 уже при концентрации 5 мкМ в присутствии 10 мМ Аск. Аск оказался существенно менее эффективным акцептором: заметное подавление рекомбинации зарядов наблюдалось лишь при концентрациях выше 10 мМ. ТМФД в концентрациях до 50 мкМ в присутствии 10 мМ Аск был не способен конкурировать за электроны с реакциями обратного переноса электрона. Таким образом, наиболее эффективным акцептором электронов среди трёх редокс-медиаторов является именно окисленная форма ДХФИФ.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ №23-74-00025.

[1]. Trubitsin B.V. et al. (2014). Interaction of ascorbate with photosystem I. Photosynthesis Research, 122, 2, 215-231.
[2]. Petrova A.A. et al. (2018). Effect of artificial redox mediators on the photoinduced oxygen reduction by photosystem I complexes. Photosynthesis Research, 137, 3, 421-429.

Синглет-триплетное деление возбуждения каротиноидов LH1 и LH2 комплексов фототрофных бактерий

Проскуряков И.И.*, Кленина И.Б., Махнева З.К., Большаков М.А., Москаленко А.А.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино, Россия
*e-mail: pros@issp.serpukhov.su

В процессе фотосинтеза каротиноиды играют важную роль. К их основным функциям относятся расширение спектрального диапазона света, доступного для возбуждения процессов фотопереноса электрона в реакционных центрах (РЦ), и тушение триплетных состояний хлорофилльных (Хл) пигментов, предотвращающее генерацию синглетного кислорода. Первая из упомянутых функций реализуется за счет поглощения каротиноидами света в области прозрачности хлорофиллов (450 - 500 нм) и передачи энергии возбуждения на Хл. В случае пурпурных фототрофных бактерий квантовый выход указанного переноса энергии может быть ниже 0,3. В значительной степени такая низкая эффективность связана с высоким квантовым выходом триплетных состояний каротиноидов, ^{3}Кар. Известно, что особенности фотофизики каротиноидов в растворах приводят к крайне низким значениям квантового выхода ^{3}Кар. В случае каротиноидов в составе бактериальных пигмент-белковых комплексов заселение триплетных состояний каротиноидов происходит по механизму чрезвычайно быстрого разрешенного по спину процесса синглет-триплетного (S-T) деления их возбуждения.

В докладе будут обсуждаться следующие аспекты генерации ^{3}Кар в периферийных (LH2) и РЦ-содержащих (LH1) пигмент-белковых комплексах пурпурных фототрофных бактерий:

1. Для эффективного S-T деления возбуждения молекулы каротиноидов должны находиться на расстоянии, не превышающем примерно 10 Å. В периферийных комплексах *Rh. acidophilus* они разнесены более чем на 13 Å. Нами показано [1], что в процессе деления возбуждения принимают участие расположенные между Кар молекулы бактериохлорофиллов. Предложенный механизм вовлечения бактериохлорофиллов - создание условий для суперобменного взаимодействия ^{3}Кар. С высокой вероятностью аналогичный механизм реализуется и в случае других пурпурных бактерий с эффективным S-T делением возбуждения.

2. В ряде работ высказывается предположение о возможности внутримолекулярного S-T деления возбуждения Кар. Используя данные ЭПР спектроскопии высокого временного разрешения и эффектов магнитного поля мы продемонстрировали межмолекулярный механизм процесса [2].

3. В течение ряда лет нами наблюдался парадоксальный эффект фотовыцветания бактериохлорофилла пурпурных бактерий при возбуждении в полосу поглощения каротиноидов. Был измерен спектр действия данного процесса, совпадающий со спектром поглощения Кар. Максимальный квантовый выход эффекта был оценен в 0,03 %. Наиболее вероятным механизмом фотодеструктивного действия каротиноидов является генерация синглетного кислорода триплетами Кар, возникающими в результате S-T деления возбуждения [3].

Будет также приведено краткое обсуждение результатов изучения процесса S-T деления возбуждения каротиноидов в пленках и липосомах.

Работа выполнена в рамках тем 0191-2019-0039, FMRM-2022-0013 и FMRM-2025-0003 Минобрнауки.

[1]. Кленина И.Б. и др. (2014). Биохимия, 79, 310-317.
[2]. Грязнов А. А. и др. (2019). Биофизика, 64, 1045-1051.
[3]. Кленина И.Б. и др. (2022). Биохимия 87, 1425-1433.

Связывание катионов Fe(II) с высокоаффинным Mn-связывающим участком фотосистемы 2 в темноте в присутствии окислителей

Семин Б.К., Локтюшкин А.В., Васильев Н.С., Ловягина Е.Р.*
Биологический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия
*e-mail: Elena.Lovyagina@gmail.com

Процесс самосборки Mn-кластера кислород-выделяющего комплекса (КВК) фотосистемы 2 (ФС2) (фотоактивация) интенсивно исследуется *in vitro*. Ряд экспериментальных результатов указывает на то, что реконструкция Mn-кластера состоит из нескольких этапов. Первоначально катионы Mn(II) слабо связываются с высокоаффинным Mn-связывающим участком ФС2 без КВК, после чего окисляются радикалом тирозина $Y_Z^{\bullet}$, генерируемым поглощением кванта света первичным донором P680. В результате происходит прочное связывание Mn(III) с высокоаффинным участком. Поглощение второго кванта света через определенный темновой интервал приводит к связыванию второго катиона с образованием димера. Интересно, что на свету с высокоаффинным Mn-связывающим участком помимо катионов Mn(II) могут связываться и катионы Fe(II) с сопоставимой эффективностью [1] и той же последовательностью этапов [2]. Прочно связанные катионы Fe(III) блокируют электронный транспорт через высокоаффинный участок к Y_Z. В настоящей работе мы показали, что блокирование высокоаффинного Mn-связывающего участка катионами Fe(II) может быть достигнуто не только фотохимическим, но и темновым химическим способом: специфически, но слабо связанный с высокоаффинным участком катион Fe(II) может быть окислен пероксидом водорода или 2,6- дихлорофенолиндофенолом, что приводит к его прочному связыванию и блокированию этого участка. Однако эффективность химического блокирования существенно меньше фотохимического. Кинетические исследования фотохимического блокирования показали, что оно определяется связыванием не одного катиона Fe(III), а, по крайней мере, двух [1]. Учитывая тот факт, что препараты ФС2 без КВК имеют только один участок высокого сродства для связывания катиона Mn(II) (и, соответственно, катиона Fe(II)), мы предполагаем следующий механизм блокирования. Первый катион Fe(II) взаимодействует с высокоаффинным участком, на свету окисляется радикалом $Y_Z^{\bullet}$ и прочно связывается с этим участком, формируя при этом новый участок связывания (как и в случае процесса фотоактивации). Связанный катион Fe(III) занимает новый участок, а к освободившемуся высокоаффинному участку подходит очередной катион Fe(II), взаимодействует с ним и окисляется тирозином. Подобный механизм может объяснить более низкую эффективность темнового блокирования по сравнению с фотохимическим. При темновом блокировании добавление пероксида водорода приводит к одномоментному окислению всех катионов Fe(II) в суспензии, поскольку его концентрация существенно выше. Следовательно, при химическом блокировании формируется только один катион Fe(III), прочно связанный с высокоаффинным участком. Полученные данные свидетельствуют в пользу двухквантового механизма физиологически важного процесса – реконструкции Mn-кластера в ФС2 без КВК в процессе инкубации на свету с экзогенными катионами Mn(II).

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова.

[1]. Semin B.K. et al. (2002). Blocking of electron donation by Mn(II) to $Y_Z^{\bullet}$ following incubation of Mn-depleted photosystem II membranes with Fe(II) in the light. Biochemistry, 41, 5854−5864.
[2]. Semin B. et al. (2004). Current analysis of cations substitution in the oxygen-evolving complex of photosystem II. Biophys. Rev.,16, 237−247.

Участие каротиноидов в образовании липофильных и гидрофильных органических гидропероксидов и их взаимодействие с белками светособирающих комплексов LH 2 пурпурной серной бактерии *Ectothiorhodospira haloalkaliphila*

Стародубов А.С.*, Большаков М.А., Ашихмин А.А., Яныкин Д.В.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН, Московская область, Пущино, Россия
*e-mail: alexkex3@gmail.com

Ранее, было обнаружено, что при действии сине-зеленого света на препараты комплексов LH2 из пурпурной серной бактерии *Ectothiorhodospira* (*Ect.*) *haloalkaliphila* наблюдалось уменьшение амплитуды полосы поглощения БХл850, одновременно с этим происходило образование продукта окисления БХл – 3-ацетил-хлорофилла, с максимумом поглощения при 698 нм [1]. В данной работе обсуждается возможность того, что каротиноид-зависимая фотогенерация активных форм кислорода в светособирающих комплексах LH2 *Ect. haloalkaliphila* приводит к образованию органических гидроперекисей и повреждению, как пигментов, так и белкового матрикса.

При действии сине-зеленого света на препараты комплексов LH2 из *Ect. haloalkaliphila* общее количество гидропероксидов (R-OOH) достигало максимального уровня (до 80 молекул на один LH2) на 20-й минуте. Добавление 10 мМ L-гистидина приводило, с одной стороны, к резкому снижению фотопродукции LP-OOH (на 80%), а с другой - к увеличению фотопродукции HP-OOH. Другие тушители синглетного кислорода также уменьшают фотообразование LP-OOH и увеличивают фотообразование HP-OOH. Добавление СОД и каталазы перед освещением LH2 практически не приводило к ингибированию фотопродукции HP-OOH и снижало фотопродукцию LP-OOH в два раза. Ферменты, добавленные после освещения препаратов, не влияли на содержание R-OOH. Полученные данные позволяют исключить участие пероксида водорода и супероксидного анион-радикала в образовании гидропероксидов. Показано, что при освещении образцов комплекса LH2 не происходит образование гидропероксидов БХл и каротиноидов. Освещение комплексов LH2 из *Ect. haloalkaliphila* в область поглощения каротиноидов приводит к фотопотреблению молекулярного кислорода со скоростью 993 мкмоль O_2 (мкмоль LH2)$^{-1}$ ч$^{-1}$ в первую минуту непрерывного освещения и 165 мкмоль O_2 (мкмоль LH2)$^{-1}$ ч$^{-1}$ позже.

Таким образом, представленные данные подтверждают возможность того, что каротиноид-зависимая фотогенерация синглетного кислорода в LH2 из *Ect. haloalkaliphila* приводит к образованию органических гидроперекисей.

[1]. Makhneva, Zoya K., Maksim A. Bolshakov, and Andrey A. Moskalenko. 2021. "Carotenoids Do Not Protect Bacteriochlorophylls in Isolated Light-Harvesting LH2 Complexes of Photosynthetic Bacteria from Destructive Interactions with Singlet Oxygen" *Molecules* 26, no. 17: 5120. https://doi.org/10.3390/molecules26175120

Подходы к повышению термостабильности мутантного фотосинтетического реакционного центра *Cereibacter sphaeroides*

Фуфина Т.Ю., Васильева Л.Г.*
ФИЦ ПНЦБИ РАН, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Московская обл., Россия
*e-mail: vsyulya@mail.ru

Методы сайт-направленного мутагенеза успешно используются в структурно-функциональных исследованиях фотосинтетических реакционных центров (РЦ). Замечено, что многие мутации вблизи кофакторов переноса электрона снижают устойчивость РЦ *Cereibacter sphaeroides* к температуре и влияют на количество РЦ в мембранах. Ранее нами сообщалось, что внесение межсубъединичных дисульфидных мостиков на периплазматической или цитоплазматической поверхности комплекса способствует увеличению термостабильности РЦ *C. sphaeroides*. В данной работе была предпринята попытка аналогичной стабилизации структуры мутантного РЦ с замещением Ile M206 – Gln, повлиявшим на устойчивость комплекса к тепловой денатурации. РЦ I(M206)Q представляет значительный интерес для исследования механизмов начальных этапов фотохимического разделения зарядов, так как мутация вблизи бактериохлорофиллов активной цепи переноса электрона привела к существенному снижению квантового выхода образования состояния с разделенными зарядами $P^+Q_A^-$. Был проведен анализ влияния мутаций на количество РЦ в хроматофорах и обнаружено, что мутация I(M206)Q приводит к двойному уменьшению содержания РЦ в хроматофорах, внесение дисульфидных связей на цитоплазматической или периплазматической сторонах комплекса снижает количество РЦ в мембранах на треть, тройное замещение I(M206)Q/G(M19)C/T(L214)C - почти в 4 раза, а замещения I(M206)Q/V(M84)C/G(L278)C приводят к нарушению сборки РЦ в мембране. Показано, что внесение межсубъединичной S-S связи на цитоплазматической поверхности комплекса не оказало существенного влияния на термостабильность РЦ I(M206)Q. Обсуждаются собственные и литературные данные в отношении факторов, обеспечивающих стабильность структуры интегральных мембранных комплексов.

Спектральные свойства возбужденного первичного донора электрона в реакционных центрах пурпурной бактерии *Rhodobacter sphaeroides* на фемтосекундной шкале времени

Христин А.М.*, Фуфина Т.Ю., Васильева Л.Г., Хатыпов Р.А.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», г. Пущино, Московская область, Россия
*email: anmaster84@ya.ru

В настоящее время общепринято, что в бактериальных реакционный центрах (РЦ) пурпурной бактерии *Rhodobacter sphaeroides* индуцированный светом трансмембранный перенос электрона осуществляется по активной цепи кофакторов переноса электрона от возбужденного первичного донора P^* на первичный хинонный акцептор Q_A:

$$P^* \xrightarrow{3\ пс} P^+B_A^- \xrightarrow{1\ пс} P^+H_A^- \xrightarrow{200\ пс} P^+Q_A^-$$

Трансмембранный перенос электрона происходит с предельно высоким квантовым выходом. Дискуссионным остается вопрос о процессах, связанных с первым шагом этой цепи. В частности остается неясным влияние когерентные явлений в возбужденном первичном доноре на эффективность и направленность переноса электрона на ближайший акцептор. Также не удается обнаружить спектральные признаки комплекса с переносом заряда $P_A^+P_B^-$, образование которого предсказано в ряде теоретических работ, и неизвестна его роль на начальных этапах разделения зарядов в РЦ.

В данной работе мы приводим экспериментальные данные о динамике стимулированного излучения P^* и влиянии блокирования переноса электрона на поглощение из возбужденного состояния при когерентном возбуждении первичного донора электрона. Обнаружено, что затухание осциллирующего стимулированного излучения, обусловленное когерентными колебаниями в возбужденном первичном доноре электрона, коррелирует со временем жизни состояния с разделенными зарядами $P^+B_A^-$, что указывает на обратимость первичной реакции $P^* \leftrightarrow B_A$. Двухфазная кинетика полосы поглощения возбужденного первичного донора электрона P^* при 810 нм при блокировании переноса электрона на молекулу B_A позволяет предположить, что в нативных РЦ на задержках времени менее 200 фс проявляются признаки суперпозиции двух электронных состояний. Одно из этих состояний не поглощает при 810 нм и его вклад составляет 24%. Сопоставление полученных данных с теоретическими работами показывает, что к возбужденному первичному донору электрона P^* примешивается состояние с переносом заряда $P_A^+P_B^-$.

Восстановление и взаимодействие митохондриального цитохрома с-550 с облученными УФ светом препаратами марганец стабилизирующего белка PsbO и мембранами ФС2

Христин М.С.*, Смолова Т.Н., Хоробрых А.А.
ФИЦ ПНЦБИ РАН, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Московская обл., Россия
*e-mail: *khristin_@rambler.ru*

Митохондриальный цитохром с-550 (цит-с) давно используется для изучения структурно-функциональной организации фотосинтетической электрон-транспортной цепи [1], для конструирования фотосинтетических преобразователей энергии солнечного света с использованием ковалентно сшитого цит-с с фотосинтетическими реакционными центрами [2], а также датчиков супероксиданион радикалов [3]. Однако восстановление цит-с фотосинтетическими мембранами часто трудно однозначно интерпретировать, так как при освещении фотосинтетические мембраны генерируют активные формы кислорода, которые могут окислять или восстанавливать цит-с. Одним из подходов в решении этой проблемы может быть обнаруженный нами эффект темнового восстановления цит-с фотосинтетическими белками и мембранами, кратковременно облученными УФ светом. Показано, что белок PsbO, а также мембраны ФС2 способны к восстановлению цит-с после их облучения УФ-светом. Добавление антиоксидантных ферментов, супероксиддисмутазы или каталазы, оказывало влияние на этот эффект. При хроматографировании на колонке (сефадекс G10) белка PsbO обнаруживалась низкомолекулярная фракция, также восстанавливающая цит-с. В то же время восстанавливающая способность белка PsbO после хроматографирования уменьшалась, что может быть связано с окислением восстановителя, образующегося в белке при освещении УФ-светом, кислородом. Приводятся данные о связывании белка PsbO с иммобилизованным цит-с: белок PsbO более прочно связывается с восстановленным цит-с чем с окисленным.

[1]. Л.О.Эйнор. (1973). Реконструкция энергетических механизмов фотосинтеза. «Наукова думка», Киев, с.100-122.
[2]. G. Buscemi et al. (2023). Supramolecular biohybrid construct for photoconversion based on a bacterial reaction center covalently bond to cytochrome c by anorganic light harvesting bridge. Bioconiugate chemistry, 34, 629-637.
[3]. R.V. Chertcova et al. (2023). Mutant cytochrome c as potential detector of superoxide generation: effect of mutations on the functional and properties. Cells, 12, 2316.

Исследование первичных реакций разделения зарядов в фотосистеме II растений и цианобактерий методом широкополосной фемтосекундной лазерной спектроскопии

Черепанов Д.А.[1,2*], Забелин А.А.[3], Шкуропатов А.Я.[3], Семёнов А.Ю.[2], Надточенко В.А.[1]
[1]ФИЦ ХФ РАН, Москва, Россия
[2]НИИ физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского, МГУ, Москва, Россия
[3]ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», Пущино, Россия
*e-mail: tscherepanov@gmail.com

Фотохимическим реакционным центром фотосистемы II (ФСII) кислородного фотосинтеза у растений является трансмембранный пигмент-белковый комплекс D1/D2/cyt *b559* RC (D_1D_2), в котором происходит сверхбыстрое преобразование энергии возбужденного хлорофилла (Хл) в электрохимическую энергию ион-радикальных состояний в ходе последовательных реакций переноса электрона. Первичные процессы преобразования световой энергии ФСII изучались с помощью фемтосекундной широкополосной абсорбционной разностной спектроскопии «возбуждение-зондирование». Сверхбыстрые фотохимические реакции комплексов ФСII, выделенных из цианобактерии *Synechococcus sp.* PCC 7335, выращенной при освещении дальним красным светом и содержащей длинноволновые формы Хл *d* и Хл *f*, сравнивались с аналогичными процессами в канонических комплексах ФСII из шпината. Идентифицировано первичное ион-радикальное состояние $P_{D1}^{+}Chl_{D1}^{-}$, образование которого при селективном возбуждении Хл *d* происходит с наблюдаемым временем ~1,6 пс. Последующий перенос электрона на вторичный акцептор феофитин $Pheo_{D1}$ происходит с характерным временем 7 пс.

Аналогичные процессы в комплексах D_1D_2 из шпината регистрировались при температурах 77 и 279 К в спектральном диапазоне 400-800 нм. Для идентификации возникающих электронных состояний использовались дифференциальные спектры аниона феофитина $Pheo_{D1}^{-}/Pheo_{D1}$ и катиона хлорофилла P_{D1}^{+}/P_{D1}, полученные методом фотонакопления. Во временном интервале до 1 пс фотодинамика комплексов D_1D_2 отражает релаксационные процессами возбужденной экситонно-сопряженной системы РЦ. Образование катиона P_{D1}^{+} и аниона $Pheo_{D1}^{-}$ происходит синхронно в широком временном интервале 6-100 пс. Кинетическая гетерогенность реакции наблюдается как при 77, так и при 279 К. При возбуждении комплексов D_1D_2 в дальний край полосы Qy в области 700 нм в небольшой фракции центров наблюдается сверхбыстрое разделение зарядов с характерным временем 0.4 пс (279 К) и 1 пс (77 К), что может быть интерпретировано как наличие в системе экситонно-сопряженных пигментов полосы поглощения комплекса $[(Chl_{D1}Pheo_{D1})^{*}\leftrightarrow Chl_{D1}^{+}Pheo_{D1}^{-}]$ с разделенными зарядами.

Энергетические уровни образующихся ион-радикальных состояний существенно различаются в длинноволновой и канонической формах ФСII.

Работа была поддержана фондом РНФ (грант №23-74-00025)

Уникальная карбоангидразная активность Фотосистемы 2

Шитов А.В.*
Институт фундаментальных проблем биологии РАН Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований Российской Академии наук», Пущино, Россия
*e-mail: aleksshitow@rambler.ru

Фотосистема 2 (ФС-2) это пигмент-белково-липидный комплекс фотосинтезирующих организмов, являющийся источником электронов для цепи их переноса в тилакоидной мембране и далее для восстановления НАДФ и синтеза углеводов и других органических соединений. ФС-2 – единственный природный комплекс способный извлекать электроны из воды путём ее окисления за счёт фотохимических реакций под действием солнечного света. Эффективное функционирование этого комплекса обеспечивает продуктивность всех фотосинтетиков. Одним из кофакторов для эффективного функционирования ФС-2 являются ионы бикарбоната. А. Стемлер и П. Юрсиник предположили, что для обеспечения необходимым количеством бикарбоната, ФС-2 должна ускорять реакции $CO_2 \leftrightarrow HCO_3^-$. Эти реакции в природе катализируются высокоактивными ферментами карбоангидразами (КА), которые широко распространены. В ФС-2 многих фотосинтетиков (кукуруза, горох, шпинат, одноклеточная водоросль *Chlamydomonas reinhardtii* и др.) также была обнаружена карбоангидразная активность. Но, так как скорость КА реакций была выявлена ниже, чем скорость O_2 выделяющей активности, некоторые исследователи полагали, что найденная активность является артефактом, не связана с фотосинтетической активностью и даже может быть результатом примеси КА из стромы или цитоплазмы. В нашей работе мы показываем, что измеренная новым для ФС-2 методом дегидратазная активность препаратов ФС-2 прямо коррелирует с их O_2 выделяющей активностью и сравнима по скорости с наиболее высокоэффективными КА. В то же время, эта активность обладает уникальными свойствами (зависимость активности от pH и ответ на действие известных сульфаниламидных ингибиторов КА), кардинально отличающимися от других известных КА. Это, в свою очередь, говорит о том, что КА в ФС-2 не является примесью других КА. Интрига в изучении этой активности в том, что пока неизвестно, какой из элементов ФС-2 её проявляет. Высокая КА активность, взаимосвязанная с фотосинтетической, предполагает её участие в механизме работы ФС-2. Поэтому, наши результаты открывают новое направление исследований механизма функционирования ФС-2.

Влияние каротиноидного состава на стабильность и светоиндуцированное окислительное повреждение комплексов LH2, выделенных из *Ectothiorhodospira haloalkaliphila*

Яныкин Д.В.[1, 2]*, Ашихмин А.А.[1], Большаков М.А.[1]
[1]Институт фундаментальных проблем биологии Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ, г. Пущино, Российская Федерация
[2]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
*e-mail: ya-d-ozh@rambler.ru

Показано, что фотогенерация синглетного кислорода в препаратах LH2 пурпурной серной бактерии *Ectothiorhodospira haloalkaliphila* зависит от каротиноидного состава светособирающих комплексов и приводит к повреждению пигментов и белковых молекул. Получены данные о продуктах взаимодействия синглетного кислорода с компонентами LH2 как с нативным, так и с изменённым составом каротиноидов (LH2 без каротиноидов и LH2 с включенными нейроспорином, сфероиденом или родопином). Оценена способность различных каротиноидов влиять на стабильность LH2 и участвовать в окислительном повреждении комплексов. Сделан вывод, что каротиноиды играют важную роль в устойчивости комплексов LH2 и способны вызывать окислительное повреждение компонентов LH2 посредством фотогенерации синглетного кислорода.

Фотообразование водорода микроводорослями *Chlorella sorokiniana* при кратковременном фотоингибировании

Волгушева А.А.[1]*, Антал Т.К.[2]
[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2] Псковский государственный университет, Псков, Россия
*e-mail: volgusheva_alena@mail.ru

Использование фототрофных организмов для производства водорода (H_2) рассматривается как перспективное направление в решении энергетических проблем. Известно, что серное голодание эффективно стимулирует биосинтез H_2 у водорослей [1, 2]. Однако этот метод, как и другие типы голоданий, имеет ограничения: недостаточный выход H_2 для промышленных масштабов и короткий срок жизнедеятельности самих водорослей. В последнее десятилетие были предложены новые подходы, позволяющие переводить культуру водорослей в анаэробные условия при культивировании на полной питательной среде [3, 4]. Такие подходы могут увеличить продолжительность жизни водорослей и повысить эффективность производства H_2.

В настоящей работе мы показали, что иммобилизованная культура *C. sorokiniana* способна самостоятельно переходить в анаэробиоз при культивировании на полной минеральной среде после кратковременного воздействия света высокой интенсивности. Культура была способна производить 0,1 моль H_2 $м^{-2}$ в течение 9 дней. Для сравнения, голодающая по сере культура *C. reinhardtii* в атмосфере воздуха и при схожей концентрации хлорофилла, выделяет 0,04 моль H_2 $м^{-2}$ [5].

Продутая аргоном культура *C. sorokiniana,* культивируемая на полной минеральной среде, выделила 0,55 моль H_2 $м^{-2}$ в течение 51 дня. Насколько нам известно, ранее была опубликована только одна работа, демонстрирующая способность мутантного штамма *C. reinhardtii* с пониженным содержанием ФС1 выделять 1,8 ммоль $Л^{-1}$ H_2 в течение 42 дней культивирования на полной TAP среде [3].

Проведен анализ вклада ФС2-зависимого и ФС2-независимого пути в гидрогеназную реакцию при заданных экспериментальных условиях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что электроны, поступающие от ФС2 и процессов деградации крахмала, играют ключевую роль в образовании H_2 у *C. sorokiniana*. Предложенный подход обладает конкурентоспособным потенциалом и может быть реализован в полной мере при оптимизации условий культивирования.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова.

[1]. Цыганков А.А. (2006) Получение водорода биологическим путем. Российский химический журнал, № 6, С. 26-33.
[2]. Петрова Е.В. и др. (2020). О механизмах и роли фотосинтетического образования водорода у зеленых микроводорослей. Микробиология, 89, 259-275
[3]. Krishna P.S. et al. (2019). Photosystem ratio imbalance promotes direct sustainable H_2 production in *Chlamydomonas reinhardtii*. Green Chem, 21, 4683-4690.
[4]. Kosourov S. et al. (2018). A new approach for sustained and efficient H_2 photoproduction by *Chlamydomonas reinhardtii*. Energy Environ. Sci, 11, 1431-1436.
[5]. Kosourov S.N., Seibert M. (2009) Hydrogen photoproduction by nutrient-deprived *Chlamydomonas reinhardtii* cells immobilized within thin alginate films under aerobic and anaerobic conditions. Biotech & Bioengineering, 102, 50-58.

Сравнение фотосинтетического и биохимического профиля зеленой микроводоросли *Desmodesmus armatus* ARC06 выращиваемой на различных вариантах аэрации

Гончарова М.А.[1*], Заднепровская Е.В.[1], Волошин Р.А.[1], Габриелян Д.А.[1], Лобус Н.В.[1], Аллахвердиев С.И.[1,2]
[1]Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, г. Москва, Россия
[2]Институт фундаментальных проблем биологии ФИЦ ПНЦБИ РАН, г. Пущино, Московская область, Россия.
*e-mail: goncharova@ifr.moscow

Представители рода *Desmodesmus* являются одними из ключевых компонентов фитопланктона в различных водоемах благодаря высокой экологической пластичности [1]. Эти зеленые микроводоросли демонстрирует значительную способность к фиксации CO_2, что открывает перспективы их использования для очистки промышленных газовых выбросов и сокращения эмиссии парниковых газов [2].

Объектом исследования был дикий штамм зеленой микроводоросли *Desmodesmus armatus* (ARC06), выделенный из пресных вод р. Енисей (Арктика) [3]. В данной работе проводится сравнение эффективности протекания фотосинтеза и биохимического состава клеток *D. armatus* в зависимости от CO_2-условий культивирования.

Эксперимент проводился в лабораторной системе интенсивного культивирования [4] в течение 6 суток при двух вариантах аэрации с расходом 0,2-0,3 л/мин: газовоздушной смесью, обогащенной CO_2 (1,5-2%, объёмная доля) и стерильным воздухом (~400 ppm CO_2). Остальные условия: среда BBM-3N, освещенность 300 мкмоль фотонов $м^{-2}$ $с^{-1}$, температура 27±0,5°C – не различались. Отбор проб происходил в контрольные точки: 0 часов, 24 часа, 72 часа, 144 часа. Эффективность фотосинтеза оценивалась флуориметрически (OJIP и NPQ) и полярографически (ячейка Кларка). Было определено количественное содержание суммарных углеводов, белков и пигментов в культуре *D. armatus*.

Уровень белка и крахмала варьировал в зависимости от режима культивирования. Так, при повышенном уровне CO_2 на 6 сутки эксперимента зафиксировано максимальное содержание крахмала – 439 мг/г с.м., в то время как при воздушном барботаже его концентрация была вдвое меньше (211 мг/г с.м.). Наибольший выход белка наблюдался в варианте с воздушной продувкой на 3 сутки культивирования – 218 мг/г с.м., тогда как во втором варианте эксперимента его концентрация составила 160 мг/г с.м.

Стоит отметить, что через 72 ч. культивирования на повышенном CO_2 на кривой OJIP у *D. armatus* появился пик I, что свидетельствовало о нахождении культуры в состоянии стресса [5]. В тоже время при аэрации культуры воздухом данный эффект не наблюдался даже через 144 ч. эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-27-20026

[1]. Demura M. (2024). New species and species diversity of *Desmodesmus* (Chlorophyceae, Chlorophyta) in Saga City, Japan. Sci Rep, 14, 18980.
[2]. Wang Y. et al. (2024). Isolation and Whole-genome analysis of *Desmodesmus* sp. SZ-1: Novel acid-tolerant carbon-fixing microalga, Bioresource Technology, 414, 131572.
[3]. Lobus N. et al. (2022). Production of Fluorescent Dissolved Organic Matter by Microalgae Strains from the Ob and Yenisei Gulfs (Siberia). Plants, 11, 3361.
[4]. Габриелян Д.А. и др. (2023). Лабораторная система для интенсивного культивирования микроводорослей и цианобактерий. Физиология растений, 70(2), 202-213.
[5]. Strasser, R.J. et al. (2004). Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient. In: Chlorophyll a Fluorescence. Advances in Photosynthesis and Respiration, 19, 321–362.

Адаптация микроводорослей к недостатку элементов питания в аэробных и анаэробных условиях

Гречаник В.И.*, Цыганков А.А.
ИФПБ РАН – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пущино
* e-mail: vi.semina@gmail.com, тел. +7 9154624524

Некоторые виды микроводорослей способны к светозависимому выделению водорода (H_2) после темновой анаэробной адаптации. Скорость выделения H_2 в начальный момент достигает максимальной скорости фотосинтеза. Но этот процесс краткосрочен, так как ингибируется кислородом. Разработан подход продления выделения H_2. Для этого культуры помещают в условия недостатка серы, азота, фосфора или углерода. Через некоторое время адаптация культур к недостатку элемента питания приводит к понижению активности фотосистемы 2 (ФС2), скорость дыхания становится выше скорости фотосинтеза, и культуры переходят в анаэробные условия, в которых и синтезируется гидрогеназа. После ее синтеза начинается длительное выделение H_2. Разными авторами описано 10 механизмов, участвующие в снижении активности ФС2, причем в каждой работе изучали один-два механизма ингибирования ФС2.

Целью работы являлось выявление условий, приводящих к аноксии и выделению водорода фотоавтотрофными культурами *Chlamydomonas reinhardtii* в условиях недостатка серы, азота или углерода.

У фотоавтотрофных культур микроводорослей при недостатке N в анаэробных условиях не наблюдалось выделения H_2. Изменение активности ФС2 было близким к изменению в культурах без лимитирования азотом. Для начала выделения H_2 требовался специальный режим освещенности. Реальный квантовый выход ФС2, хоть и испытывал скачкообразные изменения, но не снижался до 0. Разобщения водоокисляющего комплекса с реакционными центрами не наблюдалось. В случае недостатка C в разных режимах освещения не происходило накопления крахмала, в отличие от условий недостатка N, но поведение параметров флуоресценции и динамика содержания аскорбата были схожими. В случае недостатка S разобщение водоокисляющего комплекса и ФС2 имело место сразу после наступления анаэробиоза. Это подтверждается резким увеличением содержания аскорбата и возрастанием производной в точке J JIP кинетики. Падение активности ФС2 в фазе поглощения кислорода не связано с накоплением аскорбата или повышением Vj, dV/dt0, а обусловлено перевосстановлением пула пластохинонов.

Ключевым наблюдением является то, что выделение H_2 наблюдалась только в тех культурах, где происходило значительное перевосстановление пула пластохинонов. В тех случаях где не происходило быстрого перевосстановления пула пластохинонов, сопряженного с быстрым переходом культур в анаэробные условия, - H_2 не выделялся, несмотря на падение фотосинтетической активности.

Другие исследованные нами механизмы регуляции ФС2, по-видимому, играют вторичную роль и не оказывают определяющего влияния на выделение H_2. Накопление аскорбата при голодании также не коррелировало однозначно с выделением H_2.

Таким образом, наши данные позволяют заключить, что ключевым механизмом, определяющим выделение H_2 при недостатке серы или азота у *C. reinhardtii*, является перевосстановление пула пластохинонов, которое достигается при определенных условиях освещения на фоне подавления фотосинтеза. Другие исследованные механизмы играют меньшую роль.

Работа поддержана грантом РНФ 19-14-00255 и госзаданием 125051305944-7 (эксперименты культивирования микроводорослей при недостатке серы при постоянном режиме освещенности).

Влияние минерального голодания на фотосинтетический аппарат зеленой микроводоросли *Coelastrella affinis* IPPAS H-626

Заднепровская Е.В.[1*], Волошин Р.А.[1], Габриелян Д.А.[1], Синетова М.А.[1], Аллахвердиев С.И.[1,2]
[1]Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, г. Москва, Россия
[2]Институт фундаментальных проблем биологии ФИЦ ПНЦБИ РАН, г. Пущино, Московская область, Россия.
*e-mail: zadneprovskaya@ifr.moscow

Микроводоросли – перспективные источники ряда ценных метаболитов, однако для индуцирования синтеза некоторых целевых соединений часто требуется создание стрессовых условий, например, минерального голодания, в частности, азотного [1]. В то же время, влияние магниевого голодания на физиолого-биохимические параметры микроводорослевых культур исследовано недостаточно [2], несмотря на то, что Mg является одним из важнейших элементов растительных клеток.

Цель исследования – комплексное изучение воздействия минерального голодания на рост и функциональное состояние фотосинтетического аппарата зеленой микроводоросли *Coelastrella affinis* IPPAS H-626 [3]. Эксперименты проводились в лабораторной системе интенсивного культивирования [4] в течение 72 часов. Условия культивирования: среда – Tamiya1/2, Tamiya1/2-N, Tamiya1/2-Mg, освещенность 500 мкмоль фотонов$\cdot$м$^{-2}\cdot$с$^{-1}$, температура 30±0,5°C, аэрация стерильной газовой смесью с 1,5-2% CO_2.

Эффективность фотосинтеза оценивали флуориметрически (OJIP и NPQ) и полярографически (ячейка Кларка). С помощью вестерн-блота оценивали состояние ключевых белков фотосинтетического аппарата: PsbA, PetC, PsaA и RbcL.

Результаты исследования продемонстрировали существенное угнетение фотосинтетической активности при минеральном голодании. Наиболее выраженные изменения наблюдались при Mg-голодании: скорость выделения кислорода снизилась на 70%, при N-голодании – на 15%. Максимальный квантовый выход ФСII (Fv/Fm) значительно снизился при магниевом голодании до 0,37 отн.ед. (против 0,52 при азотном голодании и 0,75 в контроле). Эти данные коррелировали с деградацией D1-белка, подтвержденной вестерн-блотом. Рост показателя Phi_Do с 0,28 (контроль) до 0,48 (-N) и 0,63 (-Mg) свидетельствовал о критическом нарушении работы фотосистемы II: при минеральном голодании около 50% поглощенной энергии рассеивается в виде тепла и флуоресценции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №24-14-00033.

[1]. Ferreira V.S. et al. (2016). Low light intensity and nitrogen starvation modulate the chlorophyll content of *Scenedesmus dimorphus*, *Journal of Applied Microbiology*, 120 (3), 661–670.
[2]. Huang L. et al. (2014). Effects of additional Mg^{2+} on the growth, lipid production, and fatty acid composition of *Monoraphidium* sp. FXY-10 under different culture conditions. *Ann Microbiol*, 64, 1247–1256.
[3]. Krivina E. et al. (2024). The genus *Coelastrella* (Chlorophyceae, Chlorophyta): molecular species delimitation, biotechnological potential, and description of a new species *Coelastrella affinis* sp. nov., based on an integrative taxonomic approach. *Antonie van Leeuwenhoek*, 117, 113.
[4]. Габриелян Д.А. и др. (2023). Лабораторная система для интенсивного культивирования микроводорослей и цианобактерий. *Физиология растений*, 70(2), 202-213.

Биоэнергетику хлоропластов контролируют карбоангидразы?

Иванов Б.Н.*, Игнатова Л.К., Руденко Н.Н., Надеева Е.М., Маркин Р.В., Козулева М.А.
ФИЦ "Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук", Институт фундаментальных проблем биологии РАН.
*e-mail: ivboni@rambler.ru

Биоэнергетика хлоропластов включает трансформацию энергии света в пигментном аппарате фотосинтеза с возникновением молекул с очень низким редокс-потенциалом, трансформацию электрической энергии в фотосинтетической электрон-транспортной цепи (ФЭТЦ), сопровождающуюся генерацией протондвижущей силы (*pmf*) на мембранах тилакоидов и образованием восстановленного пиридиннуклеотида (НАДФН), синтез АТФ за счет энергии *pmf* и включение неорганического углерода в органические соединения за счет энергии АТФ и НАДФН.

Карбоангидразы (КА) –ферменты, катализирующие реакции гидратации углекислого газа и дегидратации бикарбоната: $CO_2(p) + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$, - многократно увеличивая константу скорости этих реакций.

Участие хлоропластных КА, - альфа-КА1, альфа-КА2, альфа-КА4, альфа-КА5 и бета-КА1, - в перечисленных процессах было обнаружено с помощью одиночных нокаутных мутантов по этим КА. В мутантных растениях происходило изменение величин нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла *a* листьев, т.е. диссипации энергии в тепло в пигментной антенне реакционных центров [1], квантового выхода фотосистемы 2, т.е. скорости переноса электронов по ФЭТЦ [1, 2], величины *pmf* или величин ее компонентов ΔpH и $\Delta\psi$ [3], скорости синтеза АТФ [4], скорости фиксации CO_2 вследствие влияния КА на подачу CO_2 к центрам карбоксилирования [1, 5]. Найдено, что отсутствие некоторых КА изменяет продукцию H_2O_2, сигнальных молекул, участвующих в регуляции размера светособирающих комплексов [1, 6].

Обсуждаются возможные механизм влияния карбоангидраз на указанные процессы.

[1]. Журикова Е.М., Игнатова Л.К., Руденко Н.Н., Мудрик В.А., Ветошкина Д.В., Иванов Б.Н. (2016) Участие двух карбоангидраз альфа семейства в фотосинтетических реакциях *Arabidopsis thaliana. Биохимия* 81, 1463 – 1470.
[2]. N.N. Rudenko, N.V. Permyakova, L.K. Ignatova, E.M. Nadeeva, A.A. Zagorskaya, E.V. Deineko, B.N. Ivanov (2022) The role of carbonic anhydrase αCA4 in photosynthetic reactions in *Arabidopsis thaliana* studied, using the Cas9 and T-DNA induced mutations in its gene. *Plants* 11, 3303.
[3]. Nadeeva E.M., Ignatova L.K., Rudenko N.N., Vetoshkina D.V., Naydov I.A., Kozuleva M.A., Ivanov B.N. (2023) Features of photosynthesis in *Arabidopsis thaliana* plants with knocked out gene of alpha carbonic anhydrase 2. *Plants*, 12, 1763.
[4]. Fedorchuk TP, Kireeva IA, Opanasenko VK, Terentyev VV, Rudenko NN, Borisova-Mubarakshina MM and Ivanov BN (2021) Alpha carbonic anhydrase 5 mediates stimulation of ATP synthesis by bicarbonate in isolated Arabidopsis thylakoids. *Frontiers in Plant Sciences* 12:662082.
[5]. Руденко Н.Н., Рупперт М.Ю., Игнатова Л.К., Надеева Е.М., Ветошкина Д.В., Иванов Б.Н. (2025) Особенности фотосинтеза растений *Arabidopsis thaliana* с нокаутом генов хлоропластных карбоангидраз αКА1 и βКА1. *Биохимия* (в печати).
[6]. E.M. Nadeeva, N.N. Rudenko, L.K. Ignatova, D.V. Vetoshkina, B.N. Ivanov (2025) Effect of the absence of α carbonic anhydrase 2 on the PSII light-harvesting complex size in *Arabidopsis thaliana*. *Plants*, 14, 1529.

Методологическая платформа фитохимического анализа: от поиска новых биологически активных веществ к перспективным фармацевтическим и нутрицевтическим препаратам

Орлова А.А.[1,2*], Соболева А.В. [1], Силинская С.А. [1,2], Цветкова Е.В. [3,4], Мешалкина Д.А.[5], Жихрева А.В. [1, 6], Мурашко Е.А.,[2,7] Алхаже К.[1], Лихачева О.В. [6], Редина В.В.[6], Трофимов И.А. [6], Бугеро Н.В. [6], Фролов А.А.[1,2,6]

[1]Лаборатория аналитической биохимии и биотехнологии, Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия
[2]Институт медицины и экспериментально биологии, Псковский государственный университет, Псков, Россия
[3]Кафедра биохимии Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[4]Отдел общей патологии и патологической физиологии Института экспериментальной медицины, Санкт-Петербург, Россия
[5]Междисциплинарная лаборатория нейробиологии Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия
[6]Институт живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
[7]Научно-исследовательская лаборатория метаболомного и метаболического профилирования НИО неизвестных, редких и генетически-обусловленных заболеваний НЦМУ «Центр персонализированной медицины» НМИЦ им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия
*e-mail: orlova@ifr.moscow

Фитохимия – это наука, изучающая химический состав растений. Ключевой областью применения ее практических результатов является создание высокоэффективных лекарственных препаратов на основе природных соединений растительного происхождения и экологически чистых средств защиты растений. На сегодняшний день, несмотря на высокий потенциал химического органического синтеза и широкое распространение получаемых с помощью этого подхода синтетических лекарственных препаратов, создание лекарственных кандидатов растительного происхождения не теряет актуальности. Это связано, в первую очередь, с необходимостью терапии сложных патологий. Кроме того, существенным преимуществом лекарственных препаратов на основе природных соединений является сочетание таких их качеств, как относительно высокой эффективности, комплексности воздействия и низкой вероятности проявления побочных эффектов.

Разработка лекарственных кандидатов на основе компонентов природного происхождения – это сложный и многостадийный процесс, включающий (*i*) отбор растений-кандидатов, перспективных в контексте применения в медицине, (*ii*) извлечение активных компонентов из растительного материала с использованием комбинации различных методов выделения - экстракции, фракционирования и хроматографической очистки, (*iii*) установление структуры выделенных компонентов с использованием комплекса физико-химических (в первую очередь, спектроскопических) методов, (*iv*) выявление/исключение биологической опасности экстрактов, а также полноценная характеристика профилей их биологической активности, (*v*) клинические испытания нового препарата растительного происхождения и (*vi*) регистрация препарата.

На базе Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН и Псковского государственного университета создана сетевая молодежная лаборатория Химии природных соединений и метаболомных исследований, основным направлением работы которой является глубокий фитохимический анализ объектов растительного и микробного происхождения и оценка перспективности использования природных соединений в качестве фармацевтических субстанций.

Работа выполнена при поддержке РНФ (№23-14-00383).

Иммобилизация водорослей *Chlamydomonas reinhardtii* в условиях одностадийного золь-гель синтеза

Филиппова Е.С.[1], Звонарев А.Н.[2], Терентьев В.В.[3], Лаврова Д.Г.[1*]
[1] Тульский государственный университет, Тула, Россия
[2] Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрябина РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований» РАН, Пущино, Россия
[3] Институт фундаментальных проблем биологии РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований» РАН, Пущино, Россия
*e-mail: daria.g.lavrova@gmail.com

В последнее время развиваются исследования, направленные на биотехнологическое использование микроводорослей, например, для получения различных нутриентов (сахаров, липидов, белков, каротиноидов), гликолиевой кислоты, используемой в дерматологии и косметике и даже капролактона, используемого для получения поликапролактоновых полимеров. Основные препятствия для коммерциализации продуктов из микроводорослей: высокая стоимость производства из-за медленных темпов роста, дорогостоящих сред, низкой плотности клеток в объеме и высоком риске их контаминации. Перспективным решением этих ограничений — использование иммобилизованных микроводорослей в условиях золь-гель синтеза. Однако применение матриц на основе соединений кремния имеют ряд недостатков. Во-первых, алкоксисилановые прекурсоры, например, тетраметоксисилан (ТМОС), плохо растворимы в воде, поэтому при классическом золь-синтезе применяются органические растворители, например, спирт, который выделяется и в ходе гидролиза. Во-вторых, осмотический стресс создается путем добавления кислот или оснований в качестве катализаторов. В-третьих, жесткость матриц вокруг клеток может ограничить или даже предотвратить пролиферацию. Основные пути решения этих проблем: - двухэтапный метод иммобилизации (сначала в альгинатную капсулу для снижения действия спиртов на клетки, а затем формирование вокруг клеток трехмерного карскаса кремнезема), - удаление спиртов, - использование ОРМОСИЛов или введение полимеров.

В работе в качестве исходных соединений предлагается использовать полиэтиленгликоляты (Si-ПЭГ) и глицеролаты кремния (Si-Глиц). В ходе гидролиза и поликонденсации этих соединений не выделяется спирт, что позволяет избежать введения дополнительных стадий иммобилизации. При этом отсутствует необходимость внесения в систему полимеров, поскольку подиэтиленгликолят и глицерол являются побочными продуктами синтеза. В качестве объектов иммобилизации использовали водоросли *Chlamydomonas reinhardtii* 137c (CC-125 mt+) WT, являющийся стандартным диким типом и обладающим полноценной клеточной стенкой. Методом сканирующей электронной микроскопии показано, что в независимости от используемого полиолатного исходного соединения кремния формируется фрактальная структура типа клетка водорослей в оболочке. При этом размеры частицы золя при использовании Si-Глиц меньше, чем при использовании Si-ПЭГ, что связано с большим числом гидроксильных связей в молекуле глицерола, и, как следствие, большим числом центров для инициации золь-гель синтеза и образования оболочки вокруг водорослей. Методом флуоресцентной микроскопии показано, что водоросли после инкапсулирования теряют свою жизнеспособность, что может быть связано с условиями культивирования водорослей и требует уточнений в дальнейшей работе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-24-20032, https://rscf.ru/project/24-24-20032/ и правительства Тульской области

Состав оксилипиновых карбонилов в различных компартментах хлоропласта

Хоробрых С.А.[1,3*], Iijima Y.[2], Shibata D.[3], Mano J.[1,4,5]
[1]Science Research Center, Yamaguchi University, Yamaguchi, Japan
[2]Kazusa DNA Research Institute, Chiba, Japan
[3]ФИЦ ПНЦБИ РАН, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Московская обл., Россия
[4]The United Graduate School of Agricultural Science, Tottori University, Tottori, Japan
[5]Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, Yamaguchi, Japan
[*]e-mail: khorobrykh@rambler.ru

Оксилипиновые карбонилы, образующиеся в результате распада липидных перекисей, играют разнообразные роли в растениях — в зависимости от типа молекулы и её концентрации, они могут выступать в качестве сигнальных молекул или цитотоксинов. Чтобы получить представление о процессе образования оксилипиновых карбонилов в хлоропластах, в данном исследовании был проведён анализ состава карбонилов в целом хлоропласте, тилакоидной мембране, оболочках и строме, а также произведена оценка локальных концентраций различных карбонильных соединений. Листья шпината содержали более 20 типов карбонилов, среди которых преобладали ацетальдегид, н-пентаналь и фенил ацетальдегид. В интактных хлоропластах, выделенных из листьев, были обнаружены (Z)-3-гексеналь, α,β-ненасыщенные карбонилы, такие как 4-гидрокси-(E)-2-гексеналь (HHE), а также насыщенные альдегиды, такие как формальдегид, пропиональдегид и бутиральдегид. Уровни этих оксилипиновых карбонилов варьировались от 0,1 до 36 нмоль/мг хлорофилла, что соответствует внутрипластидным концентрациям от 4 мкМ до 1 мМ. Также были обнаружены несколько неидентифицированных карбонилов, однако ацетальдегид, н-пентаналь и фенил ацетальдегид встречались в незначительных количествах. Тилакоиды, включая люмен, содержали все карбонилы, выявленные в целом хлоропласте, включая неидентифицированные соединения, на аналогичном уровне по отношению к хлорофиллу, что соответствует концентрациям от 30 мкМ до 3,6 мМ. Напротив, фракции стромы и оболочек содержали только С6-альдегиды, формальдегид, ацетальдегид и несколько неидентифицированных карбонильных соединений. Концентрации этих карбонилов составляли от 0,18 мМ до 7,8 мМ в оболочках и от 7 мкМ до 1,7 мМ в строме. Эти результаты позволяют предположить, что как тилакоиды, так и оболочки вносят вклад в образование С6-альдегидов, при этом тилакоидные мембраны являются основным источником.

Пул пластохинона и активные формы кислорода – важнейшие участники регуляции фотосинтетической активности высших растений

Борисова-Мубаракшина М.М.*, Ветошкина Д.В., Козулева М.А., Николаев А.А., Вильянен Д.В., Абдуллатыпов А.В., Пыхова Е.С., Руденко Н.Н., Иванов Б.Н.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН Федерального исследовательского центра «Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», г. Пущино, Московская область, Россия
*e-mail: mubarakshinamm@gmail.com

Пластохинон А (ПХ А) – мобильный переносчик электронов, функционирующий между фотосистемой 2 (ФС 2) и цитохромным b6/f комплексом в фотосинтетической электрон-транспортной цепи (ФЭТЦ). При этом пул пластохинона (ПХ пул) вовлечен и в систему альтернативных путей переноса электронов в ФЭТЦ, таких как реакция Мелера, т.е. фотовосстановление O_2 до пероксида водорода, циклический транспорт электронов вокруг ФС 1, ‘короткий’ водно-водный цикл, опосредованный функционированием пластидной терминальной оксидазы, а также хлородыхание. Уровень восстановления ПХ пула отражает уровень восстановления компонентов ФЭТЦ, представляя собой сигнал для структурно-функциональной реорганизации фотосинтетического аппарата и регуляции экспрессии генов в стрессовых условиях.

Активные формы кислорода (АФК), такие как пероксид водорода (H_2O_2) и синглетный кислород ($^1O_2$) в настоящее время также рассматриваются как обязательные участники регуляции структурно-функциональной организации компонентов клеток путем включения в сигнальные ретроградные пути. Физиологические функции АФК в большей степени зависят от их химических свойств, от места образования, а также от концентрации АФК в клетках фотосинтезирующих организмов. Существуют представления о кооперативном действии ПХ пула и АФК в сигнальных путях, однако механизм такого действия долгое время оставался неизвестным.

В пленарной лекции будут суммированы результаты, демонстрирующие роль ПХ пула и H_2O_2 в акклимационной регуляции экспрессии ядерных генов белков внешнего пигмент-белкового антенного комплекса ФС 2, приводящей к изменению размера антенны ФС 2, что регулирует фотосинтетическую функцию растений. Рассмотрены молекулярные механизмы данного ПХ/H_2O_2-зависмого ретроградного сигнального пути. Представлены свидетельства в пользу того, что регуляция размера антенны ФС 2 представляет собой один из универсальных механизмов адаптации растений к факторам абиотической и биотической природы.

Еще одним аспектом является то, что в стрессовых условиях в мембранах тилакоидов накапливаются окисленные производные ПХ А, гидроксипластохиноны или ПХ С – молекулы с одной или несколькими гидроксильными группами, возникшими в результате взаимодействия ПХ А с $^1O_2$. Нами показано, что накопление ПХ С в растениях приводит к снижению фотосинтетической активности, но при этом происходит активация сигнальных систем растений. Основываясь на экспериментальных данных и данных молекулярного докинга, предположено, что накопление ПХ С в тилакоидной мембране, в первую очередь, влияет на активность ФС 2, нежели на активности других компонентов ФЭТЦ, с которым взаимодействует ПХ, что, возможно, инициирует ПХ/$^1O_2$-зависимые пути ретроградной сигнализации в клетках растений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-14-00396); https://rscf.ru/project/23-14-00396/

State transitions: функция при действии абиотических стрессовых факторов

Ветошкина Д.В.*, Балашов Н.В., Рыжих Ю.С., Рашимова А.Д., Маркин Р.В., Иванов Б.Н., Борисова-Мубаракшина М.М.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН Федерального исследовательского центра «Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», г. Пущино, Московская область, Россия
*e-mail: vetoshkina_d@mail.ru

При изменении освещенности растений происходит оптимизация фотосинтетической деятельности на стадии поглощения энергии за счет изменения структурно-функциональных характеристик светособирающих антенных комплексов. Перераспределение поглощенной солнечной энергии между фотосистемами (ФС), известное как state transitions, является одним из механизмов краткосрочной адаптации. Первым шагом в этом процессе является активация киназы STN7, которая у высших растений фосфорилирует белки Lhcb1 и Lhcb2 внешней светоулавливающей антенны ФС 2 (ССК2), в то время как у одноклеточных зеленых водорослей STT7 киназа способна фосфорилировать все девять белков мажорной антенны ФС2. Фосфорилирование ССК2 STN7/STT7 киназой приводит к отсоединению ССК2 от ФС 2 и присоединению к ФС 1.

Целью данной работы было исследовать протекание state transitions в клетках зеленой одноклеточной водоросли *Chlamydomonas reinhardtii* и в высших растениях арабидопсиса и ячменя в нормальных условиях и при действии различных абиотических стрессовых факторов.

Установлено, что повышенная освещенность, а также другие стрессовые факторы разнонаправленно влияют на state transitions в клетках водоросли *C. reinhardtii* и высших растений. В работе показано, что в листьях высших растений повышенная освещенность, засоление и понижение концентрации углекислого газа приводят к ингибированию фосфорилирования белков Lhcb1 и Lhcb2, и, следовательно, к ингибированию state transitions. Напротив, state transitions выполняет важную роль в защите клеток зеленых водорослей от фотоингибирования в условиях повышенной освещенности и в условиях засоления, т.е. этот процесс не ингибируется. Различия в функционировании state transitions между организмами могут быть связаны с развитием дополнительных адаптационных механизмов у высших растений в ходе эволюции и снижением значимости этого процесса для высших растений по сравнению с зелеными водорослями.

Несмотря на то, что ингибирование state transitions у высших растений при высокой освещенности было неоднократно показано, детальный механизм этого ингибирования до сих пор остается предметом дискуссий. В данной работе показано, что существует корреляция между повышением содержания пероксида водорода в клетках растений и ингибированием протекания state transitions при действии всех исследуемых стрессовых факторов. При исследовании влияния добавки пероксида водорода к изолированным тилакоидам впервые обнаружено, что добавка H_2O_2 приводит к подавлению активности киназы STN7 при низкой освещенности, что раскрывает механизм ингибирования state transitions в высших растениях. Обнаруженный нами механизм ингибирования активности STN7 киназы H_2O_2 может являться универсальным механизмом при действии разных стрессовых факторов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-74-10088, https://rscf.ru/project/22-74-10088/.

DNP-INT и DBMIB как pH-чувствительные зонды для исследования цитохромного *b_6f* комплекса

Вильянен Д.В.*, Козулева М.А.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино, Россия
*e-mail: vilyadar@gmail.com

Цитохромный (цит.) *b_6f* комплекс – центральное звено регуляции электронного транспорта в тилакоидах высших растений. Несмотря на значительный прогресс в понимании механистических аспектов его функционирования, многое остается неясным, например, механизм чувствительности PQH_2-окисляющего (Qo-) сайта к pH люмена. В данной работе, проведенной на изолированных тилакоидах высших растений (шпинат, горох, арабидопсис), с помощью разработанных нами подходов применения конкурентных ингибиторов окисления PQH_2 в Qo-сайте, 2,4-динитрофенилового эфира 2-йодо-4-нитротимола (DNP-INT) и дибромтимохинона (DBMIB), мы исследовали чувствительность Qo-сайта цит. *b_6f* комплекса к pH люмена.

Мы показали, что сродство Qo-сайта к DNP-INT увеличивается при понижении pH люмена, в то время как к DBMIB – понижается. Одним из факторов, влияющих на сродство Qo-сайта к ингибиторам при изменении pH люмена, может быть протонированное состояние (H^+-состояние) АК, участвующих в связывании PQH_2 – E78 от суб. IV и H128 от железо-серного белка Риске, а также АК, участвующих в отводе H^+ от Qo-сайта – преимущественно, Asp и Glu H^+-выводящего канала от E78 (E-канала). Чтобы исследовать влияние H^+-состояния этих аминокислот, мы оценивали величины IC_{50} ингибиторов на постоянном свету и $\tau_{1/2}$ восстановления $P700^+$ в темноте после освещения тилакоидов в присутствии ингибиторов, модулируя отток H^+ от Qo-сайта различными подходами.

Мы использовали N,N-дициклогексилкарбодиимид (DCCD), ковалентно связывающий Asp и Glu, и валиномицин (Val), обеспечивающий экранирование отрицательных зарядов обращенных в люмен АК за счет переноса в люмен K^+. Все измерения проводились в присутствии GrD, что препятствовало закислению люмена, и таким образом, затруднение оттока H^+ обеспечивалось DCCD и Val за счет воздействия на Asp и Glu цит. *b_6f* комплекса. И DCCD, и Val немного понижали скорость электронного транспорта и скорость восстановления $P700^+$ в темноте после освещения, при этом их действие на DNP-INT и DBMIB позволило нам отделить их влияние на цит. *b_6f* комплекс от влияния на другие компоненты цепи. Так, мы показали, что IC_{50} для DNP-INT и DBMIB была ниже в присутствии DCCD, однако в присутствии Val IC_{50} была ниже только для DNP-INT. DCCD может влиять на конформацию Qo-сайта из-за ковалентной сшивки с Asp и Glu, в то время как Val за счет экранирования отрицательных зарядов с люменальной стороны замедляет ионизацию Asp и Glu, выстилающих E-канал, что увеличивает время жизни H^+-состояния E78, но не влияет на H128. Этим можно объяснить влияние Val на IC_{50} только для DNP-INT, но не для DBMIB, который связывается с H128.

Таким образом, мы показали, что регулирование оттока H^+ по E-каналу от E78 влияет на функционирование Qo-сайта. Учитывая, что именно связывание $PQH^\bullet$ с E78 и его последующее окисление является экзергонической стадией окисления PQH_2, полученные данные показывают важность исследования роли E-канала в функционировании цит. *b_6f* комплекса. Чувствительность связывания DNP-INT и DBMIB с Qo-сайтом к различным условиям позволяет использовать эти соединения не просто как ингибиторы электронного транспорта, но и как чувствительные зонды для исследования цит. *b_6f* комплекса.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-24-00597; https://rscf.ru/project/25-24-00597/).

Некоторые биохимические аспекты адаптации при изменении первичных процессов фотосинтеза у подроста ели европейской в ответ на лесохозяйственные мероприятия

Климова А.В.*, Галибина Н.А., Новичонок Е.В., Никерова К.М., Софронова И.Н.
Институт леса КарНЦ РАН, Петрозаводск, Российская Федерация
*e-mail: anna-uspenskaya96anna@yandex.ru

Проведение лесохозяйственных мероприятий с целью формирования высокопродуктивных насаждений может приводить к гибели подроста целевых древесных пород или резкому торможению его роста. Получение сведений об изменениях, происходящих в растениях на физиологическом и биохимическом уровнях, при смене условий внешней среды после рубок ухода, представляет большой интерес для понимания механизмов адаптации, роста и биологической устойчивости древесных пород. Оценка ответа на стрессовые условия проводилась в течении двух вегетационных сезонов после проведения лесохозяйственных мероприятий (рубок ухода и рубок верхнего яруса с сохранением подроста) на подросте *Picea abies* (L.) H.Karst. 12 и 20 лет.

Проанализированные параметры флуоресценции показали изменения на уровне акцептора электронов. Образовавшийся избыток электронов, вероятно, переключается на молекулярный кислород и тем самым генерируется одна из активных форм кислорода (АФК) – супероксид-анион (O_2^-). Так, на вторые сутки после рубки удалось определить краткосрочную реакцию фотосинтетического аппарата для 12-летних растений – содержание O_2^- в хвое текущего года снизилось относительно контроля, но уже через две недели было значимо выше. Эта реакция сопровождалась повышением активности супероксиддисмутазы (СОД), фермента, переводящего O_2^- в пероксид водорода. При этом отмечалось преобладание каталазного (КАТ) способа утилизации образовавшейся перекиси. Отклик на уровне работы антиоксидантной системы (АОС) у 20-летних растений был отмечен во втором вегетационный сезоне – снижением активности ферментов антиоксидантной системы (СОД, КАТ). Во втором вегетационном сезоне после проведения лесохозяйственных мероприятий была показана акклиматизация хвои к новым условиям среды на уровне АОС. [1,2,3]

Изменения в содержании сахарозы и ферментов, ее метаболизирующих, вероятно, повлекли функциональные изменения в донорно-акцепторных отношениях между надземными и подземными частями растений [4]. Таким образом, в связи с восстановлением активности биохимических реакций произошло увеличение приростов ксилемы и значений удельной проводимости флоэмы, что, вероятно, связано с более активным транспортом продуктов фотосинтеза.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН) и ВИПГЗ «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации …» (123030300031-6).

[1]. Sharma P. et al. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. Journal of botany. 1, 217037.
[2]. Mittler R. et al. (2022). Reactive oxygen species signaling in plant stress responses. Nature reviews Molecular cell biology, 23, 10, 663-679.
[3]. Gill S. S. et al. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Plant physiology and biochemistry, 48, 12, 909-930.
[4]. Koch K. (2004). Sucrose metabolism: regulatory mechanisms and pivotal roles in sugar sensing and plant development. Current opinion in plant biology,7, 3, 235-246.

Роль АТФ в защите фотосистемы I от фотоингибирования

Козулева М.А.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН – обособленное структурное подразделение ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований» РАН, Пущино, Россия
e-mail: marina.kozuleva@pbcras.ru

В условиях дисбаланса между поглощением световой энергии и её использованием в растениях происходит фотоингибирование реакционных центров фотосинтеза – фотосистемы II (ФСII) и фотосистемы I (ФСI). Фотоингибирование ФСI (ФИ(I)) наблюдается гораздо реже, чем фотоингибирование ФСII (ФИ(II)) – вследствие наличия эффективных механизмов, предотвращающих ФИ(I). При этом последствия ФИ(I) для растения гораздо опаснее, чем последствия ФИ(II) [1]. Многие авторы рассматривают, что ключевую роль в предотвращении ФИ(I) играет замедление окисления пластогидрохинона в цитохромном b6f-комплексе при понижении pH тилакоидного люмена (т.н. фотосинтетический контроль). Другая стратегия защиты ФСI основана на обеспечении оптимального протекания цикла Кальвина-Бенсона-Бассама, для чего необходим дополнительный синтез АТФ, не сопряженный с синтезом НАДФН. В хлоропластах АТФ используется еще и различными киназами для посттрансляционной модификации белков; в частности – STN7 киназой, которая структурно и функционально связана с цитохромным b6f-комплексом и основной мишенью которой являются белки светособирающего комплекса II (ССКII), который в зависимости от фосфорилированного состояния может находиться у ФСII или ФСI. В разных работах отмечали повышенное ФИ(I) как в мутантах арабидопсиса по STN7 киназе [2], так и по фосфатазе TAP38/PPH1, дефосфорилирующей белки ССКII [3].

Целью работы было установление роли STN7 киназы в предотвращении ФИ(I). В суспензии выделенных тилакоидов арабидопсиса индуцировали ФИ(I) путем освещения в отсутствие эффективных акцепторов электронов, что имитирует недостаточно эффективный отток в цикл Кальвина. Наличие АТФ способствовало меньшей потере активности ФСI в тилакоидах дикого типа и мутанта по TAP38/PPH1 фосфатазе, но не оказывало влияния в тилакоидах мутанта по STN7 киназе. Это означает, что защитное действие АТФ связано с активностью STN7 киназы, но не по отношению белков ССКII, поскольку в мутанте по TAP38/PPH1 фосфатазе эти белки практически не дефосфорилируются. Более того, в отсутствие АТФ разобщитель грамицидина Д, который практически уравнивает pH в среде снаружи тилакоидов и в люмене, т.е. предотвращает срабатывание фотосинтетического контроля в экспериментальных условиях, не влиял на степень ФИ(I). При этом в присутствии АТФ грамицидин Д усиливал ФИ(I), которого практически не было в отсутствие грамицидина Д. Это означает, что защитное действие фотосинтетического контроля по отношению ФСI зависит от наличия АТФ. Таким образом найден ранее неизвестный механизм, регулирующий срабатывание фотосинтетического контроля в качестве механизма, предотвращающего ФИ(I).

[1]. Lima-Melo et al. (2021) Photosystem I Inhibition, Protection and Signalling: Knowns and Unknowns. Frontiers in Plant Sciences, 12, 791124.
[2]. Grieco et al. (2012) Steady-state phosphorylation of light-harvesting complex II proteins preserves photosystem I under fluctuating white light, Plant Physiology, 160 (4), 1896–1910
[3]. Hepworth et al. (2021) Dynamic thylakoid stacking and state transitions work synergistically to avoid acceptor-side limitation of photosystem I, Nature Plants, 7 (1), 87–98

Умеют ли растения выводить кадмий из хлоропластов?

Лысенко Е.А.[1]*, Клаус А.А.[1], Карташов А.В.[1], Саввина Н.А. [1,2], Серегина И.Ф. [3]
[1]Институт физиологии растений РАН, Москва, Россия
[2]Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия
[3]Химический факультет МГУ, Москва, Россия
*e-mail: genlysenko@mail.ru

Кадмий является одним из самых токсичных для растений тяжелых металлов, который широко распространен в почве и водоемах. Большинство растений (исключатели) ограничивают поступление кадмия в надземную часть и в хлоропласты, чтобы защитить фотосинтетический аппарат от его воздействия. Тем не менее, в хлоропластах обнаруживается небольшое количество кадмия, достаточное для ингибирования отдельных белков в электрон-транспортной цепи. Остается неизвестным, умеют ли растения-исключатели применять вторую стратегию защиты – выводить кадмий из хлоропластов.

Для поиска этой стратегии мы применили ряд подходов. Сначала мы вырастили растения на среде с кадмием, а потом перенесли эти растения на среду без кадмия. Однако, после 6 дней роста на среде без кадмия, его содержание в хлоропластах не упало, а недостоверно увеличилось. После этого мы применили изотопно чистые соли кадмия, чтобы отличать кадмий, поступивший в начале, от кадмия, поступившего после. Для исключения специфичного эффекта изотопов, исследование проводилось в реципрокных парах $^{111}Cd/^{114}Cd$ и $^{114}Cd/^{111}Cd$. Растения ячменя выращивали 6 дней на среде с одним изотопом кадмия, затем переносили на 8 дней на среду с альтернативным изотопом кадмия. В результате, к концу эксперимента в первом настоящем листе ячменя удалось заместить ранее накопленный кадмий лишь на 40% «новым» изотопом. Суммарное содержание кадмия и в листе, и в хлоропластах оставалось примерно на одном уровне. В хлоропластах, количество ранее накопленного кадмия уменьшилось примерно на 25%. Это наблюдалось как в строме, так и в тилакоидах.

Очевидно, что при переносе на новую среду, огромное количество кадмия сохраняется в корнях и продолжает из них поступать в побег. Мы попробовали удалить корень, как основное депо ранее накопленного кадмия. Интактные растения выращивали на среде с «первым» кадмием, затем первый лист отрезали и ставили в раствор с альтернативным изотопом. В чистой среде листья стояли без видимых следов повреждений. В среде с уменьшенным содержанием кадмия (30 vs 80 мкМ) срезанные листья начинали быстро деградировать и поглощали очень малое количество кадмия. Однако, если в хлоропласты интактных растений попадало порядка 1% от кадмия в листе, то из небольшого количества кадмия, поступившего в срезанный лист, в хлоропластах обнаружено порядка 10%.

На основании этих экспериментов мы делаем осторожный вывод о существовании в хлоропластах растений-исключателей системы выведения кадмия. И планируем проведение экспериментов по поступлению кадмия в хлоропласты in vitro.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № №25-24-00009.

Фотосинтез и заморозки: роль стромальной α-карбоангидразы 1 в адаптации *Arabidopsis thaliana* к пониженной температуре

Надеева Е.М.*, Кочергина Е.Д., Рупперт М.Ю., Руденко Н.Н.
Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований РАН» − обособленное подразделение Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино, Россия.
*e-mail: zhurikova-alena@yandex.ru

Фотосинтез является одним из ключевых процессов, определяющих рост и развитие высших растений. Однако его эффективность значительно зависит от внешних факторов, в том числе температуры окружающей среды. Низкие температуры могут привести к нарушению функционирования фотосистем, замедлить ферментативные реакции и ограничить ассимиляцию CO_2. Карбоангидразы (КА) не только катализируют обратимую гидратацию CO_2, но и играют важную роль в регуляции фотосинтеза при стрессовых условиях. В данной работе изучено влияние нокаута гена стромальной α-карбоангидразы 1 (αКА1) на фотосинтетические характеристики *Arabidopsis thaliana* при холодовом стрессе.

Эксперименты проводили на растениях *A. thaliana* дикого типа (ДТ) и мутантных растениях с нокаутом гена *At3g52720*, кодирующим αКА1 (αКА1-КО). Растения выращивали в нормальных условиях 8 ч день/16 ч ночь при интенсивности света 50 мкмоль квантов $м^{-2}с^{-1}$ при 21°С, затем растения переносили в условия пониженной температуры, +6°С, без изменения условия освещенности и светопериода.

При нормальных условиях выращивания у растений αКА1-КО параметры OJIP: ABS/RC – характеризующий видимый размер антенны ФС2 и DIo / RC – общее количество энергии, рассеиваемой одним реакционным центром в виде тепла, были достоверно ниже, чем у растений ДТ. Параметры PI_{abs} и PI_{total} – индексы производительности были, наоборот, достоверно выше, чем в ДТ. При адаптации к холоду OJIP параметры снижались у всех растений, что указывает на снижение эффективности фотосинтеза, однако у мутантов снижение этих параметров было более существенным. Измерение параметров флуоресценции с помощью Dual-PAM 100 при нормальных условиях не выявило отличий между растениями, но при адаптации к холоду было обнаружено, что у растений αКА1-КО были выше эффективный квантовый выход ФС1, YNA, и NPQ, что свидетельствует о том, что в условиях холода отсутствие αКА1 приводило к лимитированию на акцепторной стороне ФС1 и большей необходимости рассеивать поглощенную энергию в тепло.

Содержание крахмала при нормальных условиях в мутантах было несколько выше, чем в ДТ. При адаптации к холоду в ДТ содержание крахмала значительно, в 3,6 раз возрастало, а в мутантах - только в 1,8 раз, что может свидетельствовать о нарушении регуляции углеводного обмена. При этом скорость ассимиляции CO_2 и при нормальных условиях и адаптации к холоду у растений αКА1-КО была на 10-20% выше, чем в ДТ.

Уровень экспрессии генов, кодирующих стромальные βКА1 и βКА5 в растениях ДТ и αКА1-КО, выращенных при нормальных условиях, почти не отличался, однако при адаптации к холоду уровень экспрессии генов *КА* демонстрировал тенденцию к изменению в направлении, отличавшемся от ДТ. Уровень экспрессии *βКА1.3+1.4* был на 40% ниже, а уровень экспрессии *βКА5*, наоборот, был выше на 30%, чем в ДТ. Интересно отметить, что уровень экспрессии *αКА1* в растениях ДТ при адаптации к холоду значительно снижался, по сравнению с нормальными условиями выращивания.

Нокаут αКА1 влияет на адаптацию к холоду *A. thaliana*, приводя к снижению эффективности фотосинтеза, нарушению углеводного обмена и перестройке экспрессии генов стромальных КА.

Роль сериновой протеазы в ретроградном механизме уменьшения размера антенны фотосистемы 2 в условиях избытка света у высших растений

Николаев А.А.*, Руденко Н.Н., Новичкова Н.С., Ветошкина Д.В., Борисова-Мубаракшина М.М.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН Федерального исследовательского центра «Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», г. Пущино, Московская область, Россия
*e-mail: nikolaevtolya@list.ru

Фотосистема 2 (ФС2) является первичным функциональным комплексом электрон-транспортной цепи в тилакоидных мембранах и наиболее чувствительным к фотоингибированию. В ходе эволюции в растениях было сформировано несколько механизмов защиты этой фотосистемы. Один из них – регуляция размера антенны ФС2. В основе такого механизма лежит селективный протеолиз Lhcb белков светособирающего антенного комплекса ФС2, который запускается уже после первых 24 часов на свету высокой интенсивности, при этом снижается экспрессия генов, кодирующих Lhcb белки.

Механизм транскрипционной регуляции белков Lhcb основан на ретроградной передаче сигнала из хлоропластов в ядро. Одним из компонентов такой регуляции является ядерный транскрипционный фактор ABI4. ABI4 специфически связывается с промоторными областями генов *lhcb1*, *lhcb2*, *lhcb3* и *lhcb6*, тем самым ингибируя экспрессию данных генов. Активация ABI4 осуществляется другим транскрипционным фактором – PTM, связанным с оболочкой хлоропластов. Растворимая форма PTM образуется в результате протеолиза трансмембранных доменов мембранной протеазой хлоропластов. Однако регуляция и возможный механизм активации этой протеазы у высших растений ранее не изучались. Поэтому актуальным становится вопрос, что активирует протеазу оболочки хлоропластов, необходимой для запуска механизма ретроградной регуляции размера антенны ФС2. Кроме того, дискутируемым остается и природа этой протеазы.

В настоящей работе было показано, что при добавлении пероксида водорода в небольших концентрациях происходит увеличение общей активности протеаз оболочки хлоропластов, что было оценено спектрофотометрически по уровню свободного тирозина после инкубации оболочки хлоропластов с раствором казеина в качестве субстрата. Для идентификации класса мембранной протеазы, оболочки хлоропластов также инкубировались с фенилметилсульфонилфторидом (PMSF) – селективным ингибитором сериновых протеаз. Было установлено, что инкубация оболочки хлоропластов с PMSF приводила к ингибированию H_2O_2-зависимой активации протеаз оболочки хлоропластов. Результаты, полученные в данной работе, свидетельствуют о том, что именно сериновые протеазы участвуют в ретроградной регуляции размера антенны ФС2. Кроме того, по результатам ПЦР в реальном времени было выявлено, что в листьях растений *A. thaliana*, произраставших в течение семи дней при высокой интенсивности света (500 мкмоль квантов $м^{-2}$ $с^{-1}$), на фоне подавления экспрессии *lhcb1*, *lhcb2*, *lhcb3* и *lhcb6* генов происходит увеличение экспрессии генов, кодирующих PTM и ABI4, и гена мембранной сериновой протеазы.

Таким образом, в данной работе показан механизм участия мембранной сериновой протеазы в регуляции размера светособирающего антенного комплекса ФС2.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-14-00396); https://rscf.ru/project/23-14-00396/

Изменение первичных процессов фотосинтеза у подроста ели после лесохозяйственных мероприятий и их связь с продуктивностью растений

Новичонок Е.В.*, Климова А.В., Галибина Н.А., Никерова К.М., Софронова И.Н., Тарелкина Т.В., Серкова А.А., Семенова Л.И.
Институт леса КарНЦ РАН, Петрозаводск, Российская Федерация
*e-mail: enovichonok@inbox.ru

С целью улучшения условий роста подроста ели европейской и формирования ценных еловых древостоев в странах северной Европы проводят различные лесохозяйственные мероприятия. Однако первоначальные реакции подроста ели на них могут включать снижение скорости роста, обесцвечивание и опадение хвои, гибель отдельных побегов или всего дерева, что вызвано резким изменением абиотических факторов среды (в первую очередь сильным увеличением освещенности). Мы оценили изменение первичных процессов фотосинтеза у подроста ели в течение двух вегетационных сезонов после проведения лесохозяйственных мероприятий (рубок ухода и рубок верхнего яруса с сохранением подроста).

Через сутки после проведения лесохозяйственных мероприятий при сохранении содержания хлорофиллов и размера светособирающего комплекса (ССК), что обеспечивает избыточный приток фотонов в РЦ ФС II в новых условиях среды, отмечали фотоингибирование у неадаптированной хвои (снижение *Fv/Fm*). Полученные данные (отсутствие K-шага, увеличение относительной переменной флуоресценции на O-J шаге, а также снижение Ψo, ФРо и ФЕо, сохранение доли активных КВК) указывают на то, что фотоингибирование ФС2 было вызвано повреждением акцепторной стороны ФС2 и на снижение транспорта электронов за пределы пластохинона Q_A. В течение первого вегетационного сезона отмечалось постепенное восстановление активности фотохимических процессов, в том числе за счет перестроек пигментного комплекса (снижение содержания Chl *a* и Chl *b* при одновременном увеличении доли каротиноидов). Анализ показателей флуоресценции (восстановление значений PI_{ABS} и ET_0/RC, более низкие значения *DIo/RC*) и OJIP-кривых, указывает на более быструю перестройку ФА к новым условиям хвои текущего года, по сравнению с хвоей первого года жизни, связанное с тем, что формирование и рост хвои текущего года жизни происходит уже в новых условиях среды. Спустя один вегетационный сезон после проведения лесохозяйственных мероприятий отмечали акклиматизацию хвои к новым условиям среды на уровне первичных процессов фотосинтеза (восстановление *Fv/Fm*, PI_{ABS}, увеличение *Y(II)* и *ETR*).

Восстановление активности фотохимических процессов привело к увеличению приростов ксилемы (результирующий показатель продуктивности) уже во второй вегетационный сезон после проведения лесохозяйственных мероприятий. Было высказано предположение о том, что в новых условиях среды спустя один вегетационный сезон после проведения лесохозяйственных мероприятий отмечаются функциональные изменения в донорно-акцепторных отношениях между надземными и подземными частями растений. В частности, происходило увеличение расчетных значений удельной проводимости флоэмы, что может быть связано с более активным транспортом фотосинтатов в корневые системы.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН) и ВИПГЗ «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации …» (123030300031-6).

Роль фитохромов в регуляции метаболизма плодового и ультраструктуры хлоропластов в листьях томата при различных соотношениях красного и дальнекрасного света

Пашковский П.П.[1*], Верещагин М.В.[1], Абрамова А.А.[1], Воронков А.А.[1] , Халилова Л.А.[1], Фролов А.А.[1,2], Креславский В.Д.[3]
[1] Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия
[2] Институт биохимии растений им. Лейбница, кафедра биоорганической химии, Галле, Германия
[3]ФИЦ ПНЦБИ РАН, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Московская обл., Россия
*e-mail: pashkovskiy.pavel@gmail.com

Спектральный состав света регулирует метаболизм томата (*Solanum lycopersicum*) через фитохромы, которые координируют углеводный обмен, антиоксидантную активность и структурные характеристики хлоропластов [1,2]. В этой работе дикий тип и мутантные линии (*phya, phyb1, phyb2, phyab2 и phyab1b2*) изучались при различных соотношениях красного и дальнего красного света (RL:FRL).

При RL:FRL=1:2 мутант *phyb2* показал 17-кратное снижение содержания сахарозы в плодах, что было связано с подавлением гликолиза. В этих условиях уровень АТФ снижается и активность фосфофруктокиназы снижалась, что ограничивает поток углерода в цикл Кальвина. Напротив, при RL:FRL=2:1 в *phyb2* содержание рибулозо-1,5-бисфосфата увеличилось в 41 раз, а аскорбиновой кислоты — в 18 раз, что указывает на активацию цикла Кальвина и усиление антиоксидантной защиты за счет аскорбатпероксидазы.

Вторичный метаболизм также зависит от соотношения RL:FRL. При RL:FRL = 1:1 у мутанта *phyab2* экспрессия гена *PAL* увеличилась в 4,8 раза, что сопровождалось увеличением уровня хлорогеновой кислоты на 63%, что указывает на увеличение фенилпропаноидного пути. У мутанта *phya* при RL:FRL=2:1 накопление флавоноидов снизилось, что было связано с подавлением *FLS*.

Ультраструктурный анализ показал, что в *phya* при повышенных уровнях FRL уменьшался ламеллярный просвет, а хлоропласты становились агранальными, что снижало их фотосинтетическую эффективность. В *phyb2* при RL:FRL=1:1 наблюдалось накопление крахмала из-за дисбаланса между фиксацией CO_2 и транспортом ассимилятов. Еще более выраженное накопление крахмала наблюдалось у мутанта *phyab1b2* .

Эти результаты демонстрируют важную роль фитохромов в регуляции метаболизма и ультраструктуры хлоропластов. Оптимизация спектрального состава света открывает возможности для управления пищевой ценностью и сроком хранения томатов [3].

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (проект № 23-14-00266).

[1.] Pham V. et al. (2018). Phytochromes and phytochrome interacting factors. Plant Physiol. 176, 1025-1038.
[2]. Bi X. et al. (2024) Investigating the influence of varied ratios of red and far-red light on lettuce (Lactuca sativa): effects on growth, photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence. Front. Plant Sci. 15:1430241.
[3]. Waters M. et al. (2008). GLK transcription factors regulate chloroplast development in a cell-autonomous manner. Plant J. 56, 432-444.

Влияние катионного антисептика октенидина на кривые роста, абсорбционные и флуоресцентные характеристики клеток зеленой водоросли *Scenedesmus quadricauda*

Пащенко В.З.*, Лукашев Е.П., Воронова Е.Н., Максимов Е.Г., Нокс П.П., Страховская М.Г., Горячев С.Н., Конюхов И.В., Погосян С.И.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
*e-mail: vz.paschenko@gmail.com

В настоящее время широкое и часто бесконтрольное применение антисептиков приводит к всё возрастающему попаданию этих агентов в окружающую среду. В то же время ранее, на препаратах фотосинтетических мембран и изолированных из них фототрансформирующих белково-пигментных комплексов из фотосинтезирующих пурпурных бактерий, цианобактерий, высших растений мы показали, что катионные антисептики хлоргексидин, пиклоксидин, мирамистин, октенидин могут оказывать деструктивное воздействие на процессы преобразования световой энергии при фотосинтезе [1,2]. Из этих агентов наибольшее влияние оказывал октенидин. В настоящей работе мы исследовали эффекты октенидина на интактные клетки пресноводной зеленой микроводоросли *Scenedesmus quadricauda*. Этот вид широко распространен в природе и является типичным объектом для биоиндикации и биотестирования.

Культивирование альгологически чистой культуры водорослей проводили при непрерывном облучении светодиодными лампами интенсивностью 30 мкМ квантов/м^{2}с в накопительной культуре на среде BG-11. Затем суспензию водорослей помещали во флаконы, добавляли октенидин в концентрации от 1 мкМ/л до 50 мкМ/л и вновь помещали в культиватор. По мере роста водорослей регистрировали спектры поглощения, спектры флуоресценции и возбуждения флуоресценции, индукционные кривые, а также кинетики затухания флуоресценции на пико-наносекундной шкале.

Сравнение результатов исследования позволило установить механизмы влияния антисептика октенидина на функциональные свойства фотосинтетического аппарата. В частности, установлена пороговая концентрация октенидина, при которой клетки микроводорослей могут поддерживать способность к росту. Определены критические мишени, которые в первую очередь восприимчивы к повреждающему действию октенидина. Так, данный антисептик нарушает взаимодействие антенных белково-пигментных комплексов с комплексами фотосинтетических реакционных центров, молекул хлорофилла с белковым носителем, а также связь хинонных акцепторов электрона с белком D1 фотосистемы II.

Исследование выполнено в рамках научного проекта государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (проект № 121032500058-7).

[1]. Пащенко В.З. и др. (2024). Влияние Катионных Антисептиков на Спектральные Характеристики и Транспорт Электрона в Изолированных Фотосинтетических Комплексах Фотосистем I и II. Биофизика, 69, № 3, 515–526.
[2]. Knox P.P. et al. (2024). The Infuence of Cationic Antiseptics on the Processes of Light Energy Conversion in Various Photosynthetic Pigment-protein Complexes. Photosynt. Res., 161, 5–19.

Активность липоксигеназы связана с адаптацией фотосинтетического аппарата пшеницы к водному дефициту

Пермякова М.Д.*, Пермяков А.В.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений, Иркутск, Россия
*e-mail: marperm@rambler.ru

Пшеница является одной из наиболее важных продовольственных культур в мире, однако засуха приводит к потере до 40% ее урожая. В определении продуктивности растений центральную роль играет фотосинтез, который значительно зависит от достатка воды. Известно, что продукты метаболических путей ЛОГ участвуют в процессах газообмена и фотосинтеза в условиях засухи [1, 2, 3]. Нашей задачей было изучение влияния активности ЛОГ на газообмен и фотосинтез в условиях водного дефицита у двух контрастных по засухоустойчивости сортов яровой мягкой пшеницы.

Были изучены активность ЛОГ и девять параметров газообмена и флуоресценции хлорофилла в листьях устойчивого к засухе сорта Саратовская 29 (С29) и чувствительного к засухе сорта Янецкис Пробат (ЯП). Растения выращивали в контролируемых условиях вегетационной камеры при оптимальном водном режиме и в условиях смоделированной почвенной засухи до стадии кущения. Представлены средние значения пяти вегетаций.

Устойчивый к засухе сорт С29 отличался высокими уровнями значений активности ЛОГ, параметров газообмена и флуоресценции хлорофилла в контрольных условиях и их стабильностью в условиях засухи.

Чувствительный к засухе сорт ЯП при оптимальном водном режиме показывал уровень активности ЛОГ более, чем в 2 раза ниже, чем С29. Газообмен и скорость фотосинтеза были несколько выше, чем устойчивого сорта. По уровню значений параметров флуоресценции хлорофилла С29 и ЯП статистически значимо не различались.

В условиях водного дефицита у сорта ЯП наблюдали трехкратное увеличение активности ЛОГ. Эффективность использования воды увеличивалась на 21% за счет снижения скорости транспирации на 26% и устьичной проводимости на 31%. Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла (NPQ) снижалось на 16%, увеличивая эффективность использования световой энергии. Адаптивные изменения этих параметров способствовали сохранению нетто-фотосинтеза, потенциальной квантовой эффективности, фотохимического квантового выхода и скорости электронного транспорта в фотосистеме II в условиях засухи.

Изменения параметров газообмена и NPQ под влиянием засухи у ЯП были обратно пропорциональны изменениям активности ЛОГ, свидетельствуя об участии этого фермента в адаптации фотосинтетического аппарата пшеницы сорта ЯП к водному дефициту.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России для ФГБУН Сибирского института физиологии и биохимии растений Сибирского отделения РАН (№ проекта– 0277-2022-0006, Рег.№ НИОКТР –122041100049-0). Было использовано оборудование ЦКП “Биоаналитика” Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН.

[1]. Savchenko T. et al. (2014). Functional convergence of oxylipin and abscisic acid pathways controls stomatal closure in response to drought. Plant Physiology, 164(3), 1151–1160.
[2]. Savchenko T. et al. (2017). The hydroperoxide lyase branch of the oxylipin pathway protects against photoinhibition of photosynthesis. Planta, 245, 1179–1192.
[3]. Xu B.-Q. (2022). *SlMYC 2* mediates stomatal movement in response to drought stress by repressing *SlCHS 1* expression. Frontiers in Plant Science, 13, 952758.

Влияние электрических сигналов на фотосинтетические параметры и устойчивость пшеницы к засухе при предварительной обработке абсцизовой кислотой

Попова А.Ю.*, Сухова Е.М., Сухов В.С., Юдина Л.М.
ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
*e-mail: SilverKumiho@mail.ru

В природных условиях на растения воздействуют многочисленные неблагоприятные факторы: перепады температуры, почвенная засуха и др. У растений имеются способы передачи информации между частями организма, для их адаптации к неблагоприятным условиям. Электрические сигналы (ЭС) являются одним из способов, они влияют на многие физиологические процессы, включая фотосинтез, и тем самым, вероятно, повышают устойчивость растительного организма к стрессорам. Известно, что обработка растений абсцизовой кислотой (АБК), также способна повысить устойчивость к стрессорам, и возможно, менять порог генерации ЭС. Таким образом, целью работы стал анализ влияния предварительной обработки АБК на генерацию ЭС, фотосинтетическую активность и устойчивость растений в условиях полива и засухи.

Исследования проводились на мягкой яровой пшенице (*Triticum aestivum* L.), выращенной в лабораторных условиях при 24ºС и 16-часовом световом дне. Для контрольных растений производился систематический полив, для генерации почвенной засухи полив прекращался. В качестве локально действующего стимула, приводящего к генерации ЭС, использовалась комбинация умеренного нагрева и синего света. Электрическая активность регистрировалась с помощью макроэлектродов и усилителя ИПЛ-113. Измерение параметров фотосинтеза проводилось с использованием PAM-флуориметра Open FluorCam. В отдельной серии экспериментов производилось предварительное опрыскивание растений фитогормоном АБК для проверки модификации ответов растения.

Было показано, что ЭС были направлены в основном в сторону гиперполяризации, а также выявлено небольшое положительное влияние АБК на распространение ЭС как в условиях полива, так и в условиях засухи.

При оценке действия ЭС на фотосинтетические показатели, такие как квантовый выход фотосистемы II (YII) и нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла (NPQ), было показано, что при поливе комбинированное воздействие приводило к снижению YII вблизи от места воздействия. При предварительной обработке АБК наблюдалось достоверное изменение этого показателя по сравнению с растениями без стимуляции. При засухе наблюдалось достоверное снижение YII на расстоянии 3 и 5 см от места воздействия. Обработка АБК также способствовала изменениям этого параметра. В случае NPQ было показано, что достоверно, как при поливе, так и засухе, наблюдалось увеличение на расстоянии 3 и 5 см от зоны стимуляции. Обработка АБК увеличивала достоверность изменений. Предварительная обработка АБК при засухе формировала более выраженные изменения фотосинтетических параметров.

При совместном использовании действия ЭС и обработки АБК наблюдались значительные достоверные изменения как общей, так и сухой биомассы растений на момент окончания засухи, по сравнению с растениями без стимуляции и без обработки. Изменения сухой биомассы были достоверны как в отношении растений без сигнала и обработки АБК, так и в отношении растений без сигналов с обработкой АБК. Это позволяет предположить, что совместное действие предобработки АБК с распространением ЭС способствует сохранению воды в растениях при засухе, способствуя адаптации растений к меняющимся условиям окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-74-10088.

Влияние выключения синтеза карбоангидраз стромы хлоропластов αКА1 и βКА1 на фотосинтез в растениях *Arabidopsis thaliana*

Руденко Н.Н.*, Рупперт М.Ю., Надеева Е.М., Игнатова Л.К., Ветошкина Д.В., Иванов Б.Н.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН Федерального исследовательского центра «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», Пущино, Московская обл., Россия
*e-mail: nataliacherry413@gmail.com

Карбоангидразы (КА) – ферменты, катализирующие обратимую гидратацию углекислого газа с образованием бикарбоната, значительно увеличивая скорость реакций в обоих направлениях. В высших растениях разных видов насчитывается от 4 до 79 генов, кодирующих КА, относящиеся к трем семействам – α, β и γ, расположенные в различных компартментах растительной клетки. Существующие предположения о роли КА стромы хлоропластов С3-растений касались их возможного участия в ускорении поступления CO_2 в хлоропласты, а также в преобразовании HCO_3^-, основной формы неорганического углерода в условиях слабощелочного pH стромы при освещении, в CO_2, субстрат реакции карбоксилирования рибилозобисфосфата в цикле Кальвина-Бенсона-Бассема (цКББ). Тем не менее, ни одно из этих предположений не является доказанным.

Участие КА стромы хлоропластов, αКА1 и βКА1, в функционировании фотосинтетического аппарата *Arabidopsis thaliana* было исследовано с использованием мутантов с нокаутированными генами *At3g01500* и *At3g52720*, кодирующими βКА1 и αКА1 (αКА1-КО и βКА1-КО), соответственно, выращенными при низкой (НС, 50-70 мкмоль квантов $м^{-2}с^{-1}$) и при высокой интенсивности света (ВС, 400 мкмоль квантов $м^{-2}с^{-1}$). Скорость ассимиляции CO_2, определенная в условиях возрастания интенсивности света в камере измерения от 50 до 1600 мкмоль квантов $м^{-2}с^{-1}$ была ниже в мутантных растениях обеих линий, чем в ДТ, при 400 мкмоль квантов $м^{-2}с^{-1}$ и выше. Устьичная проводимость при этом была существенно выше в αКА1-КО и βКА1-КО, чем в ДТ, что может объясняться увеличенным содержанием устьиц на листовой поверхности мутантных растений, по сравнению с ДТ. Вероятно, это является одним из механизмов компенсации мутантными растениями отсутствия стромальных КА. Обнаружено также, что уменьшенная скорость ассимиляции CO_2 в мутантных растениях, по сравнению с ДТ, сопровождается пониженным содержанием CO_2 в хлоропластах βКА1-КО, но не αКА1-КО. В последних оно было таким же, как в ДТ, что позволяет предполагать, что снижение, по сравнению с ДТ, скорости ассимиляции CO_2 в βКА1-КО происходило по причине недостаточной скорости поступления неорганического углерода в хлоропласты, тогда как в αКА1-КО причина меньшей, чем в ДТ, скорости ассимиляции CO_2 состояла в недостаточной интенсивности превращения стромального HCO_3^- в CO_2 для обеспечения потребностей цКББ. Об этом свидетельствуют и различия в величинах ΔpH на тилакоидной мембране в этих мутантах – в βКА1-КО этот параметр был выше, чем в ДТ, что, может определяться более высоким, чем в ДТ, pH стромы в условиях недостаточного поступления CO_2. Кроме того, это подтверждается полученными нами данными о том, что в протопластах, а также в хлоропластах, выделенных из αКА1-КО, происходило вдвое более быстрое, по сравнению с теми же препаратами из ДТ, достижение стационарного уровня фотосинтеза, определяемое по скорости выделения ими кислорода. K_m этой реакции в хлоропластах ДТ составляла 2.0 мМ HCO_3^-, а в хлоропластах из αКА1-КО K_m оказывалась близка 1.0 мМ HCO_3^-, т.е. соответствующие значения скорости выделения кислорода при достижении стационара в хлоропластах из ДТ были вдвое выше, чем в αКА1-КО.

Влияние теплового шока на редактирование хлоропластной мРНК ndhB

Саввина Н.А.[1,2]*, Лысенко Е.А.[1]
[1]Институт физиологии растений РАН, Москва, Россия
[2]Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия
*e-mail: savnat04@gmail.com

Редактирование РНК в хлоропластных генах – это посттранскрипционная модификация, в ходе которой нуклеотиды C переходят в U в результате дезаминирования. Это приводит к замене одной аминокислоты на другую и в дальнейшем может влиять на функциональность белка. В транскрипте редактируются лишь единичные нуклеотиды, но это оказывается важным для жизни растения. Так, в отсутствие редактирования единственного сайта в гене psbF, кодирующего субъединицу 6 фотосистемы II, наблюдается общее замедление развития растения, а также снижение содержания хлорофилла в листьях и высокая флуоресценция хлорофилла [1]. Общее ингибирование редактирования РНК хлоропластных генов приводит к появлению мутантного фенотипа, вообще не способного к биосинтезу хлорофилла [2].

Был проведен пробный эксперимент по изучению влияния теплового шока (ТШ) на редактирование РНК пластидного гена ndhB, кодирующего субъединицу 2 НАДН-дегидрогеназа-подобного комплекса и содержит один интрон и шесть сайтов редактирования РНК. Мы проанализировали пять из них.

Для анализа семидневные проростки кукурузы помещали в термостаты и выдерживали еще двое суток при температуре 24, 37, 42 или 46 ℃. Затем из листьев выделяли хлоропластную РНК и синтезировали кДНК. ПЦР-продукты гена ndhB, разделяли на форезе на сплайсированные и несплайсированные, элюировали, секвенировали и сравнивали высоту пиков T и C при разных температурах, а также в сплайсированных и несплайсированных транскриптах. Пик T соответствует отредактированному нуклеотиду, пик C – неотредактированному.

Пробный эксперимент показал, что ТШ в различной степени влияет на редактирование мРНК ndhB. Сайты 2 и 4 оставались полностью отредактированными всегда; сайт 1 полностью редактировался в сплайсированном варианте и только слабо ингибировался в несплайсированном; редактирование сайтов 3 и 5 при ТШ заметно подавлялось в сплайсированном продукте и очень сильно - в несплайсированном.

Таким образом, можно предполагать, что одной из причин угнетения роста и развития растений при высокой температуре является нарушение процессов редактирования РНК в хлоропластных генах. Остается открытым вопрос, через какие механизмы тепловой шок подавляет редактирование РНК и почему какие-то сайты остаются полностью отредактированными даже при высоких температурах. Мы планируем развивать эту работу, в том числе с использованием большего числа хлоропластных генов, содержащих сайты редактирования РНК.

[1]. Bock R., Kössel H., Maliga P. Introduction of a heterologous editing site into the tobacco plastid genome: the lack of RNA editing leads to a mutant phenotype //The EMBO journal. – 1994. – Т. 13. – №. 19. – С. 4623-4628.
[2]. Takenaka M. et al. Multiple organellar RNA editing factor (MORF) family proteins are required for RNA editing in mitochondria and plastids of plants //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2012. – Т. 109. – №. 13. – С. 5104-5109.

Роль фоторецепторов в ответных реакциях фотосинтетического аппарата при действии света высокой интенсивности

Строкина В.В.*, Ширшикова Г.Н., Креславский В.Д.
ФИЦ ПНЦБИ РАН, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Московская обл., Россия
*e-mail: strokina.93@mail.ru

Известно, что спектральный состав света влияет на фотосинтез, рост и продуктивность растений действуя через систему фоторецепторов, таких как фитохромы (PHY), которые являются датчиками отношения красного света (КС) к дальнему красному (ДКС) и криптохромы (CRY), которые являются датчиками синего света и УФ-А. Однако в литературе имеется мало данных по выяснению роли отдельных фоторецепторов и путей ответных реакций фотосинтетического аппарата на действие света высокой интенсивности (СВИ) [1, 2, 3].

В работе использованы одинарные, двойные и тройные мутанты томата с дефицитом PHYB1 и PHYB2 и CRY1. Растения выращивали на белом свету, затем подвергали кратковременному (2,4 и 24, 48 ч) действию СВИ.

Анализировали скорость фотосинтеза, активность фотосистемы 2, которую оценивали, на основе параметров таких как PI_{ABS}, Fv/Fv и Y(II), содержание различных пигментов листа, в частности каротиноидов и флавоноидов, оценивали про-антиоксидантный баланс и экспрессию ключевых свето-регулируемых генов.

Обнаружено что среди одинарных мутантов томата при действии СВИ *Cry1*мутант наиболее чувствителен к СВИ, а среди двойных и тройных мутантов томата - мутант *PhyAPhyB1Cry1*. Сделан вывод, что CRY1 является ключевым в ответной реакции на СВИ. Предполагается, что это связано с пониженной общей пероксидазной активностью и с низким уровнем листовых пигментов, в частности каротиноидов и антоцианов, у мутантов с дефицитом CRY1 по сравнению с диким типом и другими мутантами. Наши данные свидетельствуют о том, что фитохромы вместе с CRY1 также контролируют экспрессию генов таких как *sAPX, tAPX, psbA, psbD* и *rbcL*, а также ключевого фактора транскрипции *HY5.* Снижение экспрессии последнего может быть одной из причин высокой чувствительности их фотосинтетического аппарата к СВИ.

Мы предположили, что влияние тех или иных фоторецепторов на фотосинтетические и другие процессы зависит от света различного спектрального состава, в частности от соотношения КС/ДКС. С этой целью мы проанализировали влияние дефицита фитохромов B1, B2 и CRY1 на фотосинтетические процессы в условиях СВИ (4ч и 48ч), томатов выращенных при нескольких соотношениях КС/ДКС =0,29;0,89, 1,67, а также без ДКС. Оказалось, что устойчивость ФА, в частности ФС2 к СВИ 4ч при всех соотношениях была самой низкой у *cry1* и в отличии от других мутантов мало зависела от соотношения КС/ДКС, что свидетельствует о ключевой роли CRY1 в различных спектральных условиях. После длительного облучения СВИ при преобладании в спектре КС и дефиците CRY1 устойчивость к СВИ не отличалась от дикого типа и фитохромных мутантов. По-видимому, в этом случае происходит усиление защитных процессов за счёт восстановления повреждений фотосинтетического аппарата.

Работа была поддержана грантом РНФ № 25-14-00037.

[1]. Vladimir D. Kreslavski, Los D.A. et al. (2018). The impact of the phytochromes on photosynthetic processes. BBA - Bioenergetics 1859: 400–408.
[2]. Kreslavski V.D., Strokina V.V. et al. (2020) Deficiencies in phytochromes A and B and cryptochrome 1 affect the resistance of the photosynthetic apparatus to high-intensity light in *Solanum lycopersicum*. J. Photochem. Photobiol. B: Biol. 210, 111976
[3]. Carvalho R.F. et al. (2011). The role of phytochrome in stress tolerance. J. Integr. Plant Biol. 53: 920–929.

Признаки структуры кроны дерева для исследования площади поверхности листовых пластинок

Телевинова М.С.[1]*, Антонова И.С.[2]
[1]Обсерватория экологической безопасности, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
*e-mail: m_s_t@list.ru

Площадь листовой поверхности в настоящее время – один из основных критериев первичной фотосинтетической продуктивности отдельных растений и фитоценозов [1]. Известно, что у древесного растения характеристики листовой поверхности в кроне сильно варьируют [2]. У дерева, как у длительно существующего многолетнего организма, структура кроны определяет расположение фотосинтезирующей поверхности текущего и последующих вегетационных сезонов [3] Размер и форма листовой пластинки связаны с пространственно-временной структурой кроны и свойства этой связи в настоящее время еще не раскрыты. Современные подходы к решению прогностических задач при исследовании древесных растений требуют уточнения расчетов общей фотобиомассы на основе четкого представления о структуре кроны дерева определенного вида [4; 5].

Исследована площадь поверхности листовых пластинок побегов виргинильных и ранних генеративных деревьев трех видов рода *Ulmus* L.: *U. glabra* Huds., *U. campestris* L., *U. parvifolia* Jacq. Выделен комплекс важнейших структурных признаков побега, определяющих свойства листовой поверхности: 1) положение на материнском побеге предыдущего года; 2) положение многолетней оси на инициальном побеге предыдущего порядка ветвления; 3) возраст олиственного побега в составе оси; 4) порядок ветвления оси, к которой относится побег, в составе ветви от ствола. При анализе листовой поверхности побега необходимо также учитывать положение ветви на стволе.

Для трех видов рода, отличающихся морфологическими, экологическими и филогенетическими качествами, проведено сравнение с учетом структурных признаков побегов, выявлены характерные для них видовые особенности листовой поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках исследовательского проекта 123042000071-8

[1]. Уткин А.И. и др. (2008) Площадь поверхности лесных растений сущность, параметры, использование. Ин-т лесоведения РАН. М.: Наука, 292 с.
[2]. Avalos G. (2023) Specific leaf area (SLA) serves as a proxy to predict total carbon content in understory individuals of the neotropical canopy palm *Socratea exorrhiza*. Trees, V. 37(6), pp. 1831–1840.
[3]. Антонова И.С. и др. (2024) К вопросу о строении кроны древесного растения. Трансформация экосистем, Т. 7(4), С. 50–68.
[4]. Галицкий В.В. (2010) Секционная структура дерева. Модельный анализ вертикального распределения биомассы. Журнал общей биологии, Т. 71(1), С. 19–29.
[5]. Романовский М.Г. (2009) Листовой индекс в исследовании продукционного процесса лесов / Продукционный процесс и структура лесных биогеоценозов: теория и эксперимент. М.: Тов-во. науч. изд. КМК, 350 с.

Особенности переменной флуоресценции хлорофилла в коре клёна ясенелистного

Тихонов К.Г.*, Савченко Т.В.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино, Россия
*e-mail: ktikhonov@rambler.ru

Клён ясенелистный (*Acer negundo*) происходит из Северной Америки, в настоящее время в России стал опасным нарушителем растительных сообществ. Некоторые инвазивные растения в своей агрессивной стратегии в значительной степени полагаются на стеблевой фотосинтез. В настоящей работе изучалась фотосинтетическая активность в зелёных тканях коры клёна ясенелистного методом переменной флуоресценции хлорофилла. Кора у клёна ясенелистного может долго сохранять зелёный цвет и способность к фотосинтезу (более 5 лет при затенении). Показано, что переменная флуоресценция в коре сильно зависит от времени года и условий освещения, тогда как возраст коры оказывает меньшее влияние. Обнаружены существенные различия между внешним и внутренним слоями коры по скорости восстановления фотосинтетической активности после зимовки и по отношению к яркому свету.

Работа поддержана грантом РНФ № 24-16-00142.

Отрицательная роль жасмоновой кислоты в устойчивости пшеницы к избыточному свету

Хоробрых А.А.[1], Дегтярёв Е.А.[1], Пиголев А.В.[1], Мирошниченко Д.Н.[2], Долгов С.В.[2], Савченко Т.В.[1*]
[1]ФИЦ ПНЦБИ РАН, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Московская обл., Россия
[2]Филиал Института биоорганической химии им. М.М. Шемякина и А.В. Овчинникова Российской академии наук, Пущино, Россия
*e-mail: savchenko_t@rambler.ru

Описывается отрицательная роль экзогенно нанесенных и эндогенно продуцируемых жасмонатов в устойчивости гексаплоидных растений пшеницы сорта Саратовская-60 к избыточному освещению. Существенного влияния жасмонатов на параметры переменной флуоресценции хлорофилла не наблюдается в условиях умеренного и слабого освещения, но при высокой интенсивности света отрицательное влияние жасмонатов проявляется как на листьях, обработанных метилжасмонатом (MeJA), так и трансгенных растениях Tr-20, сверхэкспрессирующих ген биосинтеза жасмонатов *12-ОКСОФИТОДИЕНОАТРЕДУКТАЗЫ 3* (*AtOPR3*) из *Arabidopsis thaliana*. Анализ быстрой кинетики флуоресценции хлорофилла с высоким временным разрешением (тест OJIP) показал, что двухчасовая инкубация листьев растений на фотоингибиторуюшем свету вызывает заметные изменения кинетики OJIP вызывая понижение значений кинетических переходных точек J, I и P, причем эти изменения выражены гораздо ярче в листьях, обработанных MeJA и Tr-20. Последующая двухчасовая инкубация при слабом освещении приводит к почти полному восстановлению кинетики OJIP в листьях сорта Саратовская-60 не обработанных MeJA, тогда как в листьях обработанных MeJA и Tr-20 растений наблюдается лишь частичное восстановление. Выявлена роль жасмонатов в модуляции уровня других стрессовых гормонов, абсцизовой и салициловой кислот, в процессе адаптации листьев пшеницы к условиям высокой освещенности. Предполагается, что вызванная жасмонатом восприимчивость фотосинтетического аппарата к избыточному свету может быть опосредована повышением уровня абсцизовой кислоты и снижением уровня салициловой кислоты. Полученные данные закладывают основу для дальнейших исследований сложных взаимодействий фитогормонов в листьях пшеницы в условиях светового стресса.

Фотосинтетическая активность как маркер физиологического состояния Bryobiotina в стрессовых условиях

Часов А.В.[1, 2]*, Онеле А.О.[1, 2], Большакова Д.А.[2], Викторова Л.В.[1], Лексин И.Ю.[1], Минибаева Ф.В.[1, 2]
[1]Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия
[2]Казанский государственный университет, Казань, Россия
*e-mail: chasov@kibb.knc.ru

Bryobiotina – подцарство несосудистых растений, включающее отделы антоцеротовидных, печеночников и мхов. Большинство представителей подцарства являются экстремофилами, способными выживать в чрезвычайно неблагоприятных условиях среды. Мох *Dicranum scoparium* имеет непрерывный градиент старения, который включает верхний (фотосинтетический), средний (стареющий) и нижний (разлагающийся) слои вдоль своего акрокарпного гаметофита. Для мха *Hylocomium splendens* характерно ярусное строение в виде цепочки однолетних побегов, где рост новой ветви начинается сразу же с середины прошлогодней ветви. Установлено, что энергетический статус мхов, определяемый по фотосинтетическим параметрам (максимальной эффективности фотосинтеза (F_V/F_M), скорости переноса электронов по фотосистеме II (ETR) и нефотохимическому тушению), зависит от возраста гаметофитов и их физиологического состояния, детектируемого по активности белков и генов. Показано, что мхи *H. splendens* и *D. scoparium* могут длительное время (более 5 лет) находиться в состоянии ангидробиоза и восстанавливать свои фотосинтетические параметры до нормального уровня после регидратации. Обнаружено, что замораживание побегов *H. splendens* при –20°C, а также ступенчатое замораживание при –20°C/–80°C не является повреждающим воздействием на гидратированный мох, поскольку при последующем его переносе в оптимальные условия происходит быстрое восстановление фотосинтетических параметров. Напротив, длительное тепловое воздействие (40°C) на гидратированный побег или таллом Bryobiotina является повреждающим. При 1 ч воздействии t° в 40°C устойчивость Bryobiotina, детектируемая по восстановлению фотосинтетических параметров, увеличивается в ряду *Marchantia sp.* < *Anthoceros natalensis* < *D. scoparium*. Установлено, что критическим для побегов мха *D. scoparium* является 1 ч воздействие t° в 45°C, поскольку негативные последствия воздействия на энергетический статус мха сохранялись в течение трех суток. Показано, что при быстром обезвоживании над силикагелем значительная потеря жидкости (до 7% относительного содержания воды, ОСВ) из таллома *A. natalensis,* в отличие от побегов *D. scoparium*, приводит к гибели растения: изменяется цвет гаметофита, происходит потеря тургора при последующей регидратации, появляется неприятный запах, не восстанавливаются фотосинтетические параметры. Вероятно, что в таких условиях жизнеспособными остаются лишь спорофиты, поскольку они имели высокие, на уровне нормы, показатели фотосинтетических параметров. При этом обнаружено, что менее значительная потеря жидкости (до 22% ОСВ) из таллома *A. natalensis* при быстром обезвоживании над силикагелем не имеет значительного негативного воздействия на растение, так как происходит восстановление F_V/F_M и ETR до контрольных значений в течение 12 ч при последующей регидратации. Установлено, что изоферменты пероксидаз принимают участие в регуляции уровня активных форм кислорода в гаметофитах *A. natalensis, D. scoparium* и *H. splendens*. Вероятно, что пероксидазы наряду с другими антоксидантными ферментами, преобладающими белками позднего эмбриогенеза, малыми светоиндуцируемыми белками, белками теплового шока и осмопротекторами играют центральную роль в защите клеток Bryobiotina при обезвоживании и других стрессах.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-24-00615.

Влияние дополнительного дальнего красного света на фотосинтетические и ростовые параметры растений салата и устойчивость фотосинтетического аппарата к свету высокой интенсивности

Шмарев А.Н.*, Креславский В.Д.
ФИЦ ПНЦБИ РАН, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Московская обл., Россия
*e-mail: bioximik-04@rambler.ru

Воздействие света различного спектрального состава на фотосинтетический аппарат (ФА) и многие другие системы растений регулируют различные клеточные фоторецепторы, прежде всего рецепторы УФ-А и синего – криптохромы и фототропины и красного света - фитохромы. Воздействие фитохромов во многом реализуется в природе через изменение соотношения красного света (КС) к дальнему красному (ДКС). При этом положительное влияние ДКС и оптимального соотношения КС-ДКС может быть связано как с оптимизацией работы фотосистем и усилением фотосинтеза листьев расположенных в условиях тени за счет дополнительного ДКС, так и с влиянием ДКС на фитохром-индуцированные фотоморфогенетические процессы [1,2,3]. Однако дополнительный ДКС может как усилить, так и снизить скорость фотосинтеза и фотосинтетического электронного транспорта. Мы предположили, что в условиях преобладания более коротковолнового света (синий и зеленый свет) при выращивании растений салата дополнительный ДКС может увеличить активность ФС2, но снизить устойчивость фотосинтетического аппарата к СВИ.

В этой связи было изучено влияние дополнительного дальнего красного света (ДКС) на параметры фотосинтеза и роста растений Lactuca sativa, выращиваемых в течение 30 дней, а также на фотосинтетическую активность этих растений при высокой интенсивности излучения (СВИ; 4 ч, 1500 мкмоль (фотонов) $м^{-2}$ $с^{-1}$). Растения выращивались под цветными светодиодами при соотношении красный свет (КС):синий свет (СС):зеленый свет (ЗС):дальний красный свет (ДКС) = 0.7:1:0.3:0.4 или КС:СС:ЗС:ДКС = 0.7:1:0.3:0.8 (эксперимент). Дополнительный ДКС приводил к увеличению биомассы растений, высоты и площади листьев, а также активности ФС2, оцениваемой по параметрам флуоресценции PI_{ABS} и Fv/F_M, но к снижению скорости фотосинтеза и дыхания в расчете на единицу площади. Сделан вывод, что наблюдаемое увеличение биомассы в основном обусловлено увеличением площади листьев, а не увеличением скорости фотосинтеза. Кроме того, ФС2 в эксперименте с дополнительным ДКС была менее устойчива к СВИ. Рассматриваются возможные прямое и косвенное влияние ДКС на рост, фотосинтез и ФС2 и анализируются возможные причины обнаруженных нами эффектов действия ДКС.

Таким образом, добавление ДКС к спектру источника излучения, при выращивании салата влияет на фотохимию ФС2, фотосинтез и рост растений, увеличивая индекс производительности ФС2 (PI_{ABS}) и биомассу, но снижает устойчивость этой фотосистемы к СВИ.

[1]. Лисина Т.Н., Четина О.А., Парфенкова В.А., Бурдышева О.В., Шолгин Е.С.2024. Влияние соотношения красного и дальнего красного света на рост, содержание пигментов и интенсивность фотосинтеза у кресс-салата. Физиология растений. 71(3):292-298.
[2]. Shomali et al. 2024. The crosstalk of far-red energy and signaling defines the regulation of photosynthesis, growth, and flowering in tomatoes. Plant Physiol. Biochem. 208(6):108458.
[3]. Zhen et al. 2021.Far-Red Photons Should Be Included in the Definition of Photosynthetic Photons and the Measurement of Horticultural Fixture Efficacy. Front. Plant Sci. 12: 693445.

Распространяющиеся низкоамплитудные электрические сигналы и их роль в регуляции фотосинтеза и устойчивости пшеницы к почвенной засухе

Юдина Л.М.*, Попова А.Ю., Сухова Е.М., Сухов В.С.
ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
*e-mail: lyubovsurova@mail.ru

В природе на растения действуют многочисленные факторы внешней среды, которые требуют механизмов быстрой адаптации. Такими механизмами, обеспечивающие скоординированную регуляцию физиологических процессов являются сигнальные системы. Известно, что фотосинтез обеспечивает накопление биомассы растений и, следовательно, играет ключевую роль в их жизни. Считается, что электрические сигналы с большой амплитудой (потенциал действия, вариабельный потенциал) обеспечивают экстренную сигнальную связь и системный ответ у растений, вызывая множество физиологических откликов и повышая их устойчивость. Недавние результаты показали, что подобную роль могут также играть низкоамплитудные электрические сигналы, которые возникают при действии на растения умеренных стрессоров, поэтому целью работы стал анализ роли таких сигналов в регуляции фотосинтеза и адаптации растений к условиям окружающей среды.

Исследования проводили на пшенице, выращенной на почвенном субстрате с контролируемым поливом, при индукции почвенной засухи полив прекращали. Электрические сигналы вызывали умеренным нагревом и освещением кончика листа, в отдельной серии экспериментов использовали локальное повышение давления. Электрическую активность регистрировали экстраклеточно с помощью хлорсеребряных макроэлектродов. Измерение параметров фотосинтеза (нефотохимическое тушение флуоресценции и квантовый выход фотосистемы II) проводили с использованием PAM-флуориметра Open FluorCam.

Было показано, что локальная стимуляция умеренным нагревом и освещением вызывала электрические сигналы у пшеницы, направленные как в сторону деполяризации, так и в сторону гиперполяризации, амплитуда составляла около 10-15 мВ. Распространение таких сигналов вызывало достоверное возрастание нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ) и снижение квантового выхода фотосистемы II (YII) вблизи зоны стимуляции, по мере увеличения расстояния эффект инактивации фотосинтеза исчезал. При умеренной засухе распространение сигнала вызывало увеличение ответа фотосинтеза: сильное возрастание NPQ на расстояниях 5, 7 и 9 см и снижение YII на расстояниях 5 и 7 см от зоны стимуляции. Сильная засуха приводила к подавлению как электрических сигналов, так и ответов фотосинтеза.

Локальное умеренное повышение давления приводило к распространению гиперполяризационных сигналов, а сильное повышение – к появлению деполяризационных электрических сигналов, вызывая достоверные изменения NPQ и YII. Такие данные подтверждают гидравлический механизм распространения низкоамплитудных электрических сигналов.

Было показано, что индукция электрических сигналов и развитие фотосинтетических ответов на фоне умеренной засухи способствовала более высокому итоговому уровню биомассы растений и содержанию фотосинтетических пигментов на момент окончания засухи. Такие данные показывают положительное влияние выявленных сигналов на устойчивость пшеницы при адаптации к почвенной засухе.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-74-10088.

Влияние света с разным соотношением КС/ДКС на фотосинтетические и ростовые параметры салата и его устойчивость к свету высокой интенсивности

Иванов А.А.*, Шмарев А.Н.
Институт фундаментальных проблем биологии, Пущино, Россия
*e-mail: demfarm@mail.ru

Фитохромы играют ключевую роль в регуляции многих физиологических процессов, участвуя в сложных перекрестных сетях процесса развития растения и его взаимодействия с окружающей средой [1]. Данная работа посвящена исследованию роли фитохрома в адаптации растений к свету высокой интенсивности (СВИ). С этой целью растения салата выращивали в климатической камере при постоянной температуре 24–26 °C, относительной влажности 40–45%. Использовали светодиодное освещение с интенсивностью 200 мкмоль·м$^{-2}$·с$^{-1}$ в (12 ч свет/12 ч темнота) в 4^{x} вариантах с различным соотношением красного и дальнего красного света (КС/ДКС =1,72; 0,86 и 0,23) и ДКС=0. В возрасте 30 дней растения облучали СВИ (1000 мкмоль·м$^{-2}$·с$^{-1}$) в течение 4 ч и анализировали изменение фотосинтетических и биохимических параметров растения. Скорость фотосинтеза (Pn), транспирации и проводимости устьиц (E и Gs) были наибольшими при высоком соотношении КС/ДКС и снижались при повышении доли ДКС в спектре облучения. Параметры, отражающие активность фотосистемы 2 (PI_{ABS}, Fv/Fm и Y(II)), также показывали подобную закономерность. Величина диссипации поглощенной энергии в тепло NPQ оставалась неизменной во всех вариантах, кроме варианта КС/ДКС = 1,72. Активность антиоксидантных ферментов и содержание МДА были наименьшими при отсутствии ДКС в спектре облучения растений. Увеличение доли ДКС приводило к повышению содержания МДА и активности ферментов. Действие высокой интенсивности света приводило к повышению содержание Хл (а+в) при КС/ДКС=0.86, но снижению Pn, E и Gs (кроме варианта КС/ДКС=1.72), особенно заметному в вариантах с высокой долей ДКС. При этом устойчивость ФС2 к СВИ была самой низкой при отсутствии ДКС и его избытке. В этом случае, не наблюдалось заметного изменения величин PI_{ABS}, Fv/Fm и Y(II), кроме варианта с минимальным значением КС/ДКС. Действие света высокой интенсивности приводило к повышению накопления МДА и увеличению активности антиоксидантных ферментов. При этом, количество МДА и активность пероксидазы зависели от доли ДКС в спектре облучения и были наибольшими при соотношении КС/ДКС=1.72. Активность СОД изменялась незначительно. Максимальные значения накопления сырого и сухого веса листьев, корней, высота растений и площадь листьев наблюдались при КС/ДКС=1.72. Отсутствие ДКС, а также высокое отношение КС/ДКС, отрицательно влияли на ростовые показатели растений.

[1]. Han et al. (2019). Light Primes the Thermally Induced Detoxification of Reactive Oxygen Species During Development of Thermotolerance in Arabidopsis. Plant Cell Physiol. 60, 230–241.

Реакция фотосинтетического аппарата растений пшеницы на изменение соотношения КС/ДКС в спектре облучения растений

Кособрюхов А.А.[1*], Худякова А.Ю.[1], Любимов В.Ю.[1], Прянишников А.И.[2]
[1]Институт фундаментальных проблем биологии ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пущино,Россия
[2]Щелково Агрохим, Россия
*e-mail: kosobr@rambler.ru

В естественных условиях растения подвергаются воздействию света различной интенсивности и спектрального состава. Соотношение спектральных участков света 660/730 колеблется от 1,6 до 0,6 в различные периоды дня, изменяется в процессе вегетации [1], а также ценотического взаимодействия растений [2]. В этой связи реакция растений на действие света во многом находится под фитохромным контролем. Целью работы было выяснение физиолого-биохимических механизмов определяющих реакцию фотосинтетического аппарата на спектральный режим облучения. В работе исследовали реакцию фотосинтетического аппарата трех сортов пшеницы *(Triticum aestivum* L) – Изумруд Дубовицкого, Система, Ермоловка на действие света различного спектрального состава. Растения выращивали при 200 мкмоль квантов/м^2 с использованием светодиодов синего, зеленого и красного света без включения дальнего красного света в спектр облучения, а также при различном соотношении КС/ДКС: 1,62; 0,84; 0,22 на фоне общей облученности в области ФАР. Определение скорости фотосинтеза, дыхания, активности реакции карбоксилирования, а также скорости регенерации РБФ и утилизации триозофосфатов, рассчитанные по модели [3], показало, что отсутствие или наоборот значительное повышение доли ДКС в спектре облучения растений приводит к снижению скорости процессов. При низких значениях фотосинтеза уменьшения скорости утилизации триозофосфатов может происходить за счет снижения восстановление ФГК до триозофосфатов и их использования в последующих реакциях. Определение активности ферментов окислительной фазы гликолиза и восстановительной фазы ВПФЦ у растений пшеницы показало повышение активности НАДФ и НАД-зависимого ФГА-дегидрогеназного комплекса в хлоропластах и цитозоле при низком соотношении КС/ДКС в спектре облучения. Различия в реакции растений пшеницы, различающихся по скороспелости и хозяйственным признакам, связаны с изменением активности РБФК/О и скорости регенерации РБФ, а не с влиянием на активность световой стадии фотосинтеза – фотосистему два или устъичного аппарата. Полученные данные свидетельствуют о включения фоторецепторного регулирования активности физиологических процессов, позволяют подойти к оценке сортовых особенностей пшеницы с учетом изменение соотношения КС/ДКС в спектре облучения растений по регионам выращивания.

[1]. Шульгин И.А. (1973) Растение и солнце. Л.: Гидрометеоиздат. 1973. 251 с.
[2]. Devlin, P.F. (2016) Plants wait for the lights to change to red. PNAS, 113, 7301-7303.
[3]. Farquhar G.D., von Caemmerer S., Berry J.A. (1980) A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 plants, Planta, vol. 149, p. 78.

Улучшение вкусовых и ароматических характеристик базилика душистого (*Ocimum basilicum* L.) с использованием наночастиц оксида магния

Семенова Н.А.[1], Захаров Д.А.[1*], Степанова Е.В.[1], Саримова С.Р.[1]
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
*zaharov121221@mail.ru

Растущий спрос на пряную зелень и экстракты эфиромасличных растений в медицине, косметологии и пищевой промышленности требует повышения эффективности существующих методов их получения. Городское сити-фермерство позволяет получать продукцию с заданными свойствами, однако из-за несовершенства спектра освещения и технологий выращивания растения в искусственных условиях содержат меньше эфирных масел [1].

Применение внекорневых обработок наночастицами в невысоких концентрациях способно провоцировать небольшой стресс, существенно не влияющий, а в некоторых случаях и стимулирующий рост растений, повышая урожайность, и способствовать усиленному синтезу вторичных метаболитов, увеличивая накопление эфирных масел и улучшая вкус и аромат выращиваемых культур. В частности, установлена важная роль мезокомпонента - Mg для стимулирования выработки эфирных масел. Известно, что наночастицы стимулируют биосинтез вторичных метаболитов, отвечающих за вкус и аромат пряных растений. Наночастицы магния показали свою эффективность для стимулирования роста растений, эффективности фотосинтеза таких растений как *Vigna unguiculata* (L.) Walp., *Phaseolus vulgaris* L. [3]. Магний входит в состав хлорофилла, и содержащие его удобрения повышают продуктивность фотосинтеза растений, что может приводить к росту биомассы и разбавлению концентрации эфирных соединений, поэтому необходимо четко определить оптимальные концентрации его применения.

В опыте исследовано действие наночастиц оксида магния, полученных методом лазерной абляции, внесенных путем внекорневых обработок в концентрациях 25, 50, 75, 100, 150 и 200 мг/л на рост, содержание пигментов и вторичный метаболизм базилика душистого (*Ocimum basilicum* L.) сорта ‘Хаки’. Было установлено, что оптимальной концентрацией, стимулирующий наибольший рост растений, была концентрация 75 мг/л, при которой количество листьев было увеличено на 33%, сырая масса – на 28%, высота растений – на 18%, сухая масса – на 17%. Содержание антоцианов при этом было увеличено на 6%, а хлорофилла- в 2 раза. Однако, содержание эфирных масел при такой концентрации существенно не изменилось. Высокие концентрации наночастиц 150 и 200 мг/л оказали существенное влияние на концентрацию эфирных масел (увеличение на 19 и 61,5% соответственно), концентрация хлорофиллов была выше на 71 и 44% по сравнению с контролем, однако показатели роста существенно не отличались от необработанных растений.

В работе впервые исследовано применение наночастиц оксида магния, синтезированных методом лазерной абляции, для стимуляции синтеза ароматических веществ у базилика, выращенного в гидропонных условиях.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-26-00361

[1]. Johnson C.B., Kirby J., Naxakis G. and Pearson S. Substantial UV-B-mediated induction of essential oils in sweet basil (Ocimum basilicum L.) // Phytochemistry. – 1999 - Vol. 51 – P.507-510.
[2]. Paul, B.K., Saleh-e-In, M.M., Hassan, S.M.M., Rahman, M.Z., Saha, G.C., Roy, S.K. Chemical composition and biological activities of Carum roxburghianum Benth. (Radhuni) seeds of three Bangladeshi ecotypes / Journal of essential oil bearing plants, 2013 Vol.16(2), pp.201-211. https://doi.org/10.1080/0972060X.2013.793983.

Эмбриональный фотосинтез: механизмы и функции

Смоликова Г.Н.[1*], Степанова Н.В.[2], Камионская А.М.[2], Медведев С.С.[1]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[2]Институт биоинженерии им. К.Г. Скрябина ФГУ ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Россия
*e-mail: g.smolikova@spbu.ru

Большинство исследований, посвященных разработке подходов к повышению продуктивности сельскохозяйственных растений, сосредоточены на анализе процессов фотосинтеза на уровне листа. Однако в других органах растений на свету также могут синтезироваться хлорофиллы, формироваться хлоропласты и осуществляться *нелистовой* фотосинтез. К нелистовому типу фотосинтеза относят процессы, происходящие в формирующихся семенах с зеленым зародышем (т.н. эмбриональный фотосинтез) [1].

Лимитирующей особенностью эмбрионального фотосинтеза является то, что из-за экранирования покровными тканями проникающий к зародышу свет обогащен зеленой и дальней красной частью спектра на фоне низкой интенсивности в синей и красной областях [2]. Нами впервые установлено, что достигающий зародышей зеленый свет может компенсировать низкое количество синего и красного света, и таким образом повышать количество энергии, необходимой для осуществления фотохимических реакций [3].

Важно, что основным источником углерода в фотосинтезирующих клетках зародышей служит не CO_2 воздуха, а поступающая из материнского растения сахароза, которая в процессе гликолиза превращается в пируват и далее в ацетил-КоА с выделением CO_2. Синтезирующиеся в световых реакциях НАДФН и АТФ расходуются на превращение ацетил-КоА в жирные кислоты, а CO_2 связывается с рибулозо-1,5-бисфосфатом при помощи РуБисКО.

Мы показали, что в семядолях гороха экспрессируются гены *Cpn60α* и *Cpn60β* (кодируют шаперонины, которые объединяют в комплекс большие субъединицы РуБисКО), *RCA* (кодирует активазу РуБисКО) и *PRK* (кодирует фосфорибулокиназу) [4]. Интересно, что *Cpn60α и Cpn60β* демонстрировали в семядолях такой же уровень экспрессии как в листьях, тогда как экспрессия *RCA* и *PRK* была значительно ниже. Предполагается, что для формирующих семян, по-видимому, достаточно только начальных этапов цикла Кальвина, связанных с фиксацией CO_2 и образованием восстановленных триоз, которые используются на синтез жирных кислот [5]. Благодаря этому уникальному пути снижается потеря CO_2 и возрастает доступность ацетил-КоА для биосинтеза жирных кислот.

Таким образом, наличие эмбрионального фотосинтеза обеспечивает альтернативные метаболические пути, которые позволяют семенам с зеленым зародышем более эффективно утилизировать углерод, поступающий из материнского растения в виде сахарозы.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-16-00215.

[1]. Смоликова, Медведев (2016) Фотосинтез в семенах хлороэмбриофитов. Физиология растений, 63, 3–16.
[2]. Смоликова и др. (2023) Фотохимическая активность формирующихся семядолей гороха (*Pisum sativum* L.) зависит от светопропускания покровных тканей и спектрального состава света. Вавиловский журнал генетики и селекции, 27, 980–987.
[3]. Stepanova et al. (2024) Green light drives embryonic photosynthesis and protein accumulation in cotyledons of developing pea (*Pisum sativum* L.) seeds. Agronomy, 14, 2367.
[4]. Stepanova et al. (2024) Non-foliar photosynthesis in pea (*Pisum sativum* L.) plants: beyond the leaves to inside the seeds. Plants, 13, 2945.
[5]. Schwender et al. (2004) Rubisco without the Calvin cycle improves the carbon efficiency of developing green seeds. Nature, 432, 779–782.

Выявление механизмов влияния зеленого света на эффективность эмбрионального фотосинтеза растений гороха (*Pisum sativum* L.)

Степанова Н.В.[1*], Жилкина Т.А.[1], Билова Т.Е.[2], Тараховская Е.Р.[2], Фролова Н.В.[3], Фролов А.А.[3], Медведев С.С.[2], Камионская А.М.[1], Смоликова Г.Н.[1,2]
[1]Институт биоинженерии им. К.Г. Скрябина ФГУ ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[3]Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия
*e-mail: nv.stepanova@fbras.ru

Важной задачей сельского хозяйства является получение качественного посевного материала. При этом формирование качественных семян начинается уже в процессе их созревания и во многом зависит от эффективности фотосинтетических процессов. Хорошо известно, что фотосинтез, который происходит в листьях, обеспечивает формирующиеся семена сахарозой и другими ассимилятами. Однако, у многих видов растений фотосинтетические процессы могут также происходить в тканях плодов (перикарпий, кожура, семядоли) [1].

Объектом нашего исследования являлись созревающие семена гороха сорта Глория. Установлено, что достигающая семядолей фотохимически активная радиация характеризовалась высокой долей зеленого и дальнего красного света, при этом синий свет отсутствовал, а количество красного света составляло не более 2% [2]. Мы выдвинули гипотезу, что зеленый свет может компенсировать низкое количество красного и синего света, тем самым повышая количество световой энергии, используемой зародышами в процессе эмбрионального фотосинтеза. Растения выращивали в световой установке, освещаемой синими и красными светодиодами (модуль КС) и синими, красными и зелеными светодиодами (модуль КЗС). На средней стадии созревания семян оценивали фотохимическую активность листьев, перикарпия, кожуры и семядолей с применением PAR-FluorPen FP 110 (PSI, Чехия) по OJIP протоколу производителя. Показано, что фотохимическая эффективность была выше в семядолях, созревающих в присутствии зеленого света [3]. При этом зрелые семена, сформированные в модуле КЗС, содержали на 15% больше белка и отличались более высоким уровнем орнитина, триптофана, аргинина и аспарагиновой кислоты.

Также нами проведен анализ экспрессии генов, кодирующих белки-регуляторы активности РуБисКО, такие как *Cpn60α* и *Cpn60β* (кодируют шаперонины, которые объединяют в комплекс большие субъединицы РуБисКО), *RCA* (кодирует активазу РуБисКО) и *PRK* (кодирует фосфорибулокиназу) в листьях и нелистовых тканях растений гороха [4]. Установлено, что экспрессия *Cpn60α* была выше в семядолях, сформированных в присутствии зеленого света. Полученные результаты позволяют выявить роль зеленого света в регуляции фотосинтеза у формирующихся семян с зеленым зародышем.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

[1]. Смоликова, Медведев (2016) Фотосинтез в семенах хлороэмбриофитов. Физиология растений, 63, 3–16.
[2]. Смоликова и др. (2023) Фотохимическая активность формирующихся семядолей гороха (*Pisum sativum* L.) зависит от светопропускания покровных тканей и спектрального состава света. Вавиловский журнал генетики и селекции 2023, 27, 980–987.
[3]. Stepanova et al. (2024) Green light drives embryonic photosynthesis and protein accumulation in cotyledons of developing pea (*Pisum sativum* L.) seeds. Agronomy, 14, 2367.
[4]. Stepanova et al. (2024) Non-foliar photosynthesis in pea (*Pisum sativum* L.) Plants: beyond the leaves to inside the seeds. Plants, 13, 2945.

Влияние онтогенетических и климатических факторов на активность нелистового фотосинтетического аппарата побегов винограда

Сундырева М.А.[1*], Яныкин Д.В.[2], Христин М.С.[2], Грязнова У.В.[2], Пиголев А.В. [2], Ашихмин А.А.[2], Савченко Т.В.[2]
[1]Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, г. Краснодар, Краснодарский край, Россия
[2]Пущинский научный центр биологических исследований, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Московская область, Россия
*email: taurim2012@yandex.ru

Краснодарский край является ключевым производителем виноградовинодельческой продукции в России и обеспечивает около 30 % объема валового производства винограда. Характерной для региона является нестабильность погодных условий в форме губительных морозов зимой, излишне высокой температуры воздуха и острого дефицита атмосферных осадков в период вегетации. В таких условиях наблюдается снижение продуктивности и качества урожая, снижение качества черенков для дальнейшего размножения винограда. В данной работе исследовали изменение активности фотосинтетического аппарата в лозе винограда сорта ТАНА42 в процессе роста и развития побега в весенне-летний период с помощью анализа параметров переменной флуоресценции хлорофилла, а также чувствительность разных по возрасту тканей лозы к внешним гидротермическим условиям. Измерения проводили как на освещенной, так и на затененной стороне лозы. Исследования динамики значений эффективного квантового выхода фотосистемы 2 (Y(II)) в лозе и листьях винограда в течение всего периода вегетации при изменении фенологических фаз показало отсутствие изменений значений Y(II) в побегах винограда, приходящихся на наступление отдельных фенологических фаз. Корреляционный анализ зависимости значений Y(II) от условий внешней среды показал, что повышение температуры и осадки отрицательным образом сказываются на значениях Y(II) в листе и освещенной стороне лозы, для затененной стороны такой закономерности не обнаруживается.

С помощью моделируемых в лаборатории условий абиотического стресса была оценена устойчивость фотосинтетического аппарата лозы и листа винограда к засухе и высоким температурам. Фотосинтетический аппарат лозы проявил высокую устойчивость к данным стрессам. Предполагается, что одним из адаптивных механизмов, определяющих устойчивость фотосинтетического аппарата лозы, выступает активация нефотохимического тушения флуоресценции, в том числе тушение, вызываемое повышением транстилакоидного градиента pH и регулируемое ксантофилловым циклом, и нефотохимическое тушение флуоресценции, связанное с перераспределения энергии возбуждения между двумя фотосистемами (state transition).

Нелистовой фотосинтез вносит значительный вклад в продуктивность растений и устойчивость к неблагоприятным условиям среды. Полученные знания могут лечь в основу новой стратегии в селекции продуктивных и устойчивых сортов винограда.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 24-16-00142

Изменения работы фотосистемы II злаковых культур в зависимости от фазы развития

Чуракова С. А.*, Лисицын Е. М.
ФАНЦ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, Киров, Россия
*e-mail: sveta.1917@mail.ru

Исследовано 32 генотипа пшеницы, 32 генотипа овса и 42 генотипа ячменя коллекционных питомников селекционных лабораторий ФАНЦ Северо-Востока. Отмечены существенные отличия растений пшеницы от овса и ячменя по динамике потоков энергии внутри фотосистемы II (ФСII): для пшеницы максимальные значения потока адсорбированной энергии, максимального потока захваченных экситонов, поток электронного транспорта и поток энергии, рассеянной в виде тепла отмечены в фазу колошения, когда у двух других культур в эту фазу отмечены их минимальные значения. У пшеницы эти потоки были минимальны в фазу молочной спелости. У овса и ячменя величины этих потоков были примерно одинаковы в фазы трубкования и молочной спелости.

В среднем для пшеницы перфоманс-индекс PI_{ABS} последовательно снижался от фазы трубкования к молочной спелости (с 4,91 до 3,06), а у ячменя наблюдался последовательный рост величины этого индекса (с 4,59 до 5,83). Очевидно, эффективность конвертации солнечной энергии внутри ФСII у растений пшеницы снижалась с возрастом, а у растений ячменя – наоборот, повышалась. Растения овса в данном случае заняли промежуточное положение, но и у них отмечено снижение индекса после фазы колошения/выметывания (с 4,53 до 4,18).

Что касается индекса PI_{ABS_total}, то для растений пшеницы и овса его максимальное значение отмечено в фазу колошения/выметывания с понижением к фазе молочной спелости с 6,77 до 5,09 и с 4,98 до 3,75 соответственно). Растения ячменя максимально эффективно передавали энергию на первую фотосистему в фазу выхода в трубку (5,81), а на следующих фазах развития резко снижалась (в полтора раза), оставаясь практически на одном уровне до конца наблюдений (3,81).

Данные о величине коэффициентов генотипической вариабельности оцененных параметров дают возможность выбрать как оптимальную фазу отбора проб, так и те параметры, которые могут способствовать лучшей дифференциации исследуемого материала. Так, для растений ярового ячменя самая высокая степень генотипической вариабельности параметров работы ФСII листьев наблюдалась в фазу колошения, при этом любой из параметров варьировал в сильной степени (20-61%). Для пшеницы разделение генотипов наилучшим образом могло быть проведено в фазу молочной спелости зерна, а для ярового овса уровень вариабельности показателей в течении всей вегетации практически не изменялся. Безусловно, самым вариабельным параметром являлся перфоманс-индекс PI_{ABS}, так как он, по определению, служит интегральным показателем сразу нескольких процессов, но его динамика подчинена тем же закономерностям, что и у остальных параметров.

Исследование нелинейной реакции хлорофилла на периодическое световое воздействие при вызванном засухой стрессе

Асташев М.Е.[1,2] *, Игнатенко Д.Н.[2], Шумейко С.А.[2]
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Институт биофизики клетки Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пущино, Россия
*e-mail: astashev@yandex.ru

Исследование динамики биологических объектов дает богатую информацию для высокоинформативного описания сложных биологических систем. Импульсная флуориметрия хлорофилла является неинвазивным методом измерения быстрых изменений флуоресценции пигментов фотосистемы II. Нашим коллективом было разработано устройство внешнего датчика флуоресценции, обеспечивающее длительные измерения (до 10 суток) базового уровня флуоресценции хлорофилла, обеспечивающее сбор больших временных рядов данных ($>10^4$ измерений), что открывает путь для исследования динамики флуоресценции пигментов с помощью спектральных амплитудо-частотных методов первого и второго порядка, в частности, биспектрального анализа [1]. Было показано, что при изменении режима полива в сторону засухи растения салат латук происходит генерация нелинейного ответа на периодическую сатурирующую вспышку света, что достоверно подтверждается появлением пятна в биспектре записи.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-24-00221.

[1]. Newman J. et al. (2021) Defining the wavelet bispectrum. Applied and Computational Harmonic Analysis, 51, 171-224, DOI: 10.1016/j.acha.2020.10.005.

Классификация биологических пигментов путем моделирования их оптических свойств с использованием методов эволюционной оптимизации

Курков В.А.[1,2*], Пищальников Р.Ю.[1], Чесалин Д.Д.[3]
[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» , Москва, Россия
[2]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия
[3]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия
*e-mail: V.K27@yandex.ru

Применение достижений в области анализа данных и эволюционных алгоритмов значительно облегчает изучение обширных неструктурированных цифровых наборов данных. На основе предыдущих исследований нашей лаборатории с использованием алгоритма дифференциальной эволюции и полуклассического квантового моделирования мы разработали подход к классификации и анализу оптических свойств органических пигментов. Были получены результаты моделирования спектров поглощения пяти каротиноидов, синтезируемых аскомицетными грибами: нейроспораксантина, нейроспорена, торулена, γ-каротина и ζ-каротина. Используя теорию многомодовых броуновских осцилляторов, мы рассчитали спектры поглощения для каждого пигмента, что позволило оценить, как колебания молекул влияют на электронные переходы пигментов. В нашем моделировании использовался метод обобщенной функции спектральной плотности, учитывающий влияние 13 мод колебаний с частотами от $100\ см^{-1}$ до $3000\ см^{-1}$. Этот метод позволил получить полное представление о влиянии молекулярных колебаний на спектры поглощения соответствующих органических соединений. Таким образом, каждый спектр поглощения соответствует определенному набору Хуанг-Рис факторов, которые служат своеобразным “отпечатком пальца”, уникально характеризующим оптические свойства пигмента в среде растворителя.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-21-00375

Разработка комбинированной модели оптических свойств и фотосинтеза в листе двудольных растений

Сухова Е.М., Сухов В.С.*
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
*e-mail: vssuh@mail.ru

Мониторинг состояния растений на основании спектральных характеристик отраженного света, включая оценку их фотосинтетических процессов, играет важную роль в современном сельском хозяйстве и экологических исследованиях. При этом, одной из ключевых проблем такого мониторинга является разработка подходов для повышения его информативности, которые могут опираться на разработку оптических и фотосинтетических моделей листа растения или растительного покрова.

Целью настоящей работы была разработка комбинированной математической модели, описывающей оптические свойства листа двудольного растения (с палисадным и губчатым мезофиллом) и протекающие в нем фотосинтетические процессы. В перспективе, такая модель может быть использована как инструмент для развития методов мониторинга фотосинтетических процессов у растений.

Функционирование разработанной модели опиралось на использование оптического, фотосинтетического и транспортного блоков. Анализ начинался с формирования распределения света в толще листа оптическим блоком, который использовал закон Снелла и формулы Френеля для описания поверхностного отражения света, закон Бугера-Ламберта-Бера для описания оптических характеристик палисадного мезофилла и модель Кубельки-Мунка с четырьмя потоками (два направления, коллимированный и рассеянный свет) для описания оптических характеристик губчатого мезофилла [1]. Коэффициент поглощения света в толще листа описывался как линейная функция концентраций фотосинтетических пигментов (хлорофиллы, каротиноиды).

Полученное распределение поглощения света на разной глубине в листовой пластинке использовалось в качестве «входа» для фотосинтетического блока, опирающегося на модель Farquhar-von Caemmerer-Berry [2] с рядом модификаций, включая возможность описания нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла. При описании стационарного распределения фотосинтетической активности использовался также транспортный блок, описывающий поступление CO_2 через устьица и его диффузию в толще листа на основании закона Фика.

Стационарное распределение фотосинтетической активности использовалось для описания флуоресценции в красной области и дополнительных изменений поглощения света в зеленой области, которые связаны с закислением люмена хлоропластов и формированием нефотохимического тушения [3]. Модифицированные спектры поглощения света использовались при повторном применении оптического блока.

Конечным результатом анализа являлись «кажущиеся» спектры отражения листа, которые соответствуют экспериментальным и могут быть использованы для оценки действия стрессовых факторов на фотосинтетические процессы у растений.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект 23-14-00127.

[1]. Sukhova E. et al. (2024). Development of Analytical Model to Describe Reflectance Spectra in Leaves with Palisade and Spongy Mesophyll. Plants, 13, 3258.
[2]. Ratnitsyna D. et al. (2023). Development of Modified Farquhar–von Caemmerer–Berry Model Describing Photodamage of Photosynthetic Electron Transport in C_3 Plants under Different Temperatures. Plants, 12, 3211.
[3]. Золин и др. (2024). Измерения фотохимического индекса отражения как инструмент дистанционного мониторинга фотосинтетических параметров растений. Биофизика, 69, 603-614.

Многопараметрическое моделирование спектров поглощения каротиноидов

Чесалин Д.Д.[1*], Курков В.А.[2], Пищальников Р.Ю.[2]
[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия
*e-mail: genoa-and-pittsburgh@mail.ru

Благодаря стремительному развитию вычислительной техники за последние десятки лет многие задачи, раньше казавшиеся нерешаемыми, теперь уже не являются такими. Одним из таких примеров является исследование свойств каротиноидов через их оптический отклик по спектрам поглощения. Как известно, многие характеристики невозможно получить только эмпирическим путем, поэтому понимания происходящих процессов (например, перенос энергии) необходимо сопоставление экспериментальных данных с физической теорией. Даже не вдаваясь в ее тонкости, очевидно, что общее количество свободных параметров будет значительным из-за сложной структуры каротиноидов и уникального взаимного расположения, что не позволяет получать результаты простыми аналитическими методами. Квантование задачи помогает от бесконечного числа свободных параметров (масса, момент, координата каждого атома) перейти к конечному набору, который характеризует свойства исследуемого объекта без потери предсказательной силы. Этот набор содержит энергии электронных переходов между основным и возбужденным состоянием, а также интенсивности электрон-фононного взаимодействия, характеризующие собственные колебания молекулы. С помощью оптимизатора дифференциальной эволюции, предназначенного для нахождения глобального оптимума многопараметрической функции, на примере астаксантина в органических растворителях, была решена задача наложения экспериментальных и расчетных спектров при 12 свободных параметрах. В результате вычислений можно провести классификацию колебательных мод по интенсивности воздействия на электронное возбуждение. Данная методология может быть применена для аналогичных расчетов других каротиноидов и хлорофиллов.

Исследование сделано при поддержке гранта РНФ №25-21-00375.

Биогибридный солнечный элемент с закрепленными на пористом слое TiO_2 тилакоидными мембранами

Волошин Р.А.[1], Жармухамедов С.К.[2*], Аллахвердиев С.И.[1,2]
[1]Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, 127276, Москва, ул. Ботаническая, 35;
[2]Институт фундаментальных проблем биологии РАН, 142290, Московская область, г. Пущино, ул. Институтская, 2
*e-mail: watcher01@rambler.ru

Наноструктурированный слой на основе диоксида титана (TiO_2) обладают уникальной способностью адсорбировать на своей поверхности компоненты фотосинтетического аппарата, такие как пигмент-белковые комплексы. Это позволяет создавать желаемые сенсибилизированные слои, способные эффективно преобразовывать энергию света в электрическую, что делает их перспективными материалами для применения в области биогибридных фотоэлектрохимических систем, включая солнечные элементы и водородные топливные элементы нового поколения [1]. На сегодняшний день методы синтеза наноструктурированного слоя хорошо разработаны и широко описаны в научной литературе. Однако, большинство существующих методик направлено в первую очередь на создание подложек для фиксации низкомолекулярных органических красителей, используемых в традиционных сенсибилизированных красителем солнечных элементах (DSSC). Эти подходы, как правило, не учитывают особенности адсорбции более крупных и сложных биологических структур, таких как тилакоидные мембраны или крупные пигмент-белковые комплексы, что ограничивает их применимость в биогибридных системах [2]. Кроме того, в научных исследованиях часто применяются коммерчески доступные пасты на основе TiO_2, которые обеспечивают стабильное качество, но не всегда обладают нужной структурой и пористостью для специфических задач, таких как фиксация биомолекул. Высокая стоимость таких паст делает их неэффективными для экспериментальных и исследовательских целей, особенно в контексте прототипирования новых типов сенсибилизаторов [3]. Ключевым параметром наноструктурированных слоев, определяющим их адсорбционную способность, является пористость. Для формирования пор в структуре слоя применяются специальные органические соединения — порообразователи (темплаты), которые при термической обработке или растворении формируют в материале открытые каналы и полости [4].

В работе представлен биогибридный солнечный элемент, основанный на тилакоидных мембранах, иммобилизованных на наноструктурированном пористом слое TiO_2. Для формирования равномерной сетчатой пористой структуры в матрице TiO_2 использована гидроксиэтилцеллюлоза (ГЭЦ) водорастворимый полимер, обладающий высокой вязкостью, что позволило значительно повысить адсорбционную способность слоя TiO_2 по сравнению с традиционным полиэтиленгликолем (ПЭГ). Сенсибилизированные тилакоидами элементы, изготовленные на основе ГЭЦ-структур, демонстрируют фототок, превышающий аналогичные показатели для ПЭГ-слоев более чем в три раза. Использование гидроксиэтилцеллюлозы в качестве темплаты при синтезе наноструктурированного слоя TiO_2 представляет собой перспективное направление в разработке биогибридных устройств преобразования солнечной энергии.

Результаты получены при поддержке Российского научного фонда (грант №24-14-00033)

[1]. Grätzel M. (2003) J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev., 4(2):145–153.
[2]. Bavykin D.V., et al. (2006) Adv. Mater., 18(21):2807–2824.
[3]. Mor G.K., et al. (2008) Thin Solid Films, 516(23):7313–7317.
[4]. Djenizian T., et al. (2009) Electrochim. Acta, 54(7):2043–2049.

Анализ кинетических кривых световой индукции (OJIP кривых) фотосинтетически активного фитопланктона

Антал Т.К.[1]*, Волгушева А.А.[2], Дрозденко Т.В.[1], Конюхов И.В.[2], Хрущев С.С.[2]
[1] Псковский государственный университет, Псков, Россия
[2] Московский государственный университет, Москва, Россия
*email: taras_an@mail.ru

В августе 2023 г. исследованы экологически благоприятные участки в нижнем течении и дельте реки Великой, впадающей в Псковское озеро Псковско-Чудского озерного комплекса [1]. На 10 станциях отбора проб (5 станциях в дельте реки и 5 станциях выше дельты реки) определены гидрохимические параметры, видовой состав и количественные характеристики фитопланктона. С помощью оригинального высокочувствительного флуориметра SMART измерены кинетические кривые индукции флуоресценции хлорофилла (ФХ), т.н. OJIP кривые.

Фитопланктон на всех станциях характеризовался высокой фотохимической активностью ФС2 (*Fv/Fm* выше 0.7). В отличие от станций, расположенных выше дельты реки, сама дельта характеризовались условиями, благоприятными для эвтрофикации и гетеротрофного питания фитопланктона. Также в дельте реки доминировали виды микроводорослей, которые либо отсутствовали, либо присутствовали как минорный компонент на станциях выше по течению.

OJIP кривые, измеренные на станциях выше дельты реки, демонстрировали типичный трехступенчатый характер светоиндуцированного роста ФХ, характерный для высших растений и зеленых микроводорослей в оптимальных условиях роста. Напротив, OJIP кривые, измеренные на станциях в дельте реки, характеризовались особенной формой, в том числе наличием дополнительного максимума ФХ на временах около 1 с и снижением амплитуды IP. Достоверно механизмы первичных реакций фотосинтеза, определяющие специфику формы OJIP кривых в образцах фитопланктона из дельты реки, не известны, однако они могут быть связаны как с особенностями видового состава фитопланктона, так и развитием хлородыхания и нефотохимического тушения, которое развивается при темновой адаптации образцов.

Понимание особенностей OJIP кривых в фитопланктонных сообществах в естественных условиях позволит шире использовать флуоресцентные методы в системе мониторинга водных экосистем.

[1]. Antal T.K. et al. (2025) Analysis of chlorophyll fluorescence induction curves (OJIP transients) of phytoplankton under conditions of high photosynthetic activity. Journal of Applied Phycology. DOI: 10.1007/s10811-024-03429-1

Новая методика оценки влияния агроэкосистем на содержание CO_2 в атмосфере Земли

Булаткин Г.А.
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Россия
e-mail: genbulatkin@yndex.ru

В настоящее время на Земле наблюдается значительное повышение среднегодовой температуры атмосферы, что может привести к большим отрицательным экологическим и экономическим последствиям. Основной причиной этого явления официально считается рост концентрации в атмосфере так называемых парниковых газов, главным образом, углекислого газа, метана и оксида азота. Проводятся исследования по расчёту выбросов CO_2 в атмосферу и карбонового следа при возделывании полевых культур. При этом предлагается анализировать только прямые затраты углеводородного топлива (и соответствующие выбросы CO_2 в атмосферу) при выращивании и уборке культурных растений и поступление органического вещества пожнивных и корневых остатков культур в почву [1]. Для объективной оценки влияния земледелия на атмосферу с эколого-биосферных позиций следует рассматривать не только выбросы при сжигании топлива в двигателях машин, работающих в полевых условиях, но и выбросы CO_2, полученные при производстве тракторов, комбайнов, транспорта, почвообрабатывающих орудий и др. оборудования (с/х. техники), минеральных удобрений, пестицидов. Нами разработана многоуровневая модель анализ потоков CO_2 для агроэкосистем. Предложены формулы амортизации затрат технической энергии на производство и капитальный ремонт техники и расчёта соответствующих величин выбросов CO_2 при её использовании. При анализе баланса CO_2 почвы необходимо учитывать так же разложение гумуса под влиянием азотных минеральных удобрений и потери N_2O из азотных удобрений с использованием эмиссионного фактора ($ЭФ_{N2O}$). Введено понятие «итоговый карбоновый след», который включает как прямые выбросы CO_2 при работе тракторов и др. машин, окислении гумуса почв, поступлении CO_2-экв. в атмосферу при трансформации азотных удобрений в почве, так и косвенные выбросы CO_2 – выбросы углекислого газа при производстве с/х техники, минеральных удобрений и т.д. На примере результатов полевых экспериментов на серых лесных почвах Южного Подмосковья показано, что уже при средних дозах минеральных удобрений косвенные выбросы CO_2 превышают прямые. По новой методике рассчитаны суммарные выбросы CO_2 на 1 га и 1 ц продукции полевых культур пятипольного севооборота.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания 1024032200167-2.

[1]. Приказ Минприроды России от 27.05. 2022. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объёмов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов».

Применение комплекса математических методов для оценки состояния фотосистемы II водорослей *Chlorella vulgaris* в условиях стресса

Хрущев С.С.*, Червицов Р.Н., Плюснина Т.Ю., Фурсова П.В., Конюхов И.В., Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, биологический ф-т, каф. биофизики, Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, МГУ, телефон (495)9390289
*e-mail: styx@biophys.msu.ru

Фотосистема II (ФСII) играет ключевую роль в обеспечении жизнедеятельности фотосинтетических организмов. Воздействие различных факторов стресса оказывает значительное влияние на её функциональное состояние. Оценка влияния этих факторов важна для понимания физиологических процессов и механизмов адаптации к стрессу. В работе демонстрируется комплексный подход использования совокупности математических методов для количественной оценки изменений в функционировании ФСII по кривым индукции флуоресценции хлорофилла *a* на примере действия тяжелых металлов и избыточного освещения на клетки водорослей *Chlorella vulgaris*. В процессе анализа нами применялся следующий набор методов:

- Методы машинного обучения: выявление закономерностей и разделение образцов водорослей на группы согласно характеристикам их фотосинтетического аппарата.
- Математическое моделирование: оценка гетерогенности реакционных центров по соотношению долей реакционных центров с различным состоянием антенного и кислородвыделяющего комплексов.
- JIP-тест: определение эффективности отдельных стадий переноса электрона в электрон-транспортной цепи фотосинтеза и общего «индекса производительности» первичных реакций фотосинтеза.
- Метод разностных кривых: определение степени инактивации кислородвыделяющих комплексов.

Анализ, проведённый с использованием комплекса математических методов, показал, что стрессовые факторы, такие как действие ионов кадмия и хрома, а также высокая интенсивность освещения, приводят к изменению гетерогенности реакционных центров ФСII и общему снижению эффективности работы ФСII. В частности, тяжелые металлы в большей степени влияют на снижение активности кислородовыделяющих комплексов, тогда как изменение условий освещения влияет в первую очередь на соотношение реакционных центров с разным составом светособирающих антенн, что является проявлением адаптивных механизмов защиты от чрезмерного освещения. Использование комплекса математических методов позволило всесторонне оценить влияние факторов стресса на фотосистему II водорослей *Chlorella vulgaris*, и выявить специфические изменения в работе фотосинтетического аппарата и общие тенденции развития стресса, что обеспечило формирование целостного представления о механизме реакций ФСII на рассматриваемые стрессорные условия.

Оранжевый каротиноидный белок как следовый маркер эволюционного родства пластид и цианобактерий

Слонимский Ю.Б.[1], Болычевцева Ю.В.[1], Гусев Е.С.[2], Максимов Е.Г.[3], Случанко Н.Н.[1], Стадничук И.Н.[4*]
[1]Институт биохимии имени А.Н. Баха, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Россия;
[2]Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Россия
[3]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия;
[4]Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН, Россия
*e-mail: stadnichuk@mail.ru

Появление эукариотного фотосинтеза благодаря эндосимбиотическому возникновению хлоропластов от цианобактерий стало фундаментальным событием в эволюции биосферы. Согласно филогеномным данным, от несохранившегося фотосинтезирующего предшественника 1,7 млрд. лет тому назад возникли глаукофиты и спустя еще 100–200 млн. лет появились красные водоросли (багрянки), которые сохранили в пластидах полученные от цианобактерий мегадальтонные антенные белковые комплексы, фикобилисомы (ФБС). Бесфикобилисомные фотосинтетики-эукариоты, включая высшие растения, появились позднее. Для защиты ФБС от избытка света у цианобактерий сформировался механизм нефотохимического тушения, регулируемый фотоактивным оранжевым каротиноидным белком (OCP). У разных видов цианобактерий известны три типа OCP, обозначаемые как OCP1, OCP2 и OCP3. Багрянки и глаукофиты не имеют генов OCP и используют, вероятно, иные светозащитные механизмы. Много лет остаются неясными принципиальные вопросы, как эти две группы архепластид утратили OCP и сохранились ли сайты связывания с OCP у эукариотических ФБС. Для объективной проверки взаимодействия с OCP были использованы ФБС из красной микроводоросли *Galdieria sulphuraria* и глаукофиты *Glaucocystis bhattacharyae,* морфологически сходные с полудисковидными ФБС большинства цианобактерий. Типичные OCP1, OCP2 и OCP3 были получены нами ранее в высокоочищенном состоянии при гетерологической экспрессии в клетках *E. coli.* Регистрация время-разрешенной флуоресценции ФБС *Galdieria* в растворе в отсутствие или в присутствии разных OCP показала, что OCP1 и OCP2 не оказывают влияния на кинетику затухания флуоресценции ФБС, лишь OCP3 демонстрирует умеренное тушение. ФБС, выделенные из *Glaucocystis*, подвержены значительному тушению со стороны OCP3 и умеренному – со стороны OCP2, но не OCP1, который считается эволюционно молодым белком. ФБС и OCP3 имеются у представителей рода *Gloeobacter* - наиболее древней группы известных цианобактерий, насчитывающей 2.5-3 млрд. лет. Ряд цианобактерий, включая более поздний род *Gloeomargarita*, считающийся прародителем хлоропластов, обладая ФБС, генов OCP не имеют. С учетом разницы в сроках возникновения родов *Gloeobacter* и *Gloeomargarita* и сроках появления багрянок и глаукофит, наши данные косвенно указывают на то, что эти группы архепластидных эукариот унаследовали ФБС от цианобактерий, ко времени эндосимбиоза утративших OCP. Вариант получения ими пластид от цианобактерий, имеющих эволюционно ранние формы OCP, менее вероятен, так как подразумевает утраты OCP независимо в нескольких группах фотосинтетиков. Возможность унаследования ФБС от цианобактерий еще до появления OCP также следует исключить в силу чувствительности изученных ФБС к OCP3. Таким образом, известные представления о последовательности эволюции OCP (OCP3 → OCP2 → OCP1) согласуются с нашими данными о возможности тушения ФБС из глаукофит и багрянок и отвечают свойствам *Gloeomargarita*. Совокупность полученных результатов указывает на то, что OCP служит важным следовым маркером эволюционного родства пластид и цианобактерий.

Частично поддержано программой Министерства Науки и Высшего Образования РФ.

Использование неоднородности RGB индекса на основе синего и зеленого каналов для оценки характеристик фотосинтеза при действии стрессоров на примере гороха посевного

Андрюшаев Л.Е.*, Золин Ю.А., Гребнева К.В., Попова А.Ю., Сухов В.С., Сухова Е.М.
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
*e-mail: andoverleanid@yandex.ru

Мониторинг растений на основе оптических методов является широко используемым для определения характеристик растений и выявления действия на них неблагоприятных факторов. В то же время проявление стресса у покрова растений может происходить неоднородно в силу структурно-физиологических особенностей отдельных растений и неоднородности их устойчивости. Пространственная неоднородность оптических свойств, в частности RGB, покрова может быть одним из признаков стрессированности растений. Таким образом, целью настоящего исследования была оценка связи параметров неоднородности сине-зеленого RGB индекса с характеристиками фотосинтеза растений.

Растения гороха (*Pisum sativum* L.) выращивали на универсальном грунте в вегетационной комнате при температуре 24ºС и световом режиме 16/8 ч. Горшки с растениями располагали на поддонах, что имитировало растительный покров. Прекращение полива растений индуцировало почвенную засуху. Почвенное засоление вызывалось регулярным поливом солевым раствором (100, 200 и 400 мМ NaCl). Контрольную группу продолжали регулярно орошать водой. Периодически в течение эксперимента оценивали активность фотосинтеза при помощи FluorPen, содержание пигментов на основе метода прямой спектрофотометрии и сырой и сухой вес растений. В те же дни растительный покров фотографировали на RGB камеру. На основе синего и зеленого каналов, нормированных на сумму трех каналов, рассчитывали разностный сине-зеленый RGB индекс. В ходе анализа, в изображении растительного покрова выделяли стандартные ROI, в рамках которых рассчитывали показатели пространственной неоднородности (стандартное отклонение, коэффициент вариации, 3-й и 4-й моменты, рассчитанные для всех «растительных» пиксель каждого ROI); пиксели фона из анализа исключались.

Наши результаты показали, что характеристики пространственной неоднородности достоверно возрастали при действии исследованных стрессоров. При этом они имели выраженную связь с максимальным квантовым выходом фотосистемы II и содержанием пигментов в листьях; наиболее выраженная связь наблюдалась для коэффициента вариации, 3-го и 4-го моментов.

Механизм формирования неоднородности свойств и связь их с физиологическими процессами требует дальнейших детальных исследований; однако, можно предположить, что выявленный эффект связан с неоднородностью развития повреждения листьев при действии засухи и засоления.

Полученные результаты могут быть использованы для развития подходов к дистанционному и, особенно, проксимальному мониторингу растений, а также для выявления теоретических основ связи физиологических характеристик и оптических свойств растений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-76-10048)

Комбинированная стратегия анализа метаболомов растений и других фотосинтетических организмов

Билова Т.Е.[1,2], Маргарит А.А. [1]*, Фролова Н.В.[1], Орлова А.А.[1,3], Соболева А.В.[1], Мурашко Е.А.[3,4], Силинская С.А.[1,3], Зубова М.Ю.[1], Аксенова М.А.[1], Жихрева А.В.[1,5], Алхаже К.[1], Черевацкая М.А.[2], Фролов А.А.[1,3,5]
[1]Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия;
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;
[3]Институт медицины и экспериментальной биологии, Псков, Россия;
[4]Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия;
[5]Институт живых систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия;
*e-mail: ancka.margarit@ya.ru

Метаболомика представляет собой методологическую платформу, объединяющую комплекс методов, исследующих метаболом биологического объекта. При этом, метаболом определяется как совокупность метаболитов организма, органа, ткани или клетки, то есть низкомолекулярных участников его обмена веществ. Поскольку метаболом фактически отражает "реализованный" геном организма, его анализ является важным компонентом исследований в области системной биологии. В отличие от других методологических платформ функциональной геномики (геномики, транскриптомики, протеомики) метаболомный анализ характеризуется рядом методических особенностей, связанных с тем, что многие (прежде всего, первичные) метаболиты растений и других организмов не являются видоспецифичными. Кроме того, метаболиты отличаются значительным диапазоном физико-химических свойств и физиологических концентраций (содержания) в тканях. Очевидно, что эти свойства живых организмов не позволяют проводить одновременный анализ всех метаболитов, присутствующих в биологическом объекте, с помощью одного аналитического подхода. Следовательно, полномасштабный метаболомный подход должен предполагать интеграцию нескольких аналитических методов в рамках одного исследования. Поэтому, в течение последнего десятилетия нами была разработана комбинированная стратегия метаболомного анализа, позволяющая охватить значительную часть метаболома растений. Этот масштабный подход предполагает скоординированное использование методов газовой хромато-масс-спектрометрии для анализа первичных метаболитов, а также комбинации обращенно-фазовой жидкостной хромато-масс-спектрометрии низкого и высокого разрешения для профилирования первичных (термолабильных) метаболитов, вторичных метаболитов и реактивных карбонилов. Далее, данные, полученные с помощью этих разных аналитических платформ, интегрируются в общий массив и совместно интерпретируются в ходе статистического и биоинформационного анализов. Данная комплексная стратегия была успешно опробована в исследовании влияния спектрального состава света на метаболитные паттерны плодов томатов (в том числе, мутантных по генам морфогенеза и фитохромов), экстремофильных цианобактерий в условиях их длительного хранения; при изучении влияния фитоэффекторами (жасмонатами, сидниминами) на метаболитный паттерн семян пшеницы и гороха; в исследованиях процессов старения клубеньков бобовых растений, фотосинтеза, устойчивости к обезвоживанию и метаболических ответов семян гороха на установление растениями симбиоза с клубеньковыми бактериями и арбускулярно-микоризными грибами.

Работа выполнена при поддержке РНФ (№23-44-00101).

Протеомика как методологическая платформа современной физиологии растений

Гурина А.К.[1*], Лукашева Е.М.[1], Горбач Д.П.[3], Данько К.В.[1], Бондаренко П.М.[1], Янчик Д.А.[2], Малыгин К.П.[1], Шумилина Ю.С.[3], Фролова Н.В.[3], Леонова Т.С.[4], Фролов А.А.[3]
[1]Кафедра Физиологии и Биохимии Растений, Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия
[2]Кафедра Биохимии, Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия
[3]Лаборатория Аналитической Биохимии и Биотехнологии, Институт Физиологии Растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия
[4]Департамент Биоорганической Химии, Лейбниц-Институт Биохимии Растений, Галле/Заале, Германия
*e-mail: anastasia.gurina@list.ru

Все аспекты физиологии растительного организма – рост, развитие, размножение и ответ на действие широчайшего круга абиотических и биотических стрессоров, сопровождаются в большей или меньшей степени выраженными перестройками первичного и вторичного метаболизма. На уровне химического фенотипа такие перестройки проявляются не только в изменениях активностей специфических ферментов и содержания продуктов и/или субстратов соответствующих ферментативных реакций, но и в экспрессионных сдвигах, приводящих к увеличению или уменьшению содержания соответствующих белков. Также, адаптивные реакции растений могут проявляться в изменениях паттернов пост-трансляционных модификаций белков, имеющих ключевое значения в регуляторных путях и цепях переноса сигнала в клетке. Современные методы протеомики «снизу вверх» (bottom-up), основанные на хромато-масс-спектрометрическом анализе в нанопотоке (нано-ВЭЖХ-МС), позволяют получить ценнейшую информацию об изменениях динамики отдельных белков и их ансамблей (а также паттернов регуляторных пост-трансляционных модификаций), которые сопровождают физиологические изменения, происходящие в растительном организме в контексте его роста, развития и ответа на действие факторов среды. На уровне отдельных органов, тканей и групп клеток такие изменения могут быть выражены в абсолютных или относительных значениях. В течение последнего десятилетия нами разработана протеомная платформа, позволяющая в максимально возможной степени охарактеризовать динамику белков и пост-трансляционных модификаций (фосфорилирование, нитрозилирование, карбонилирование, окисление, гликирование), а также дать биохимически адекватную интерпретацию полученных данных.

Работа выполнена при поддержке РНФ (№25-24-00575).

Использование RGB индексов для оценки состояния растений в условиях почвенной засухи и засоления на примере пшеницы

Золин Ю.А.*, Гребнева К.В., Попова А.Ю., Сухов В.С., Сухова Е.М.
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
*e-mail: uchebnayap.zolin@gmail.com

Почвенная засуха и засоление являются одними из распространенных проблем сельского хозяйства. Выявление действия на растения стрессоров может помочь принять необходимые меры для поддержки устойчивости и продуктивности растений. Использование методов оптического мониторинга, в частности RGB имиджинга, является перспективным вариантом решения этой задачи благодаря высокой пропускной способности и широкой доступности. Таким образом, целью настоящего исследования был анализ связей RGB индексов с характеристиками растений.

Исследования проводили на 2-4-недельных проростках пшеницы (*Triticum aestivum* L.), которую выращивали на универсальном грунте в вегетационной комнате. Растения освещали люминесцентными лампами и 16/8 ч фотопериод. Температура воздуха поддерживалась около 24ºС. Растения подвергали воздействию почвенной засухи (прекращен полив) и засолению (регулярный полив солевым раствором), контрольную группу продолжали регулярно поливать водой. Периодически в течение эксперимента растения фотографировали на RGB камеру. На основе фотографий рассчитывали различные RGB индексы (включая, NRGI, ExG, VEG и др.). Также в те же дни оценивали активность фотосинтеза при помощи Li-600 и FluorPen, содержание пигментов на основе метода прямой спектрофотометрии и сырой и сухой вес растений.

RGB индексы показали чувствительность к действию почвенной засухи и засоления. Также стоит отметить двухфазность таких изменений, что является неоднозначным результатом и требует дальнейшего анализа.

Наши результаты показали, что содержание пигментов на сырой вес растений значительно возрастало в течение эксперимента, а содержание пигментов на сухую массу достоверно не изменялось. Последнее показывает, что изменения концентрации пигментов, рассчитанной на сырой вес, связаны с изменением содержания воды в листьях. При этом RGB индексы показали сильную связь с содержанием пигментов на сырой вес растений. Изменения RGB индексов были также связаны с содержанием воды в растениях и сырым весом растений.

В ходе засухи и засоления максимальный и эффективный квантовый выход фотосистемы IIдостоверно снижались. RGB индексы имели выраженную связь с характеристиками фотосинтеза. Полученные результаты позволяют предположить значительную роль структуры листа и активности фотосинтеза при регистрации отраженного растениями света.

В целом, наши результаты показали чувствительность RGB индексов к действию засухи и засоления. Однако интерпретация данных может осложняться особенности физиологических процессов и взаимодействия света с листом. Дальнейшие исследования требуют разработки математических моделей связи физиологических и оптических характеристик растений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-76-10048)

Свет и хлорофилл: важнейшие вехи в истории ранних исследований

Красновский А.А. мл.
[1]Федеральный исследовательский центр биотехнологии, Институт биохимии им. А.Н. Баха Российской Академии наук, Ленинский просп. 33, корп. 2, Москва, 119071, Российская Федерация;
e-mail: phoal@mail.ru

Доклад связан с двумя недавними юбилейными датами – 250 лет с момента открытия фотосинтеза (2022-2023 гг) и 200 лет открытию хлорофилла (2017 г.). Трудно себе представить, но большую часть своей истории человечество не подозревало о существовании фотосинтеза. Первая информация появилась 250 лет назад, а реальное понимание сущности процесса пришло лишь в второй половине XX столетия. Одновременно человечество узнало о дыхании, кислороде и прямом влиянии космоса в виде солнечной энергии на биосферу. Таким образом, свет и хлорофилл – это ключевые слова, определяющие специфику процесса. В докладе я хотел бы представить главные эксперименты и ключевых исследователей, которые их осуществили, в исторической ретроспективе начиная от открытия фотосинтеза, как светозависимого процесса очищения воздуха, на базе наблюдений Гейлса, Ломоносова, Пристли, Шееле и Лавуазье. Вслед за выделением хлорофилла Пельтье и Кавенту, последовал анализ его состава Берцелиусом, Фреми, Саксом, Стоксом, Тимирязевым, завершенный в работах Цвета. Тимирязев первым доказал, что именно хлорофилл и его красная полоса сенсибилизирует фотосинтез в наибольшей степени. Спустя 8 лет Энгельманн в Германии совершенно неожиданным способом подтвердил правоту Тимирязева, но эти привело к исключительно эмоциональной непримиримой дискуссии. Далее предполагается рассмотреть современные представления о фотофизике молекул хлорофилла, генерации им синглетного кислорода, доказательства способности хлорофилла фотосенсибилизировать реакции переноса электрона, а также вопрос о спектроскопии и состоянии молекул хлорофилла в фотосинтезирующих клетках. На мой взгляд, именно решение последней проблемы привело к смещению акцентов в современных исследованиях от изучения хлорофилла к изучению пигмент белковых и пигмент-пигментных комплексов, а также более крупных структурных образований, которое требует другой методологии и технической базы.

Bottom-up протеомный подход при изучении гликирования белков хлоропластов

Лукашева Е.М.[1]*, Соловьева М.А.[1], Горбач Д.П.[2], Соболева А.В.[2], Фролов А.А.[2]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[2]Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия
* elena_lukasheva@mail.ru

Процессы фотосинтеза, являясь центральным звеном передачи энергии, с одной стороны сопровождаются непрерывной генерацией радикальных активных форм кислорода, а с другой- углеводов и их высоколабильных производных. В присутствии переходных металлов это приводит к усилению процесса аутоокисления сахаров и образованию α-дикарбонильных соединений. В свою очередь, эти соединения могут неферментативно взаимодействовать с боковыми цепями остатков лизина и аргинина в белковых молекулах, что приводит к гликированию белков. При этом, возможно образование как более химически лабильных (ранних), так и необратимо формирующихся, конечных продуктов глубокого гликирования (КПГГ).

Ответ на действие стрессора в растении сопровождается как изменениями в фотосинтетических процессах и усилением свободно-радикальных реакций так и изменениями в содержании различных сахаров и их производных, что, в свою очередь может вызывать гликирование белков по так называемым «горячим точкам»-специфическим сайтам гликирования, что было показано нами ранее [1]. Также наши эксперименты *in vitro* выявили образование амидных КПГГ, которые являются продуктами таких интермедиатов цикла Кальвина, как рибулозо-1,5 дифосфат и триозофосфаты [1].

В опубликованных исследованиях, практически неизученными остаются вопросы о протеоме хлоропластов. Поэтому, целью данной работы явилась широкомасштабная характеристика паттернов гликирования протеома хлоропластов в норме и при стрессе.

Для ответа на этот вопрос было выбран модельный вид растений - *Nicotiana benthamiana.* Для эксперименальной группы сорокапятидневных растений были смоделированы условия кратковременной засухи. Были подобраны оптимальные условия для выделения фракции хлоропластов в градиенте перколя. Полученный из лизата хлоропластов белок был подвергнут трипсинолизу с использованием техники FASP (Filter Aided Sample Preparation). Обессоленные триптические гидролизаты были проанализированы на тандемном жидкостном хромато-масспектрометре (nanoLC-MS/MS) с последующем поиском по базам данных и биоинформатической обработкой.

Было обнаружено в общей сложности 116 сайтов, несущих модификацию N^{ε}-(ацетил)лизин и N^{ε}-(формил)лизин. Так в хлоропластах нормальных растений, всего выявлено 39 таких сайтов, из них 13 сайтов N^{ε}-(ацетил)лизина и 27 сайтов Nε-(формил)лизина, тогда как у экспериментальных растений- всего 47 сайтов, из них 20 и 27 сайтов N^{ε}-(ацетил)лизина и N^{ε}-(формил)лизина соответственно. На данный момент показано, что относительное количественное содержание гликированного пептида DQYIAYVKacetylDK, представляющего большую субъединицу RuBisCo увеличилось в 1,5 раза в хлоропластах растений экспериментальной группы по сравнению с контролем.

Таким образом нами показаны как качественные так и количественные изменения в протеоме хлоропластов *Nicotiana benthamiana* при стрессе засухой.

Работа выполнена при поддержке ресурсного центра "Развитие молекулярных и клеточных технологий" Научного парка СПбГУ.

[1]. Bilova, T.; Lukasheva, E.; Brauch, D. et al. A snapshot of the plant glycated proteome: Structural, functional and mechanistic aspect. J. Biol. Chem. 2016, 291, 7621–7636

Современные методы и подходы генетической инженерии растений

Мирошниченко Д.Н.[1,2]*.
[1]Филиал Института Биоорганической химии РАН им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова
[2]Пущинский научный центр биологических исследований, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино, Россия
*e-mail: miroshnchenko@bibch.ey

История генетической инженерии растений насчитывает более 50 лет с момента поучения первых генно-модифицированных растений табака в начале 80-х годов XX столетия. С тех пор, растения, полученные с помощью генной инженерии стали не только важным научным инструментом при изучении различных фундаментальных задач, но и нашли свое практическое применении в виде ГМ сельскохозяйственных культур, выращиваемых на полях более чем в 30-ти станах мира. За прошедшие полвека методы и подходы генной инженерии растений претерпели значительное развитие в возможности направленного формирования новых генетических свойств. Путем внедрения транс-, цис- и интрагенов или других участков генетического материала они позволяют создавать экспериментальные или коммерческие растения для увеличения или подавления функциональной активности одного или нескольких генов. Помимо модификации ядерного генома, существуют способы получения трансластомных растений с модифицированным хлоропластным геномом. В последнее десятилетие, генетическая инженерия является неотъемлемой частью новых биотехнологических направлений, таких как синтетическая биология и редактирование генома растений с помощью систем CRISPR/Cas9, что значительно расширяет молекулярно-биологический инструментарий современных научных исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-16-00047-П.

Метаболомика и протеомика как инструменты современных физиологических исследований

Фролов А.А.*
Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия
*e-mail: frolov@ifr.moscow

Значительное генетическое разнообразие и высокая метаболическая пластичность растений позволяет им быстро и эффективно адаптироваться к динамично изменяющейся среде обитания. Для понимания механизмов, лежащих в основе этого явления, в каждом конкретном случае необходимо установить однозначную связь между действием фактора среды и изменением проявления отдельных генов, а также их ансамблей в контексте функционального и химического фенотипа. Современные методы пост-геномных исследований позволяют наиболее эффективно решать задачи такого рода. Протеомика и метаболомика представляют собой эффективнейшие подходы в рамках пост-геномного инструментария, которые все более интенсивно используются в физиологии растений для выявления и адекватного описания метаболических перестроек, имеющих место в растительном организме в ответ на изменения условий среды и/или генотипа.

Исследование динамики возбужденных состояний хлорофилла в водорастворимом белке BoWSCP методом фемтосекундной спектроскопии

Черепанов Д.А.[1,2], Милановский Г.Е.[2], Неверов К.В.[3], Обухов Ю.Н.[3], Гостев Ф.Е.[1], Шелаев И.В.[1,2], Айбуш А.В.[1], Крицкий М.С.[3], Надточенко В.А.[1]
[1]ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия;
[2]НИИ физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского МГУ, Москва, Россия;
[3]Институт биохимии им. А. Н. Баха, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия.
*e-mail: y.u.r.a.o@mail.ru

Водорастворимые белки семейства WSCP (Water Soluble Chlorophyll-binding Proteins) высших растений не входят в состав фотосинтетического аппарата, однако содержат в составе своего гомотетрамерного пигмент-белкового комплекса до четырёх молекул хлорофилла (Хл), которые организованы в виде двух димеров. Димерная укладка Хл в WSCP делает их структуру сходной с реакционными центрами (РЦ) фотосистем.

Простота устройства WSCP делает их привлекательными в качестве моделей для изучения хлорофилл-белковых взаимодействий, квантово-химических расчётов и прецизионных спектральных исследований. Поскольку димеры Хл в WSCP, как и «специальная пара» Хл/БХл в РЦ, обладают фотохимической активностью [1], возникает вопрос, могут ли особенности пигмент-пигментных и пигмент-белковых взаимодействий в холобелках WSCP определять их способность фотосенсибилизировать редокс-реакции в растворах.

В данной работе для изучения быстрой динамики возбуждения и релаксации энергии в тетрамерном холобелке WSCP был применен метод широкополосной фемтосекундной лазерной спектроскопии «возбуждение-зондирование». Объектом служил холобелок BoWSCP из *Brassica oleracea* с соотношением [Хл a]/[Хл b] = 9/1. В задачи работы входило определение кинетических параметров короткоживущих возбужденных состояний Хл в BoWSCP, установление количества экситонно-сопряженных молекул Хл и поиск возможных фотохимических реакций.

Анализ спектров поглощения BoWSCP (разложение на гауссианы в Q_y-полосе поглощения Хл) позволил выявить вклад основных экситонных состояний E_1 и E_2 (79% и 21%, соответственно) [2]. На основании анализа спектра поглощения BoWSCP при 100K и проведенных расчётов установлено, что в составе холобелка имеются только гомодимеры Хл *a* - Хл *a* (89%) и Хл *b* - Хл *b* (11%) [3].

При возбуждении Хл в холоформах BoWSCP фемтосекундными импульсами (16-40 фс) на длинах волн 670 нм (полоса Q_y) и 430 нм (полоса Соре) были получены переходные спектры поглощения в диапазоне от 400 до 750 нм на задержках 50 фс и 200 пс. Было проведено разложение переходных спектров на компоненты и рассчитано эффективное число молекул Хл, между которыми делокализовано возбуждение. Установлено, что при возбуждении в Q_y-полосу (670 нм) на коротких задержках (<100 фс) хромофорная группа BoWSCP ведет себя как экситонно-сопряженный димер.

Анализ амплитуды стимулированного излучения при возбуждении на 430 и 670 нм обнаружил сверхбыструю фотохимическую реакцию восстановления остатка триптофана, локализованного вблизи центра связывания Хл. Большое время жизни ион-радикальной пары $Трп^{-}Хл^{+}$ (> 200 пс) может указывать на её способность индуцировать последующие редокс-процессы в более протяженной временной шкале.

[1]. Обухов Ю.Н., и др. (2023). *Доклады Академии наук. Науки о жизни*, 509, 88-92.
[2]. Черепанов Д.А., и др. (2023). *Биохимия*, **88,** 1580-1595.
[3]. Cherepanov, D. A. et al. (2024). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 309, 123847.

Параметры фотосинтетической активности в качестве маркеров биотического стресса *Chrysanthemum coreanum* (H. Levl. et Vaniot) Nakai ex T. Mori

Шелепова О.В.[1]*, Баранова Е.Н.[1], Судариков К.А.[2], Савостьянова Л.И.[3], Митрофанова И.В.[1]
[1]Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Москва, Россия
[2]АНО Институт стратегии развития, Москва, Россия
[3]ФИЦ Субтропический научный центр Российской академии наук, Сочи, Россия
*e-mail: shov_gbsad@mail.ru

Коллекция хризантемы корейской (*Chrysanthemum coreanum* (H. Lev. & Vaniot) Nakai ex T. Mori) Главного ботанического сада имени Н. В. Цицина РАН насчитывает 80 сортов. Коллекционный фонд представлен сортами отечественной и зарубежной селекции. Особую ценность представляет комплекс сортов, полученных еще в СССР в прошлом столетии [1]. В открытом грунте растения хризантемы сталкиваются с широким спектром вирусных инфекций. На хризантемах были обнаружены такие вирусы, как *Cucumber mosaic cucumovirus* (CMV), *Tomato aspermy cucumovirus* (TAV), *Tomato spotted wilt tospovirus* (ToSWV), *Tobacco mosaic tobravirus* (TMV), *Potato X potexvirus* (PVX), *Chrysanthemum B carlavirus*, *Chrysanthemum vein chlorosis rhabdovirus*. Качественные методы диагностики с применением иммуноферментного анализа, методов ПЦР и полногеномного секвенирования позволяют определить, каким конкретно вирусом заражено растение. Вместе с тем изучение патогенеза вирусов показывает, что они вызывают изменения в составе хлорофиллов, каротиноидов и антоцианов, что, в конечном счете, приводят к нарушению работы фотосинтетической системы растений. Деградация фотосинтетической системы приводит к потере зеленой окраски. Листья приобретают белесый или желтоватый оттенок. Такое изменение цветового тона можно определить с помощью анализа цветовых характеристик показателей красного, зеленого и голубого спектра RGB-съемки. В результате применения алгоритма, описанного в работе [2], у зеленой части листьев зараженных растений выявлена корреляция между содержанием хлорофилла a (Chla) и показателями RGB, у поврежденной части листа – хлорофилла b (Chlb) и показателями красного диапазона, у части листа, имеющей пограничные повреждения с остатками зеленого пигмента, - каротиноидов и значениями голубого диапазона.

Также проводился гиперспектральный анализ HSV (Hue - цветовой тон варьируется в пределах 0°—360°) с помощью гиперспектральной камеры Синерготрона М.Гк. (ИСР, Москва, Россия). В результате проведенного анализа в листьях зараженных растений выявлена корреляция между Hue и суммарным содержанием хлорофилла (r=0,81), между Hue и Chla r=0,73, а между Hue и Chlb r=0,84. Таким образом, использование показателя HSV для определения содержание хлорофилла наиболее продуктивно на поврежденных листьях с меньшим содержанием хлорофилла. Индекс Hue дает возможность определять поражения листа на более ранних этапах и демонстрирует хорошие перспективы использования данного подхода для быстрого и надежного определения содержания хлорофиллов в качестве показателей состояния фотосинтетического аппарата поврежденных вирусами растений.

Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания ГБС РАН (№ 124030100058-4).

[1]. Кабанцева, И. Н. и др. (2018). Интродукция хризантемы корейской в Главном ботаническом саду им. Н.В. Цицина РАН. *Вестник ландшафтной архитектуры*, (14), 35-40.
[2]. Келдыш М.А. и др. (2024). Сравнительный анализ оптических методов выявления и идентификации вирусной инфекции при мониторинге вегетативно размножаемых сортов сирени. Фотоника. 18(8), 660-669.

Оглавление

Наши спонсоры и партнеры…….....3

Организационный комитет, программный комитет……4

Программа мероприятий……5

Тезисы докладов Пущинских чтений……13

Изучение светозависимого переноса зарядов в реакционных центрах фотосистемы 1 с использованием импульсной микросекундной абсорбционной спектрометрии и высокочастотной ЭПР-спектроскопии: памяти профессора Клауса Мебиуса
Семенов А.Ю…… …… …..14

Фотосинтез в нелистовых тканях: организация и функционирование фотосинтетического аппарата, биологическое значение.
Савченко Т.В……15

Всероссийская конференция с международным участием «Фотосинтез: современное понимание ключевого процесса биосферы»
Секции конференции……16

Тезисы докладов конференции: ……..17

Секция 1
Первичные процессы фотосинтеза и функционирование фотосинтетической электрон-транспортной цепи……17

Влияние грамицидина и СССР на световую кривую реакции Хилла у изолированных хлоропластов гороха
Бородин В.Б. ……17

Обработка высокими температурами и гидроксиламином вызывает сходные изменения в форме OJIP кривых
Волошин Р.А., Юсупов Д.А., Жармухамедов С.К., Аллахвердиев С.И.…….....18

Исследование фотоиндуцированного разделения зарядов в реакционном центре *Chloroflexus aurantiacus* при комнатной и криогенной температурах
Забелин А.А., Ковалев В.Б., Христин А.М., Хатыпов Р.А., Шкуропатов А.Я……..….19

Первичные световые реакции фотосинтеза и продуктивность растений тритикале
Косогова Т.М……..……..20

Изменение pH люмена тилакоидов на свету при увеличении концентрации бикарбоната в среде
Маркин Р.В., Иванов Б.Н., Козулева М.К…….……21

Фотовосстановление цитохрома *c*, сенсибилизированное димерами хлорофилла в составе белков семейства WSCP
Неверов К.В., Обухов Ю.Н., Крицкий М.С……..22

Исследование взаимодействия фотосистемы 1 с экзогенными редокс-медиаторами: аскорбатом, 2,6-дихлорфенолиндофенолом и *N,N,N',N'*-тетраметил-*p*-фенилендиамином
Петрова А.А., Козулёва М.А., Милановский Г.Е., Трубицин Б.В., Тихонов А.Н., Черепанов Д.А., Семёнов А.Ю……..23

Синглет-триплетное деление возбуждения каротиноидов LH1 и LH2 комплексов фототрофных бактерий
Проскуряков И.И., Кленина И.Б., Махнева З.К., Большаков М.А., Москаленко А.А…….…..24

Связывание катионов Fe(II) с высокоаффинным Mn-связывающим участком фотосистемы 2 в темноте в присутствии окислителей
Семин Б.К., Локтюшкин А.В., Васильев Н.С., Ловягина Е.Р…….…….25

Участие каротиноидов в образовании липофильных и гидрофильных органических гидропероксидов и их взаимодействие с белками светособирающих комплексов LH 2 пурпурной серной бактерии *Ectothiorhodospira haloalkaliphila*
Стародубов А.С., Большаков М.А., Ашихмин А.А., Яныкин Д.В…….…….……26

Подходы к повышению термостабильности мутантного фотосинтетического реакционного центра *Cereibacter sphaeroides*
Фуфина Т.Ю., Васильева Л.Г…….……27

Спектральные свойства возбужденного первичного донора электрона в реакционных центрах пурпурной бактерии *Rhodobacter sphaeroides* на фемтосекундной шкале времени
Христин А.М., Фуфина Т.Ю., Васильева Л.Г., Хатыпов Р.А…….…….……28

Восстановление и взаимодействие митохондриального цитохрома с-550 с облученными УФ светом препаратами марганец стабилизирующего белка PsbO и мембранами ФС2
Христин М.С., Смолова Т.Н., Хоробрых А.А……..……..…..29

Исследование первичных реакций разделения зарядов в фотосистеме II растений и цианобактерий методом широкополосной фемтосекундной лазерной спектроскопии
Черепанов Д.А., Забелин А.А., Шкуропатов А.Я., Семенов А.Ю., Надточенко В.А……30

Уникальная карбоангидразная активность Фотосистемы 2
Шитов А.В……..……...31

Влияние каротиноидного состава на стабильность и светоиндуцированное окислительное повреждение комплексов LH2, выделенных из *Ectothiorhodospira haloalkaliphila*
Яныкин Д.В., Ашихмин А.А., Большаков М.А…….32

Секция 2
Метаболизм фотосинтезирующих организмов. Биоэнергетика фотосинтеза…….33

Фотообразование водорода микроводорослями *Chlorella sorokiniana* при кратковременном фотоингибировании
Волгушева А.А., Антал Т.К…….33

Сравнение фотосинтетического и биохимического профиля зеленой микроводоросли *Desmodesmus armatus* ARC06 выращиваемой на различных вариантах аэрации
Гончарова М.А., Заднепровская Е.В., Волошин Р.А., Габриелян Д.А., Лобус Н.В., Аллахвердиев С.И……34

Адаптация микроводорослей к недостатку элементов питания в аэробных и анаэробных условиях.
Гречаник В.И., Цыганков А.А…….35

Влияние минерального голодания на фотосинтетический аппарат зеленой микроводоросли *Coelastrella affinis* IPPAS H-626
Заднепровская Е.В., Волошин Р.А., Габриелян Д.А., Синетова М.А., Аллахвердиев С.И……..…...……36

Биоэнергетику хлоропластов контролируют карбоангидразы?
Иванов Б.Н., Игнатова Л.К., Руденко Н.Н., Надеева Е.М., Маркин Р.В., Козулева М.А……...……37

Методологическая платформа фитохимического анализа: от поиска новых биологически активных веществ к перспективным фармацевтическим и нутрицевтическим препаратам
Орлова А.А., Соболева А.В., Силинская С.А., Цветкова Е.В., Мешалкина Д.А., Жихрева А.В., Мурашко Е.А., Алхаже К., Лихачева О.В. , Редина В.В., Трофимов И.А., Бугеро Н.В., Фролов А.А……38

Иммобилизация водорослей *Chlamydomonas reinhardtii* в условиях одностадийного золь-гель синтеза
Филиппова Е.С., Звонарев А.Н., Терентьев В.В., Лаврова Д.Г……...39

Состав оксилипиновых карбонилов в различных компартментах хлоропласта
Хоробрых С.А., Iijima Y., Shibata D., Mano J……..……..40

Секция 3
Механизмы, обеспечивающие скоординированную регуляцию фотосинтеза и процессов роста, развития и адаптации растений к условиям окружающей среды…….……..……41

Пул пластохинона и активные формы кислорода – важнейшие участники регуляции фотосинтетической активности высших растений
Борисова-Мубаракшина М. М., Ветошкина Д. В., Козулева М. А., Николаев А. А., Вильянен Д. В., Абдуллатыпов А. В., Пыхова Е. С., Руденко Н. Н., Иванов Б. Н…..…..41

State transitions: функция при действии абиотических стрессовых факторов
Ветошкина Д. В., Балашов Н. В., Рыжих Ю. С., Рашимова А. Д., Маркин Р. В., Иванов Б. Н., Борисова-Мубаракшина М. М…….42

DNP-INT и DBMIB как pH-чувствительные зонды для исследования цитохромного b_6f комплекса
Вильянен Д.В., Козулева М.А……43

Некоторые биохимические аспекты адаптации при изменении первичных процессов фотосинтеза у подроста ели европейской в ответ на лесохозяйственные мероприятия
Климова А.В., Галибина Н.А., Новичонок Е.В., Никерова К.М., Софронова И.Н…..….44

Роль АТФ в защите фотосистемы I от фотоингибирования
Козулева М.А……..…..……45

Умеют ли растения выводить кадмий из хлоропластов?
Лысенко Е.А., Клаус А.А., Карташов А.В., Саввина Н.А., Серегина И.Ф……46

Фотосинтез и заморозки: роль стромальной α-карбоангидразы 1 в адаптации *Arabidopsis thaliana* к пониженной температуре
Надеева Е.М., Кочергина Е.Д., Рупперт М.Ю., Руденко Н.Н…….47

Роль сериновой протеазы в ретроградном механизме уменьшения размера антенны фотосистемы 2 в условиях избытка света у высших растений
Николаев А.А., Руденко Н.Н., Новичкова Н.С., Ветошкина Д.В., Борисова-Мубаракшина М.М……..……48

Изменение первичных процессов фотосинтеза у подроста ели после лесохозяйственных мероприятий и их связь с продуктивностью растений
Новичонок Е.В., Климова А.В., Галибина Н.А., Никерова К.М., Софронова И.Н., Тарелкина Т.В., Серкова А.А., Семенова Л.И……49

Роль фитохромов в регуляции метаболизма плодового и ультраструктуры хлоропластов в листьях томата при различных соотношениях красного и дальнекрасного света
Пашковский П.П., Верещагин М.В., Абрамова А.А., Воронков А.А., Халилова Л.А., Фролов А.А., Креславский В.Д……...50

Влияние катионного антисептика октенидина на кривые роста, абсорбционные и флуоресцентные характеристики клеток зеленой водоросли *Scenedesmus quadricauda*
Пащенко В.З., Лукашев Е.П., Воронова Е.Н., Максимов Е.Г., Нокс П.П., Страховская М.Г., Горячев С.Н., Конюхов И.В., Погосян С.И……..51
.
Активность липоксигеназы связана с адаптацией фотосинтетического аппарата пшеницы к водному дефициту
Пермякова М.Д., Пермяков А.В……...…….52

Влияние электрических сигналов на фотосинтетические параметры и устойчивость пшеницы к засухе при предварительной обработке абсцизовой кислотой
Попова А.Ю., Сухова Е.М., Сухов В.С., Юдина Л.М……..…53

Влияние выключения синтеза карбоангидраз стромы хлоропластов αCA1 и βCA1 на фотосинтез в растениях *Arabidopsis thaliana*
Руденко Н.Н., Рупперт М.Ю., Надеева Е.М., Игнатова Л.К., Ветошкина Д.В., Иванов Б.Н……..…54

Влияние теплового шока на редактирование хлоропластной мРНК ndhB
Саввина Н.А., Лысенко Е.А……..….55

Роль фоторецепторов в ответных реакциях фотосинтетического аппарата при действии света высокой интенсивности
Строкина В.В., Ширшикова Г.Н., Креславский В.Д……...…….56

Признаки структуры кроны дерева для исследования площади поверхности листовых пластинок
Телевинова М.С., Антонова И.С……57

Особенности переменной флуоресценции хлорофилла в коре клёна ясенелистного
Тихонов К.Г., Савченко Т.В……...……58

Отрицательная роль жасмоновой кислоты в устойчивости пшеницы к избыточному свету
Хоробрых А.А., Дегтярёв Е.А., Пиголев А.В., Мирошниченко Д.Н., Долгов С.В., Савченко Т.В…….59

Фотосинтетическая активность как маркер физиологического состояния Bryobiotina в стрессовых условиях
Часов А.В., Онеле А.О., Большакова Д.А., Викторова Л.В., Лексин И.Ю., Минибаева Ф.В……..……..60

Влияние дополнительного дальнего красного света на фотосинтетические и ростовые параметры растений салата и устойчивость фотосинтетического аппарата к свету высокой интенсивности
Шмарев А.Н., Креславский В.Д…….……61

Распространяющиеся низкоамплитудные электрические сигналы и их роль в регуляции фотосинтеза и устойчивости пшеницы к почвенной засухе
Юдина Л.М., Попова А.Ю., Сухова Е.М., Сухов В.С…….62

Секция 4
Фотосинтез как фактор продуктивности сельскохозяйственных растений……...…….……..……63

Влияние света с разным соотношением КС/ДКС на фотосинтетические и ростовые параметры салата и его устойчивость к свету высокой интенсивности
Иванов А.А., Шмарев А.Н…….…….63

Реакция фотосинтетического аппарата растений пшеницы на изменение соотношения КС/ДКС в спектре облучения растений
Кособрюхов А.А., Худякова А.Ю., Любимов В.Ю., Прянишников А.И…….….64

Улучшение вкусовых и ароматических характеристик базилика душистого (*Ocimum basilicum* L.) с использованием наночастиц оксида магния
Семенова Н.А., Захаров Д.А., Степанова Е.В., Саримова С.Р……65

Эмбриональный фотосинтез: механизмы и функции
Смоликова Г.Н., Степанова Н.В., Камионская А.М., Медведев С.С…….66

Выявление механизмов влияния зеленого света на эффективность эмбрионального фотосинтеза растений гороха (*Pisum sativum* L.)
Степанова Н.В., Жилкина Т.А., Билова Т.Е., Тараховская Е.Р., Фролова Н.В., Фролов А.А., Медведев С.С., Камионская А.М., Смоликова Г.Н……..……67

Влияние онтогенетических и климатических факторов на активность нелистового фотосинтетического аппарата побегов винограда
Сундырева М.А., Яныкин Д.В., Христин М.С., Грязнова У.В., Пиголев А.В. , Ашихмин А.А., Савченко Т.В……68

Изменения работы фотосистемы II злаковых культур в зависимости от фазы развития
Чуракова С. А., Лисицын Е. М……...……69

Секция 5
Компьютерное моделирование и биоинформатика в исследованиях фотоавтотрофов…….…..70

Исследование нелинейной реакции хлорофилла на периодическое световое воздействие при вызванном засухой стрессе
Асташев М.Е., Игнатенко Д.Н., Шумейко С.А……70

Классификация биологических пигментов путем моделирования их оптических свойств с использованием методов эволюционной оптимизации
Курков В.А., Пищальников Р.Ю., Чесалин Д.Д……..…….71

Разработка комбинированной модели оптических свойств и фотосинтеза в листе двудольных растений
Сухова Е.М., Сухов В.С……..72

Многопараметрическое моделирование спектров поглощения каротиноидов
Чесалин Д.Д., Курков В.А., Пищальников Р.Ю……..….73

Секция 6
Искусственный фотосинтез. Синтетическая биология……..…..74

Биогибридный солнечный элемент с закрепленными на пористом слое TiO_2 тилакоидными мембранами
Волошин Р.А., Жармухамедов С.К., Аллахвердиев С.И…….74

Секция 7
Экологические аспекты фотосинтеза. Фотосинтез как фактор формирования биосферы……...……75

Анализ кинетических кривых световой индукции (OJIP кривых) фотосинтетически активного фитопланктона
Антал Т.К., Волгушева А.А., Дрозденко Т.В., Конюхов И.В., Хрущев С.С……..…75

Новая методика оценки влияния агроэкосистем на содержание CO_2 в атмосфере Земли
Булаткин Г.А……76

Применение комплекса математических методов для оценки состояния фотосистемы II водорослей *Chlorella vulgaris* в условиях стресса
Хрущев С.С., Червицов Р.Н., Плюснина Т.Ю., Фурсова П.В., Конюхов И.В., Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б……77

Секция 8
Вопросы эволюции фотосинтетических систем и фотосинтезирующих организмов……78

Оранжевый каротиноидный белок как следовый маркер эволюционного родства пластид и цианобактерий
Слонимский Ю.Б., Болычевцева Ю.В., Гусев Е.С., Максимов Е.Г., Случанко Н.Н., Стадничук И.Н.……78

Секция 9
Новые подходы в изучении фотосинтеза……79

Использование неоднородности RGB индекса на основе синего и зеленого каналов для оценки характеристик фотосинтеза при действии стрессоров на примере гороха посевного
Андрюшаев Л.Е., Золин Ю.А., Гребнева К.В., Попова А.Ю., Сухов В.С., Сухова Е.М……79

Комбинированная стратегия анализа метаболомов растений и других фотосинтетических организмов
Билова Т.Е. Маргарит А.А., Фролова Н.В., Орлова А.А., Соболева А.В., Мурашко Е.А. Силинская С.А., Зубова М.Ю., Аксенова М.А., Жихрева А.В., Алхаже К., Черевацкая М.А., Фролов А.А……80

Протеомика как методологическая платформа современной физиологии растений
Гурина А.К., Лукашева Е.М., Горбач Д.П., Данько К.В., Бондаренко П.М., Янчик Д.А., Малыгин К.П., Шумилина Ю.С., Фролова Н.В., Леонова Т.С., Фролов А.А……81

Использование RGB индексов для оценки состояния растений в условиях почвенной засухи и засоления на примере пшеницы
Золин Ю.А., Гребнева К.В., Попова А.Ю., Сухов В.С., Сухова Е.М……82

Свет и хлорофилл: важнейшие вехи в истории ранних исследований
Красновский А.А. мл. ……83

Bottom-up протеомный подход при изучении гликирования белков хлоропластов
Лукашева Е.М., Соловьева М.А., Горбач Д.П., Соболева А.В., Фролов А.А……84

Современные методы и подходы генетической инженерии растений
Мирошниченко Д. Н. ……85

Метаболомика и протеомика как инструменты современных физиологических исследований
Фролов А.А……86

Исследование динамики возбужденных состояний хлорофилла в водорастворимом белке BoWSCP методом фемтосекундной спектроскопии
Черепанов Д.А., Милановский Г.Е., Неверов К.В., Обухов Ю.Н., Гостев Ф.Е., Шелаев И.В., Айбуш А.В., Крицкий М.С., Надточенко В.А……..…..87

Параметры фотосинтетической активности в качестве маркеров биотического стресса *Chrysanthemum coreanum* (H. Levl. et Vaniot) Nakai ex T. Mori
Шелепова О.В., Баранова Е.Н., Судариков К.А., Савостьянова Л.И., Митрофанова И.В……..……88

Оглавление……..…….89

Авторский указатель……..……97

.

Авторский указатель

Iijima Y. 40
Mano J. 40
Shibata D. 40
Абдуллатыпов А.В. 41
Абрамова А.А. 50
Айбуш А.В. 87
Аксенова М.А. 80
Аллахвердиев С.И. 18, 34, 36, 74
Алхаже К. 38, 80
Андрюшаев Л.Е. 79
Антал Т.К. 33, 75
Антонова И.С. 57
Асташев М.Е. 70
Ашихмин А.А. 26, 32, 68
Балашов Н.В. 42
Баранова Е.Н. 88
Билова Т.Е. 67, 80
Болычевцева Ю.В. 78
Большаков М.А. 24, 26, 32
Большакова Д.А. 60
Бондаренко П.М. 81
Борисова-Мубаракшина М.М. 41, 42, 48
Бородин В.Б. 17
Бугеро Н.В. 38
Булаткин Г.А. 76
Васильев Н.С. 25
Васильева Л.Г. 27, 28
Верещагин М.В. 50
Ветошкина Д.В. 41, 42, 48, 54
Викторова Л.В. 60
Вильянен Д.В. 41, 43
Волгушева А.А. 33, 75
Волошин Р.А. 18, 34, 36, 74
Воронков А.А. 50
Воронова Е.Н. 51
Габриелян Д.А. 34, 36
Галибина Н.А. 44, 49
Гончарова М.А. 34
Горбач Д.П. 81, 84
Горячев С.Н. 51
Гостев Ф.Е. 87
Гребнева К.В. 79, 82
Гречаник В.И. 35
Грязнова У.В. 68
Гурина А.К. 81
Гусев Е.С. 78
Данько К.В. 81
Дегтярёв Е.А. 59
Долгов С.В. 59
Дрозденко Т.В. 75
Жармухамедов С.К. 18, 74
Жилкина Т.А. 67
Жихрева А.В. 38, 80
Забелин А.А. 19, 30
Заднепровская Е.В. 34, 36
Захаров Д.А. 65
Звонарев А.Н. 39
Золин Ю.А. 79, 82
Зубова М.Ю. 80
Иванов А.А. 63
Иванов Б.Н. 21, 37, 41, 42, 54
Игнатенко Д.Н. 70
Игнатова Л.К. 37, 54
Камионская А.М. 66, 67
Карташов А.В. 46
Клаус А.А. 46
Кленина И.Б. 24
Климова А.В. 44, 49
Ковалев В.Б. 19
Козулева М.А. 21, 23, 37, 41, 43, 45
Конюхов И.В. 51, 75, 77
Кособрюхов А.А. 64
Косогова Т.М. 20
Кочергина Е.Д. 47
Красновский А.А. мл. 83
Креславский В.Д. 50, 56, 61
Крицкий М.С. 22, 87
Курков В.А. 71, 73
Лаврова Д.Г. 39
Лексин И.Ю. 60
Леонова Т.С. 81
Лисицын Е. М. 69
Лихачева О.В. 38
Лобус Н.В. 34
Ловягина Е.Р. 25
Локтюшкин А.В. 25
Лукашев Е.П. 51
Лукашева Е.М. 81, 84
Лысенко Е.А. 46, 55
Любимов В.Ю. 64
Максимов Е.Г. 51, 78
Малыгин К.П. 81
Маргарит А.А. 80
Маркин Р.В. 21, 37, 42
Махнева З.К. 24
Медведев С.С. 66, 67
Мешалкина Д.А. 38
Милановский Г.Е. 23, 87
Минибаева Ф.В. 60
Мирошниченко Д.Н. 59, 85
Митрофанова И.В. 88
Москаленко А.А. 24
Мурашко Е.А. 38, 80
Надеева Е.М. 37, 47, 54

Надточенко В.А. 30, 87
Неверов К.В. 22, 87
Никерова К.М. 44, 49
Николаев А.А. 41, 48
Новичкова Н.С. 48
Новичонок Е.В. 44, 49
Нокс П.П. 51
Обухов Ю.Н. 22, 87
Онеле А.О. 60
Орлова А.А. 38, 80
Пашковский П.П. 50
Пащенко В.З. 51
Пермяков А.В. 52
Пермякова М.Д. 52
Петрова А.А. 23
Пиголев А.В. 59, 68
Пищальников Р.Ю. 71, 73
Плюснина Т.Ю. 77
Погосян С.И. 51
Попова А.Ю. 53, 62, 79, 82
Проскуряков И.И. 24
Прянишников А.И. 64
Пыхова Е.С. 41
Рашимова А.Д. 42
Редина В.В. 38
Ризниченко Г.Ю. 77
Рубин А.Б. 77
Руденко Н.Н. 37, 41, 47, 48, 54
Рупперт М.Ю. 47, 54
Рыжих Ю.С. 42
Саввина Н.А. 46, 55
Савостьянова Л.И. 88
Савченко Т.В. 15, 58, 59, 68
Саримова С.Р. 65
Семёнов А.Ю. 14, 23, 30
Семенова Л.И. 49
Семенова Н.А. 65
Семин Б.К. 25
Серегина И.Ф. 46
Серкова А.А. 49
Силинская С.А. 38, 80
Синетова М.А. 36
Слонимский Ю.Б. 78
Случанко Н.Н. 78
Смоликова Г.Н. 66, 67
Смолова Т.Н. 29
Соболева А.В. 38, 80, 84
Соловьева М.А. 84
Софронова И.Н. 44, 49
Стадничук И.Н. 78
Стародубов А.С. 26
Степанова Е.В. 65
Степанова Н.В. 66, 67
Страховская М.Г. 51
Строкина В.В. 56
Сударикова К.А. 88
Сундырева М.А. 68
Сухов В.С. 53, 62, 72, 79, 82
Сухова Е.М. 53, 62, 72, 79, 82
Тараховская Е.Р. 67
Тарелкина Т.В. 49
Телевинова М.С. 57
Терентьев В.В. 39
Тихонов А.Н. 23
Тихонов К.Г. 58
Трофимов И.А. 38
Трубицин Б.В. 23
Филиппова Е.С. 39
Фролов А.А. 38, 50, 67, 80, 81, 84, 86
Фролова Н.В. 67, 80, 81
Фурсова П.В. 77
Фуфина Т.Ю. 27, 28
Халилова Л.А. 50
Хатыпов Р.А. 19, 28
Хоробрых А.А. 29, 59
Хоробрых С.А. 40
Христин А.М. 19, 28
Христин М.С. 29, 68
Хрущев С.С. 75, 77
Худякова А.Ю. 64
Цветкова Е.В. 38
Цыганков А.А. 35
Часов А.В. 60
Червицов Р.Н. 77
Черевацкая М.А. 80
Черепанов Д.А. 23, 30, 87
Чесалин Д.Д. 71, 73
Чуракова С. А. 69
Шелаев И.В. 87
Шелепова О.В. 88
Ширшикова Г.Н. 56
Шитов А.В. 31
Шкуропатов А.Я. 19, 30
Шмарев А.Н. 61, 63
Шумейко С.А. 70
Шумилина Ю.С. 81
Юдина Л.М. 53, 62
Юсупов Д.А. 18
Янчик Д.А. 81
Яныкин Д.В. 26, 32, 68

ISBN 978-5-6050635-2-0