

Российское фотобиологическое общество  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН –  
обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский  
научный центр биологических исследований РАН»  
Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

**ХІ СЪЕЗД РОССИЙСКОГО  
ФОТОБИОЛОГИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА И  
ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ФОТОБИОЛОГИИ»**

16 – 21 августа 2026 года

**СБОРНИК ТЕЗИСОВ**

Выборг, Россия

УДК 577.345:577.344

ББК 28.071

С94

С94 XI Съезд российского фотобиологического общества и  
Всероссийская конференция «Современные проблемы  
фотобиологии» Сборник тезисов. Выборг, 2026. – 194 с.

ISBN 978-5-6050635-3-7

С 16 по 21 августа 2026 года в г. Выборг проходил XI Съезд российского фотобиологического общества и Всероссийская конференция «Современные проблемы фотобиологии». В настоящем сборнике представлены тезисы 87 докладов участников по следующим направлениям:

- Первичные процессы фотосинтеза и механизмы переноса электронов;
- Фотосинтез в меняющихся условиях окружающей среды;
- Биофотоника: технологии и прикладные исследования;
- Фотофармакология для биомедицинского применения;
- Фоторецепция и трансдукция;
- Фотосинтез и биоэлектrogenез у растений и микроорганизмов;
- Биолуминесценция и фотоника флуоресцентных белков;
- Фототрофные микроорганизмы: светозависимые процессы и производимые ценные продукты.

*Публикуется в авторской редакции*

УДК 577.345:577.344

ББК 28.071

ISBN 978-5-6050635-3-7

© Коллектив авторов

© Федеральный исследовательский центр  
«Пушинский научный центр  
биологических исследований Российской  
академии наук», Пушино

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ОРГАНИЗАТОРЫ</b>                                                                                         | 4   |
| <b>ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО</b>                                                                                 | 6   |
| <b>Секция 1. ПЕРВИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ ФОТОСИНТЕЗА И<br/>МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ</b>                         | 7   |
| <b>Секция 2. ФОТОСИНТЕЗ В МЕНЯЮЩИХСЯ<br/>УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ</b>                                      | 26  |
| <b>Секция 3. БИОФОТОНИКА: ТЕХНОЛОГИИ И<br/>ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>                                      | 63  |
| <b>Секция 4. ФОТОФАРМАКОЛОГИЯ ДЛЯ<br/>БИОМЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ</b>                                        | 112 |
| <b>Секция 5. ФОТОРЕЦЕПЦИЯ И ТРАНСДУКЦИЯ</b>                                                                 | 127 |
| <b>Секция 6. ФОТОСИНТЕЗ И БИОЭЛЕКТРОГЕНЕЗ<br/>У РАСТЕНИЙ И МИКРООРГАНИЗМОВ</b>                              | 154 |
| <b>Секция 7. БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ФОТОНИКА<br/>ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ БЕЛКОВ</b>                                      | 159 |
| <b>Секция 8. ФОТОТРОФНЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ:<br/>СВЕТОЗАВИСИМЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОИЗВОДИМЫЕ<br/>ЦЕННЫЕ ПРОДУКТЫ</b> | 175 |
| <b>АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ</b>                                                                                  | 189 |

---

## ОРГАНИЗАТОРЫ

Российское фотобиологическое общество

Институт фундаментальных проблем биологии РАН –  
обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр  
биологических исследований РАН»

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

## СОСТАВ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА

### **Председатель программного комитета**

д.б.н. *Цыганков Анатолий Анатольевич*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН,  
Вице-президент РФО

### **Заместитель председателя программного комитета**

д.б.н. *Сухов Владимир Сергеевич*,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Вице-президент РФО

### **Члены программного комитета**

академик РАН, д.б.н. *Рубин Андрей Борисович*,  
МГУ им. М.В. Ломоносова

д.б.н. *Антал Тарас Корнелиевич*,  
Псковский государственный университет

д.б.н. *Борисова Мария Мансуровна*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН  
проф., к.б.н. *Высоцкий Евгений Степанович*,  
ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН

проф., д.х.н. *Грин Михаил Александрович*,  
«МИРЭА – Российский технологический университет»

к.б.н. *Забелин Алексей Александрович*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН

д.б.н. *Иванов Борис Николаевич*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН

к.б.н. *Коппель Лариса Алексеевна*,  
Биологический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова

проф., д.х.н. *Надточенко Виктор Андреевич*,  
ФИЦ Химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

д.б.н. *Мамедов Махир Джафарович*,  
НИИ ФХБ им. А.Н. Белозерского, МГУ им. М.В. Ломоносова  
к.х.н. *Петровская Лада Евгеньевна*,  
Институт биоорганической химии имени М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова  
РАН

д.б.н. *Семенов Алексей Юрьевич*,  
НИИ ФХБ им. А.Н. Белозерского, МГУ им. М.В. Ломоносова  
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н. *Тучин Валерий Викторович*,  
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
к.б.н. *Тютерева Елена Владимировна*,  
Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН

## **СОСТАВ ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТА**

### **Председатель организационного комитета**

д.б.н. *Борисова Мария Мансуровна*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН,  
Президент РФО

### **Заместитель председателя организационного комитета**

к.б.н. *Ветошкина Дарья Васильевна*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН,  
Вице-президент РФО

### **Члены организационного комитета**

*Коровина Елена Сергеевна*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН

к.б.н. *Надеева Елена Михайловна*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН

*Стерелюхина Ирина Геннадьевна*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН

*Хасимов Махмадюсуф Хусейнович*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН

к.б.н. *Хорошаева Татьяна Петровна*,  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН

**Сайт конференции:** <http://www.photobiology.ru>

**Электронная почта:** [rsp2023@yandex.ru](mailto:rsp2023@yandex.ru)  
(Секретарь *Хорошаева Татьяна Петровна*)

## ПРИВЕСТСТВЕННОЕ СЛОВО

**Глубокоуважаемые коллеги! Дорогие друзья!**

Мы рады приветствовать вас на ХI съезде Российского фотобиологического общества и Всероссийской конференции «Современные проблемы фотобиологии». Впервые за 20 лет данное мероприятие проводится не на Черноморском побережье, а в Выборге – городе с богатым историческим наследием. Съезд и конференция проводятся при поддержке Института фундаментальных проблем биологии Российской академии наук, обособленного подразделения ФИЦ ПНЦБИ РАН, и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет».

Съезд и конференция рассмотрят следующие проблемы:

- первичные процессы фотосинтеза и механизмы переноса электронов;
- фотосинтез в меняющихся условиях окружающей среды;
- биофотоника: технологии и прикладные исследования;
- фотофармакология для биомедицинского применения;
- фоторецепция и трансдукция;
- фотосинтез и биоэлектротрофизм у растений и микроорганизмов;
- биолюминесценция и фотоника флуоресцентных белков;
- фототрофные микроорганизмы: светозависимые процессы и производимые ценные продукты.

В работе съезда и конференции примут участие около 100 человек.

Таким образом, программа будет, как всегда, насыщенной и интересной. Желаем вам плодотворных дискуссий и новых идей! Надеемся, что вместе с изменением традиционного места проведения съезда РФО и конференции произойдут и другие позитивные изменения в жизни нашего общества.

От имени программного и организационного комитетов

Президент Российского фотобиологического общества

М.М. Борисова

Вице-президент Российского фотобиологического общества

А.А. Цыганков

## **Секция 1. Первичные процессы фотосинтеза и механизмы переноса электронов**

**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ СССР И ГРАМИЦИДИНА НА  
СВЕТОВУЮ КРИВУЮ РЕАКЦИИ ХИЛЛА У ИЗОЛИРОВАННЫХ  
ХЛОРОПЛАСТОВ ГОРОХА**

**A comparative study of the effects of CCCP and gramicidin on the light curve of  
the Hill reaction in isolated pea chloroplasts**

Бородин В.Б.

Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр  
биологических исследований Российской академии наук, ИФПБ РАН»,  
Пушино, Россия

*e-mail: borodin\_ibbp@mail.ru, тел.: +7 968 7328978*

Изучено действие СССР (карбонилцианид м-хлорфенилгидразон) и грамицидина на световую кривую реакции Хилла (феррицианид зависимое выделение  $O_2$ ) у изолированных хлоропластов гороха. Оба вещества усиливают утечку  $H^+$  из тилакоидов и тем самым повышают внутритилакоидный рН ( $pH_{in}$ ). Измерения проводили при рН реакционной среды 7.0 в фосфорилирующих условиях. Известно, что в норме у хлоропластов в этих условиях (контроль) происходит слишком большое снижение  $pH_{in}$  и, как следствие, замедление линейного транспорта электронов (ЛТЭ). Показано, что при интенсивности света ( $I$ )  $\sim 5.0$  Вт/м<sup>2</sup> (24 мкмоль фотонов/м<sup>2</sup> с) у светолимитированного участка световой кривой реакции Хилла в контроле, имелся излом похожий на эффект Кока (излом световой кривой окислительного фотосинтеза, приводящий к уменьшению наклона верхней части её светолимитированного участка и происходящий чаще всего близки СКП).

СССР (0.25–2.00 мкМ) и грамицидин (0.05–0.50 мкМ) изменяли ход световой кривой реакции Хилла и устраняли излом ее светолимитированного участка по разному. Грамицидин устранял этот излом за счет значительно более сильного ускорения реакции при  $I > \sim 5.0$  Вт/м<sup>2</sup>, чем при  $I < \sim 5.0$  Вт/м<sup>2</sup>. Его действие показало, что в норме чувствительность ЛТЭ к  $pH_{in}$  крайне слабая, значительная и весьма значительная соответственно при  $I < \sim 5.0$  Вт/м<sup>2</sup> (лимитирующий свет), при  $I$  от  $\sim 5.0$  до 15.6 Вт/м<sup>2</sup> (лимитирующий свет) и на насыщающем свету. СССР, в отличие от грамицидина, подавлял реакцию Хилла на лимитирующем свету. Данное действие СССР усиливалось при уменьшении  $I$ . В результате, у световой кривой реакции Хилла при  $I < \sim 5.0$  Вт/м<sup>2</sup> возникал прогиб, который в присутствии 1.0 мкМ СССР превращался в задержку начального хода световой кривой. На

насыщающем свету СССР, наоборот, ускорял реакцию Хилла. Причем ускорение реакции было тем больше, чем больше СССР добавляли к хлоропластам. В целом, однако, СССР ускорял реакцию на сильном свету гораздо слабее, чем грамицидин.

Усиление положительного действия СССР и грамицидина на реакцию Хилла при увеличении  $I$  объяснено снижением  $pH_{in}$  и, как следствие, усилением отрицательного действия низкого  $pH_{in}$  на ЛТЭ при переходе к каждой последующей более высокой интенсивности света: чем больше в процентном отношении  $pH_{in}$  подавлял ЛТЭ, тем больше в процентном отношении ЛТЭ ускорялся при нормализации  $pH_{in}$  соответственно ионофорным и протонифорным действиями грамицидина и СССР. Однако причина непропорционально сильного снижения чувствительности ЛТЭ к грамицидину, т.е. чувствительности к  $pH_{in}$ , при  $I < \sim 5.0 \text{ Вт/м}^2$  пока не ясна. Что касается отрицательного действия СССР на реакцию Хилла, то его усиление при уменьшении  $I$ , объяснено изменениями в соотношении между протонифорным и ADRY-действием СССР на реакцию в пользу последнего. Поэтому одной из причин непропорционально сильного подавления реакции Хилла добавленным СССР при  $I < \sim 5.0 \text{ Вт/м}^2$  могло быть прекращение положительного действия и полное сохранение отрицательного ADRY-действия СССР на реакцию при этих освещенностях из-за отмеченного выше перехода ЛТЭ в состояние крайне слабой чувствительности к  $pH_{in}$ . Опыт с грамицидином показал также, что при чрезмерно низком  $pH_{in}$  светолимитированный участок световой кривой реакции Хилла становится дугообразным. Поскольку  $pH_{in}$  в растительных организмах снижается в различных стрессовых условиях, предположено, что светолимитированные участки световых кривых ЛТЭ и фотосинтеза у них при стрессе также становятся дугообразными. Высказано также мнение, что эффект Кока имеет фотохимическую природу.

**СТРУКТУРНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ХЛОРОПЛАСТОВ КАК МЕХАНИЗМ ОПТИМИЗАЦИИ ФОТОСИНТЕЗА: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**Chloroplast Structural Reorganization as a Mechanism for Photosynthesis Optimization: A Comprehensive Analysis Based on Electron Microscopy and Fluorescence Spectroscopy**

*Буханов Е.Р.<sup>1,2\*</sup>, Шеффер А.Д.<sup>1</sup>, Волочаев М.Н.<sup>2</sup>, Пятинина С.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия

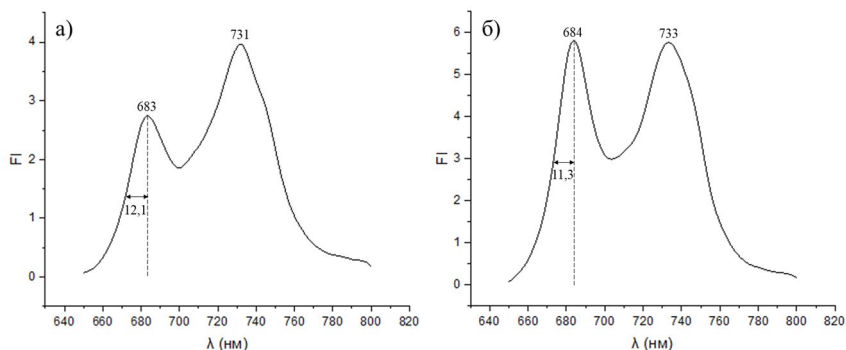
<sup>2</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

*\*e-mail: k26tony@ya.ru, тел.: +7 913 5543030*

Тилакоидные мембраны хлоропластов высших растений образуют периодическую структуру (граны), размеры которой сопоставимы с длиной волны видимого света. Это позволяет рассматривать её как биологический фотонный кристалл [1]. На примере пшеницы, ячменя и рапса исследовано, как агрохимические обработки и условия выращивания влияют на наноархитектуру гран и её оптические проявления.

Методом просвечивающей электронной микроскопии с последующей автоматической обработкой изображений с помощью нейросетевого инструмента GRANA [2] проведён количественный анализ ультраструктуры. Внесение внекорневых подкормок с оптимальной концентрацией раствора приводит к уплотнению упаковки тилакоидов и уменьшению геометрических размеров гран.

Одновременно с морфологическим анализом была проведена регистрация спектров флуоресценции листьев. Характерное различие спектров флуоресценции между контрольными и опытными образцами представлено на рисунке 1. У опытных образцов ширина пика фотосистемы II (685 нм) сужается на 7–10% по сравнению с контролем (разница полуширин достигает 1,8 нм) и смещается в длинноволновую область. Сужение пика свидетельствует о снижении энергетической неоднородности антенных комплексов и увеличении скорости миграции энергии к реакционным центрам. Это подтверждается также прямыми измерениями скорости электронного транспорта, которая в опытных образцах возрастает в 1,7 раза [4].



**Рисунок 1.** Спектры флуоресценции (а) контрольных и (б) опытных листьев рапса.

Таким образом, экзогенные факторы способны вызывать статистически значимую структурную перестройку хлоропластов, которая закономерно отражается в флуоресцентных параметрах. Установленная корреляция между структурными и оптическими характеристиками, а также продуктивностью растений позволяет рекомендовать флуоресцентную спектроскопию в качестве оперативного неинвазивного метода диагностики физиологического состояния растений и оценки эффективности агротехнических приёмов.

## Литература

1. Capretti A., Ringsmuth A.K., van Velzen J.F. et al. Nanophotonics of higher-plant photosynthetic membranes // *Light Sci. Appl.* 2019. V. 8. P. 5.
2. Bukat A., Bukowicki M., Bykowski M. et al. GRANA: An AI-based tool for accelerating chloroplast grana nanomorphology analysis using hybrid intelligence // *Plant Physiol.* 2025. V. 198. No. 2. P. k1af212.
3. Шабанов А.В., Коршунов М.А., Буханов Е.Р. Исследование электромагнитного поля в одномерных фотонных кристаллах с дефектами // *Компьютерная оптика.* 2017. Т. 41. № 5. С. 680–686.
4. Буханов Е.Р., Величко В.В., Липшин А.Г., Шихов В.Н., Сурин Н.А. Влияние внешних воздействий на оптические и структурные характеристики высших растений // *Оптический журнал.* 2025. Т. 92. № 2. С. 116–123.

**ТИОЛОВАЯ РЕДОКС-РЕГУЛЯЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИТОХРОМНОГО *b6f* КОМПЛЕКСА В ТИЛАКОИДАХ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ**

**Thiol-dependent redox regulation of cytochrome *b6f* complex functioning in higher plant thylakoids**

*Вильянен Д.В.\*, Козулева М.А.*

Институт фундаментальных проблем биологии Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пущино, Россия

*\*e-mail: vilyadar@gmail.com, тел.: +7 914 953 2170*

Цитохромный (цит.) *b6f* комплекс осуществляет окисление пластохинола, поддерживая линейный электронный транспорт (ЭТ) и антимицин А (АА) чувствительный циклический электронный транспорт вокруг ФСІ (ЦЭТ ФСІ), в который вовлечены белки PGR1 и PGR5. Предполагается, что ферредоксин-пластохинон оксидоредуктазой, осуществляющей этот путь ЦЭТ ФСІ, является сам цит. *b6f* комплекс, а белки PGR1 и PGR5 необходимы для подстройки скорости линейного и циклического электронного транспорта на уровне цит. *b6f* комплекса, но механизм их действия не установлен. Предположено, что эта регуляция может быть связана с изменением редокс-состояния цистеинов белков PGR1 и PGR5. В этой работе мы исследовали, влияет ли изменение редокс-состояния белков, вовлеченных в этот путь ЦЭТ ФСІ, на функционирование цит. *b6f* комплекса в ходе линейного ЭТ.

В экспериментах на изолированных тилакоидах арабидопсиса измеряли скорости ЭТ на искусственный акцептор электронов, метилвиологен (в условиях, когда ЦЭТ ФСІ не функционирует), в зависимости от концентрации конкурентного ингибитора окисления пластохинола в хинол-окисляющем сайте цит. *b6f* комплекса, DNP-INT, из которых далее рассчитывали концентрации полумаксимального ингибирования ( $IC_{50}$ ). Ранее мы показали, что изменение  $IC_{50}(DNP-INT)$  может отражать изменение состояния хинол-окисляющего сайта во время освещения, что можно использовать как исследовательский инструмент для изучения регуляции цит. *b6f* комплекса.

В тилакоидах арабидопсиса дикого типа влияние АА на  $IC_{50}(DNP-INT)$  зависело от редокс-состояния цистеинов белков тилакоидов: после инкубации тилакоидов с восстановителем дисульфидных связей, трис(2-карбоксиил)фосфином (ТСЕР), АА снижал  $IC_{50}(DNP-INT)$ ; без ТСЕР влияния не наблюдали. В тилакоидах, выделенных из растений мутантных линий арабидопсиса *pgr5-1* (без PGR5) и *pgr1lab* (без PGR5 и PGR1),

эффект АА на  $IC_{50}(\text{DNP-INT})$  отсутствовал вне зависимости от редокс-состояния цистеинов, что указывает на то, что редокс-состояние цистеинов именно PGR1 и PGR5 опосредует обнаруженный эффект АА. Восстановление цистеинов PGR1 и PGR5 в тилакоидах дикого типа при их инкубации с ТСЕР показано с помощью вестерн-блот анализа. Далее исследовали, как отсутствие самих PGR5 и PGR1 белков влияет на  $IC_{50}(\text{DNP-INT})$ . Было обнаружено, что  $IC_{50}$  в тилакоидах мутантных линий и дикого типа практически не различалась в контрольных условиях, однако при инкубации тилакоидов с ТСЕР  $IC_{50}(\text{DNP-INT})$  была ниже в тилакоидах мутантных линий. При этом содержание цит. *b<sub>6</sub>f* комплексов между генотипами не различалось.

Таким образом, изменение редокс-состояния белков PGR1 и PGR5 переводит цит. *b<sub>6</sub>f* комплексы тилакоидов арабидопсиса в АА-чувствительное состояние, которое влияет на работу хинол-окисляющего сайта и линейный электронный транспорт, что может быть частью механизма подстройки циклического и линейного электронного транспорта на уровне цит. *b<sub>6</sub>f* комплекса в высших растениях.

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

**РЕКОМБИНАЦИЯ ЗАРЯДОВ В ФОТОСИСТЕМЕ 1  
ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ КОНФОРМАЦИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ**

**Charge recombination in photosystem I under limited conformational mobility**

Милановский Г.Е.<sup>1\*</sup>, Витухновская Л.А.<sup>1,2</sup>, Семёнов А.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт физико-химической биологии имени А.Н. Белозерского, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

\*e-mail: milanovsky@belozersky.msu.ru, тел.: +7 495 9393188

Светоиндуцированное разделение зарядов в фотосистеме 1 (ФС1) является одним из наиболее эффективных процессов преобразования энергии света в биологических системах. Вслед за этой реакцией электрон переносится по цепи кофакторов  $P_{700} \rightarrow A_0 \rightarrow A_1 \rightarrow F_X \rightarrow [F_A/F_B]$ , а в отсутствие внешних доноров и акцепторов электрона затем происходит рекомбинация зарядов. Кинетика этих процессов определяется как редокс-свойствами кофакторов, так и структурой их белкового окружения, влияющего на энергию реорганизации реакции.

В настоящей работе, продолжающей более ранние исследования [1,2], была исследована температурная зависимость рекомбинации зарядов в комплексах ФС1 цианобактерий в широком температурном диапазоне. Использование мутантных штаммов *menG*, *menF*, *menG rubA* и *menB rubA* позволило варьировать величину потенциального барьера, с преодолением которого сопряжен процесс обратного переноса электрона с терминальных акцепторов, что отражается в изменении наблюдаемой энергии активации реакции. При охлаждении в водно-глицериновых смесях ниже температуры стеклования (~180 K) происходило резкое подавление конформационных перестроек белка и растворителя, а рекомбинация зарядов становилась безактивационной. Фиксация ФС1 в дегидратированных трегалозных матрицах, уравновешенных в условиях с контролируемой влажностью, позволила пронаблюдать динамику этого процесса при температурах, близких к комнатным, отделив, таким образом, роль конформационной подвижности белкового матрикса от температурной зависимости реакции переноса электрона.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 26-74-10080.

## **Литература**

1. Cherepanov et al, J. Phys. Chem. B 2018, 122, 33, 7943–7955
2. Milanovsky et al., BBA-Bioenergetics 2019, 1860, 8, 601-610

**АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО  
ТРАНСПОРТА У МУТАНТА ЯЧМЕНЯ *CHLORINA-F2.3613*,  
ЛИШЁННОГО ХЛОРОФИЛЛА *b***

**Analysis of cyclic electron flow in *chlorina-f2.3613* barley mutant lacking  
chlorophyll *b***

Павлов И.Б.\*, Тютерева Е.В.

Ботанический институт имени В.Л. Комарова Российской академии наук

\*e-mail: IPavlov@binran.ru, тел.: +7 920 1866914

Циклический электронный транспорт (ЦЭТ) является важным адаптивным механизмом фотосинтезирующих организмов, позволяющим им точно регулировать фотосинтетический перенос электронов в тилакоидах в соответствии с текущими условиями освещения и энергетическими потребностями стромы. Существует несколько подходов к изучению ЦЭТ. Соотношение  $Y(I)/Y(II)$  широко используется в качестве показателя, отражающего отношение ЦЭТ к линейному переносу электронов (ЛЭТ) [1]. В качестве альтернативного подхода для характеристики ЦЭТ принято использовать параметры, выводимые из кинетики окисления P700, индуцированного дальним красным светом (ДКС), и кинетики его восстановления в темноте [2,3].

Мутантная линия *chlorina-f2.3613 Hordeum vulgare*, полностью лишенная хлорофилла *b* из-за дефекта фермента хлорофиллид *a* оксигеназы, характеризуется значительными нарушениями структуры и функции фотосинтетического аппарата, которые, как правило, приводят к снижению продуктивности. Хотя исследования мутантов *chlorina* у других видов указывают на снижение активности ЦЭТ, динамика и регуляция соотношения ЦЭТ/ЛЭТ у этого мутанта остаются недостаточно изученными.

По сравнению с диким типом (ДТ), у *chlorina-f2.3613* наблюдалось гораздо более выраженное снижение  $Y(I)$  и  $Y(II)$ , а также уменьшение  $Y(I)/Y(II)$ . Последнее было вызвано главным образом гораздо более быстрым снижением  $Y(I)$ , что объясняется быстро растущим  $Y(ND)$ , в то время как  $Y(NA)$  было низким и сходным с его величиной у ДТ.

Анализ окисления P700, индуцированного ДКС, и последующего восстановления P700 в темноте проводился на основе протокола предосвещения, описанного в [2], с некоторыми модификациями. Кинетика окисления P700, характеризующаяся медленным S-образным нарастанием с выраженной задержкой в начале освещения, отражает

постепенное снижение соотношения ЦЭТ/ЛЭТ, вызванное как увеличением ЛЭТ, так и уменьшением ЦЭТ [2,4]. Окисление P700 протекало в мутанте значительно медленнее, чем в ДТ, что свидетельствует о более медленном изменении соотношения ЦЭТ/ЛЭТ. В то же время восстановление P700 в темноте у мутанта происходило значительно быстрее, что также указывает на высокую активность ЦЭТ [2].

Работа выполнена при поддержке госзадания БИН РАН № 123022200048-0.

### Литература

1. Yamori W., Shikanai T., Makino A. *Scientific reports* 5.1 (2015): 13908.
2. Bulychev, A. A., & Vredenberg, W. J. (2010). *Russian journal of plant physiology*, 57(5), 599-608.
3. Rühle, T., Dann, M., Reiter, B., Schünemann, D., Naranjo, B., Penzler, J. F., ... & Leister, D. (2021). *Nature communications*, 12(1), 3941.
4. Belyaeva, N. E., Bulychev, A. A., Riznichenko, G. Y., & Rubin, A. B. (2019). *Photosynthesis Research*, 140(1), 1-19.

**ЭВОЛЮЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ФОТОСИНТЕЗА**

**Evolutionary optimization of modeling of the primary processes of photosynthesis**

Пицальников Р.Ю.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
Москва, Россия

*e-mail: rpishchal@kapella.gpi.ru, тел.: +7 499 5038734*

Достижения в области вычислительных технологий сегодня позволяют по-новому подходить к теоретическим исследованиям фундаментального явления живой природы – фотосинтеза. Доступность рентгеноструктурных данных, лазерные технологии, работающие с ультракороткими импульсами, эффективная обработка больших объемов цифровой информации и использование суперкомпьютеров для моделирования физических и химических процессов вдохнули новую жизнь в моделирование оптического отклика фотосинтетических пигментов и пигмент-белковых комплексов. Характерные времена протекания "сверхбыстрых" физических процессов оцениваются в пико- и фемтосекундах масштабах времени. При таких условиях использование полуклассической квантовой теории при численных расчётах динамики электронных возбужденных состояний внутри антенных комплексов вполне оправдано.

Из-за однородного и неоднородного уширения спектры поглощения пигмент-белковых комплексов достаточно широки по сравнению со спектрами неорганических кристаллов и металлов. Профиль полосы почти всегда является суммой вкладов различных компонентов, а белковое окружение и отдельные аминокислоты в случае фотосинтетических антенных комплексов также влияют на энергии электронных переходов в молекулах. Также, в расчётах количество свободных параметров может достигать сотен, и поэтому проблема поиска уникального решения для таких систем чрезвычайно актуальна, поскольку в большинстве современных исследований редко предпринимаются попытки обсудить уникальность предлагаемых механизмов передачи энергии и разделения зарядов. Именно здесь ключевую роль могут сыграть эволюционные алгоритмы оптимизации.

Одним из наиболее изученных и эффективных методов эволюционной оптимизации является дифференциальная эволюция. Его преимущество перед другими алгоритмами – возможность непрерывного

изменения свободных параметров и, что наиболее важно, способность алгоритма избегать локальных минимумов и, при надлежащей настройке, находить глобальный минимум [1]. С помощью программного обеспечения, разработанного нами ранее [2-5], были получены квантовые модели как для мономерных пигментов, так и светособирающих комплексов, таких как хлоросомы, фотосистема I и реакционный центр фотосистемы II. Разработанная методика потенциально может быть использована при моделировании оптических свойств любой заданной конфигурации пигментов, в частности, при моделировании оптических свойств кристаллов красителей.

### Литература

1. Pishchalnikov, R. (2018) Journal of Computational Physics, 372:603-615, doi: 10.1016/j.jcp.2018.06.040
2. Pishchalnikov, R.Y.; Shubin, V.V.; Razjivin, A.P. (2020) Photosynthesis Research, 146:75-86, doi: 10.1007/s11120-020-00779-y
3. Chesalin D.D., Kulikov E.A., Yaroshevich I.A., Maksimov E.G., Selishcheva A.A., Pishchalnikov R.Y. (2022) Swarm and Evolutionary Computation, 75:101210, doi: 10.1016/j.swevo.2022.101210
4. Pishchalnikov R.Y., Yaroshevich I.A., Zlenko D.V., Tsoraev G.V., Osipov E.M., Lazarenko V.A., Parshina E.Y., Chesalin D.D., Sluchanko N.N., Maksimov E.G. (2023) Photosynthesis Research 156: 3-17, doi: 10.1007/s11120-022-00955-2
5. Chesalin D.D., Pishchalnikov R.Y. (2025) Applied Soft Computing, 171:112753, doi: 10.1016/j.asoc.2025.112753

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАСТОКИНОНА И ЕГО ОКИСЛЕННЫХ ПРОИЗВОДНЫХ  
С РЕКОМБИНАНТНОЙ ПЛАСТИДНОЙ ТЕРМИНАЛЬНОЙ ОКСИДАЗОЙ (ПТО)  
*ARABIDOPSIS THALIANA***

**Interactions of plastoquinone and its oxidized derivatives with recombinant  
plastid terminal oxidase (PTOX) from *Arabidopsis Thaliana***

Пыхова Е.С.<sup>1\*</sup>, Трубицина Л.И.<sup>2</sup>, Козулева М.А.<sup>1</sup>, Вильянен Д.В.<sup>1</sup>,  
Ашихмин А.А.<sup>1</sup>, Борисова-Мубаракишина М.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН – обособленное  
подразделение ФИЦ Пушинский научный центр биологических  
исследований РАН, Пушкино, Россия

<sup>2</sup>Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН –  
обособленное подразделение ФИЦ Пушинский научный центр  
биологических исследований РАН, Пушкино, Россия

\*e-mail: katkapw@yandex.ru, тел.: +7 912 5518685

Пластидная терминальная оксидаза (ПТО) представляет собой мембранную негемовую дижелезную хинолоксидазу хлоропластов растений, активность которой модулируется редокс-состоянием регуляторных цистеинов. Окисляя пластогидрохинон (ПХН<sub>2</sub>), ПТО предотвращает избыточное восстановление пула пластохинона (ПХ) в стрессовых условиях. Пул ПХ в основном представлен пластохиноном А (ПХ А) с девятичленной изопреноидной боковой цепью. Однако в условиях окислительного стресса образуются производные ПХ с измененным строением боковой цепи, гидроксипластохиноны (ПХ С), содержащие в боковой цепи гидроксильные группы, что потенциально может влиять на способность ПТО окислять пул ПХ. Исследование того, влияет ли модификация боковой цепи ПХ на его сродство к ПТО, в нативных условиях осложнено тем, что подходы для отделения ПТО-зависимого окисления ПХН<sub>2</sub> от других путей окисления пула ПХ в хлоропластах имеют свои ограничения. Для решения данной задачи необходимы получение рекомбинантного фермента и создание экспериментальной системы, позволяющей надежно измерять активность ПТО в отношении разных субстратов в условиях контролируемого редокс-состояния фермента.

Целью работы являлось получение рекомбинантного ПТО *Arabidopsis thaliana* и создание экспериментальной системы для исследования взаимодействия фермента с ПХ А и ПХ С.

Для этого из листьев *A. thaliana* был амплифицирован ген *ptox*, на основе которого сконструированы экспрессионные плазмиды для гетерологической экспрессии в клетках *Escherichia coli*. Полученные конструкции содержали полноразмерный ген *ptox*, а также вариант без N-концевой транзитной последовательности. Экспрессия рекомбинантного белка была подтверждена методом иммуноблоттинга с использованием специфических антител к ПТО. Для функционального анализа использовали мембранные препараты *E. coli*, содержащие рекомбинантную ПТО.

Ферментативную активность ПТО оценивали по скорости поглощения кислорода в присутствии НАДН. Показано, что добавление специфического ингибитора ПТО – октилгаллата – приводит к выраженному снижению скорости поглощения кислорода, что подтверждает сохранение каталитической активности рекомбинантного фермента в гетерологической системе. Полученная экспериментальная система была использована для анализа взаимодействия ПТО с экзогенными ПХ. Установлено, что добавление ПХ А и ПХ С к ПТО поразному влияет на скорость поглощения кислорода.

Таким образом, создана функциональная модель высокоактивной ПТО в мембранах *E. coli*, позволяющая анализировать ферментативную активность и взаимодействие с ПХ А и ПХ С, а также исследовать ее редокс-регуляцию в контролируемых условиях.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант РНФ № 25-24-00597, <https://rscf.ru/project/25-24-00597/>).

**ИЗМЕНЕНИЕ АСИММЕТРИИ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ  
ПО ВЕТВЯМ РЕДОКС-КОФАКТОРОВ В ФОТОСИСТЕМЕ 1 ИЗ МУТАНТНОГО  
ШТАММА *menB* ЦИАНОБАКТЕРИИ *Synechocystis* sp. PCC 6803**

**Change in the electron transfer asymmetry along the redox cofactor branches  
in Photosystem I from the *menB* mutant of cyanobacteria  
*Synechocystis* sp. PCC 6803**

Семенов А.Ю.<sup>1</sup>, Мамедов М.Д.<sup>1</sup>, Витухновская Л.А.<sup>1,2</sup>,  
Петрова А.А.<sup>1</sup>, Милановский Г.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИ физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского,  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>ФИЦ «Химическая физика» им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: semenov@belozersky.msu.ru, тел.: +7 495 9393188

Делеция гена *menB* у цианобактерии *Synechocystis* sp. PCC 6803 приводит к замене нативных молекул филлохинона в сайтах А<sub>1</sub> фотосистемы 1 (ФС1) на молекулы пластохинона-9 (PQ). При этом скорость прямого переноса электронов от пластосемихинона к 4Fe4S кластерам замедляется примерно в 1000 раз по сравнению с диким типом (Semenov et al, 2000). Образование разности электрических потенциалов ( $\Delta\psi$ ), связанной с переносом электронов в ФС1, регистрировалось в протеолипосомах, содержащих выделенные комплексы ФС1 из мутанта *MenB*, с помощью прямого электрометрического метода при однократном лазерном возбуждении. Мы использовали два разных образца ФС1 из вариантов *menB*, содержащих либо слабо-связанный PQ (PQ<sub>L</sub>), либо его прочно-связанный аналог 2,3-диметил-5-фитил-1,4-бензохинон (PQ<sub>T</sub>). Вслед за быстрой кинетически неразрешенной фазой образования  $\Delta\psi$ , обусловленной переносом электронов от димера хлорофилла P<sub>700</sub> к молекулам PQ, следовало более медленное нарастание в субмиллисекундном диапазоне. В ФС1, содержащей PQ<sub>T</sub> этот дополнительный рост  $\Delta\psi$  аппроксимировался двумя экспоненциальными компонентами с характерными временами  $\tau_1 \sim 5$  мкс (~62%) и  $\tau_2 \sim 25$  мкс (~38%). В ФС1, содержащей PQ<sub>L</sub>, значения  $\tau$  составляли  $\tau_1 \sim 10$ -15 мкс (~70%) и  $\tau_2 \sim 90$ -100 мкс (~30%). Эти компоненты были отнесены к переносу электронов от PQ<sub>T</sub> и PQ<sub>L</sub> в ветвях В и А (А<sub>1В</sub> и А<sub>1А</sub>) через 4Fe4S кластер F<sub>X</sub> к терминальным акцепторам F<sub>A</sub>/F<sub>B</sub>, соответственно. В отличие от результатов, полученных с использованием ФС1 дикого типа, в ФС1 из мутантов *menB* наблюдалось выраженное функциональное преобладание

пути переноса электронов по ветви *B*. Мы предполагаем, что перераспределение потока электронов вдоль ветвей кофакторов ФС1 происходит из-за уменьшения свободной энергии переноса электронов между  $A_{1A}$  и  $F_X$ , что делает этот процесс термодинамически невыгодным.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 23-74-00025.

## Литература

1. Semenov AYu, Vassiliev IR, van der Est A, Mamedov MD, Zybaïlov B, Shen G, Stehlik D, Diner BA, Chitnis PR, Golbeck JH (2000) Recruitment of a Foreign Quinone into the  $A_1$  Site of Photosystem I, JBC 2000, 275(31) 23429–23438

**ИЗУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕКАЧИВАНИЯ ПРОТОНОВ В ГЕМ-МЕДНЫХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ОКСИДАЗАХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

**Study of molecular mechanisms of proton transfer in heme-copper oxidases in real time**

Силецкий С.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

*e-mail: siletsky@belozersky.msu.ru, тел.: +7 495 9395149*

Выяснение особенностей устройства и функционирования мембранных белков, использующих разные источники энергии для создания и поддержания трансмембранного потенциала в процессе дыхания и фотосинтеза является одной из важнейших задач молекулярной биофизики. Гем-медные дыхательные оксидазы представляют собой высокоэффективные молекулярные машины. Эти мембранные ферменты катализируют заключительный этап клеточного дыхания у эукариот и многих прокариот: перенос электронов от цитохромов или хинолов к молекулярному кислороду и восстановление кислорода до воды. Свободная энергия, высвобождаемая в окислительно-восстановительной реакции, преобразуется дыхательными оксидазами в трансмембранный градиент электрохимического потенциала ионов водорода. Гем-медные дыхательные оксидазы образуют протон-движущую силу как за счет переноса электронов и протонов в каталитический кислород-восстанавливающий центр с разных сторон мембраны, так и благодаря уникальной способности к редокс-сопряженному направленному перекачиванию протонов через мембрану. Сочетание направленного мутагенеза по ключевым аминокислотным остаткам и высокотехнологических биофизических подходов в исследовании с временным разрешением стадий внутри-белкового переноса электронов и протонов в ходе одного каталитического оборота фермента, позволяет получать уникальную информацию о механизмах сопряженной транслокации протонов в гем-медных дыхательных оксидазах в режиме реального времени [1-5].

Автор выражает благодарность за финансовую поддержку фонду РНФ (грант № 22-14-00104).

## Литература

1. S.A. Siletsky, A.S. Pawate, K. Weiss, R.B. Gennis, A.A. Konstantinov (2004). *J Biol Chem.* 279(50):52558-65.
2. S.A. Siletsky, J. Zhu, R.B. Gennis, A.A. Konstantinov (2010) *Biochemistry*, 49: 3060-3073.
3. S.A. Siletsky, R.B. Gennis, *Biochemistry* (Moscow) (2021), 86:105-122.
4. S.A. Siletsky, T. Soulimane, I. Belevich, R.B. Gennis, M. Wikstrom, *Biochimica et Biophysica acta. Bioenergetics*, (2021) 1862(9): 148450
5. S.A. Siletsky (2023) *Biochemistry* (Moscow). 88(10):1513-1527.

## **Секция 2. Фотосинтез в меняющихся условиях окружающей среды**

**РЕГУЛЯЦИЯ СВЕТОСБОРА ФС2 РАСТЕНИЯМИ ЯЧМЕНЯ  
ПРИ УМЕРЕННОМ ЗАСОЛЕНИИ**

**Regulation of PS II Light Harvesting in Barley under Moderate Salinity**

*Балашов Н.В. \*, Маркин Р.В., Ветошкина Д.В.,  
Борисова-Мубаракишна М.М.*

Институт фундаментальных проблем биологии РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», Пушкино, Россия

*\*e-mail: kbalashov@mail.ru, тел.: +7 985 7237580*

В ходе жизни растения вынуждены адаптироваться к условиям окружающей среды. Одним из адаптационных механизмов является регуляция светосбора. Кратковременное изменение условий освещения запускает процесс state transitions, заключающийся в перераспределении антенных комплексов между фотосистемами. При освещении светом низкой интенсивности, преимущественно возбуждающим фотосистему 2 (ФС2), происходит активация STN7-киназы, фосфорилирующей белки части светособирающего комплекса ФС2 (ССК2), что приводит к ее миграции к ФС1. При затемнении или освещении светом, преимущественно возбуждающим ФС1, происходит дефосфорилирование белков ССК2, и миграция ССК2 обратно к ФС2. В условиях высокой интенсивности света STN7 киназа оказывается неактивной, однако механизм ее ингибирования до сих пор неизвестен.

Повышение уровня освещенности приводит к увеличению образования активных форм кислорода (АФК) в том числе и  $H_2O_2$  компонентами фотосинтетической электрон-транспортной цепи. В живой клетке одними из мишеней для  $H_2O_2$  являются цистеиновые остатки различных ферментов, в том числе и киназ, что позволяет выдвинуть гипотезу о роли  $H_2O_2$  в регуляции активности STN7 киназы. При этом повышение освещения не единственный фактор, приводящий к увеличению продукции  $H_2O_2$  в хлоропластах. К таким факторам можно отнести засоление, которое в данной работе имитировали поливом растений раствором 150 мМ NaCl в течение 10 дней.

Используя анализ флуоресценции хлорофилла *a* при комнатной температуре, а также оценку содержания фосфорилированных белков Lhcb1 и Lhcb2, было показано, что действие засоления приводит к быстрому, но обратимому ингибированию state transitions. Уже через 2 часа после добавки NaCl детектировали снижение уровня

фосфорилирования белков Lhcb1 и Lhcb2. Показано, что в это же время происходило достоверное возрастание содержания  $H_2O_2$  в листьях, снижающееся через 4 часа и вновь возрастающее уже через 24-48 часа. Параллельно со «второй волной» возрастания содержания  $H_2O_2$  в листьях происходило уменьшение количества белков Lhcb1 и Lhcb2, что согласуется с показанной ранее ролью  $H_2O_2$  в передаче сигнала для регуляции размера CCK2 (Borisova-Mubarakshina et al., 2015).

Для подтверждения участия  $H_2O_2$  в регуляции активности STN7 проводили эксперименты на изолированных тилакоидах арабидопсиса. Впервые показано, что пероксид водорода ингибирует накопление Lhcb1-P и Lhcb2-P белков в изолированных тилакоидах при низкой интенсивности света. С другой стороны показано, что добавка каталазы к тилакоидам, освещаемых светом высокой интенсивности, приводит к отсутствию ингибирования накопления Lhcb1-P и Lhcb2-P.

Таким образом, в работе показано, что пероксид водорода, продукция которого возрастает при действии различных факторов, ингибирует протекание процесса state transitions.

## Литература

1. Borisova-Mubarakshina, M. M., Ivanov, B. N., Vetoshkina, D. V., Lubimov, V. Y., Fedorchuk, T. P., Naydov, I. A., ... & Bassi, R. (2015). Long-term acclimatory response to excess excitation energy: evidence for a role of hydrogen peroxide in the regulation of photosystem II antenna size. *Journal of experimental botany*, 66(22), 7151-7164.

**МОДИФИКАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ STATE TRANSITIONS *IN VIVO***

**Modification and validation of an *in vivo* method for measuring state transitions**

Ветошкина Д.В. \*, Балашов Н.В., Иванов Б.Н.

Институт фундаментальных проблем биологии РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», Пушкино, Россия

\*e-mail: [vetoshkina\\_d@mail.ru](mailto:vetoshkina_d@mail.ru), тел.: +7 977 5027590

Перераспределение поглощенной солнечной энергии между фотосистемами (ФС), называемое переходом состояний (state transitions, ST), является одним из механизмов краткосрочной адаптации. Первый шаг в этом процессе - активация STN7 киназы, которая фосфорилирует белки, Lhcb1 и Lhcb2, внешней светособирающей антенны ФС 2 (ССК2), в результате чего ССК2 отсоединяются от ФС 2 и связываются с ФС 1.

Классический способ оценки процесса ST – регистрация спектров низкотемпературной флуоресценции хлорофилла *a* (Хл *a*). Другим подходом может быть оценка содержания фосфорилированных белков Lhcb1 и Lhcb2. Однако оба этих подхода не являются неинвазивными и не позволяют оценивать ST в условиях близких к *in vivo*. Неинвазивным методом является регистрация флуоресценции Хл *a* при комнатной температуре при освещении и расчет параметра Fr, величина которого коррелирует с величиной ST (Haldrup et al. 2001).

В ходе выполнения данной работы нами была модифицирована методики определения параметра Fr, предложенная в работе Haldrup et al. 2001, для более точной оценки величины ST. В оригинальном методе используется следующий протокол освещения: 10 мин освещение листа светом, возбуждающий предпочтительно ФС2 (ближний красный или синий свет), далее при включенном ближнем красном свете включается дальний красный свет еще на 30 минут, после этого дальний красный свет выключается. Параметр Fr рассчитывается по формуле  $Fr = (\Delta F_{FC1} - \Delta F_{FC2}) / \Delta F_{FC1}$ , где  $\Delta F_{FC2} = F_{ii}' - F_{ii}$ , разница между уровнем флуоресценции Хл *a* через 10 минут освещения листьев красным светом и уровнем флуоресценции Хл *a* сразу после включения дальнего красного света.  $\Delta F_{FC1} = F_i' - F_i$ , разница между уровнем флуоресценции Хл *a* через 30 мин освещения красным и дальним красным светом и уровнем флуоресценции Хл *a* сразу после выключения дальнего красного света.

В предложенной модификации после 10 мин освещения красным светом он выключается и включается дальний красный свет на 30 минут. Полное переключение света, как предполагается, должно приводить к полному переходу фотосинтетического аппарата из состояния 2, когда ССК2 связан с ФС1, к состоянию 1, когда все ССК2 возвращаются к ФС2.

Для сравнения описанных выше методов оценивали содержание фосфорилированных белков Lhcb1 и Lhcb2 в адаптированных к темноте листьях, а также после всех вариантов освещения, соответствующих описанным выше протоколам измерения Fr. При одновременном использовании красного и дальнего красного света содержание белков снижалось относительно освещения только красным светом, но оставалось достоверно выше, чем в темноте или после освещения дальним красным светом. Таким образом, в оригинальной методике оценивается некое промежуточное состояние, когда часть ССК2 связана с ФС2, а часть остается около ФС1.

Кроме того, нами было показано, что параметр Fr, измеренный модифицированным методом при освещении светом высокой интенсивности полностью отражает ингибирование процесса ST в этих условиях. Увеличение освещенности до 600 мкмоль квантов/м<sup>2</sup>с листьев арабидопсиса приводило к снижению параметра Fr практически до 0. Таким образом, предложенный метод позволяет оценивать максимально возможный переход ССК2 между фотосистемами, в том числе в стрессовых условиях.

## Литература

1. Haldrup, A., Jensen, P. E., Lunde, C., & Scheller, H. V. (2001). Balance of power: a view of the mechanism of photosynthetic state transitions. *Trends in Plant Science*, 6(7), 301-305.

## СОДЕРЖАНИЕ ПЛАСТОХИНОНА КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ УСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ

### **The content of plastoquinone determines plant sustainability**

*Ветошкина Д.В.<sup>1</sup>, Руденко Н.Н.<sup>1</sup>, Маренкова Т.В.<sup>2</sup>, Николаев А.А.<sup>1</sup>,  
Ашихмин А.А.<sup>1</sup>, Борисова-Мубаракшина М.М.<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», Пушкино, Россия

<sup>2</sup>Институт цитологии и генетики Сибирского отделения РАН (ФИЦ ИЦиГ СО РАН), Новосибирск, Россия

*\*e-mail: mubarakshinamm@gmail.com; тел: +7 496 73732715*

Пластохинон (ПХ) играет важную роль в высших растениях, выступая центральным элементом фотосинтетических и метаболических процессов. ПХ пул участвует не только в линейном переносе электронов, но и в альтернативных путях переноса электронов в фотосинтетической электрон-транспортной цепи. Кроме того, ПХ обладает выраженной антиоксидантной активностью и мембраностабилизирующим действием. Известно, что окислительно-восстановительное состояние ПХ пула отражает функциональное состояние фотосинтетического аппарата и служит ключевым сигналом для запуска регуляторных изменений и приспособления растений к стрессовым условиям. Предполагается, что общее содержание ПХ в хлоропластах также может иметь фундаментальное значение для адаптации растений, однако взаимосвязь между количественным содержанием ПХ и адаптационным потенциалом растений изучена недостаточно.

Для оценки влияния изменений в содержании ПХ на фотосинтетическую активность высших растений и устойчивость растений нами были созданы трансгенные линии *Arabidopsis thaliana* с повышенным биосинтезом ПХ, используя два подхода. Для создания растений с сверхэкспрессией генов, участвующих в биосинтезе ПХ, были выбраны два вектора: pBI121 и pCAMBIA1300. Вектор pBI121 с геном *npt II*, продукт которого обеспечивает устойчивость к канамицину, использовали для получения трансгенных растений с сверхэкспрессией гена HST. Вектор pCAMBIA1300 вместе с геном *hpt II*, придающим устойчивость к гиромидину, использовали для создания трансгенных растений с сверхэкспрессией гена FBN5. HST (гомогенизат-соланезил-дифосфат) конденсирует боковую цепь и бензохиноновое кольцо ПХ, в то

трем как FBN5 (фибриллин 5) стимулирует ферментативную активность соланезилдифосфатсинтазы 1 и 2, ответственных за синтез соланезилдифосфата.

Обе линии растений с повышенным содержанием ПХ демонстрировали повышенную устойчивость к высокому свету, пониженной температуре и засухе, что отражалось в более высоких, по сравнению с растениями дикого типа, показателях ряда физиологических и биохимических параметров, включая индекс производительности растений и скорость ассимиляции  $\text{CO}_2$ . При этом, уровень экспрессии большинства стресс-зависимых генов ретроградного «хлоропласт-ядро» пути в гиперэкспрессантах был выше даже в контрольных условиях, т.е. в условиях низкой интенсивности света, по сравнению с таковым в диком типе, что отражает активацию пластохинон-зависимых сигнальных путей в этих растениях. Растения с повышенным содержанием ПХ характеризовались увеличенным накоплением крахмала и сниженным уровнем окислительного стресса, что проявлялось в уменьшении содержания  $\text{H}_2\text{O}_2$  и снижении ключевых компонентов антиоксидантной системы – аскорбатпероксидаз, как хлоропластных, так и цитоплазматической, и пероксисомной.

Таким образом, повышение содержания ПХ в листьях растений приводит к повышению устойчивости растений к абиотическим факторам.

**РЕГИСТРАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВЕТОВОЙ СТАДИИ ФОТОСИНТЕЗА РАСТЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НИХ СТРЕССОРОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ ПРИ ПОМОЩИ НОВОГО РОССИЙСКОГО РАМ-ФЛУОРИМЕТРА «РАМ-3»**

**Registration of light-dependent indicators of plant photosynthesis under the influence of stressors of various nature using the new Russian PAM-fluorometer “PAM-3”**

*Гринберг М.А.\*, Белозеров Ю.А., Воробьев В.А., Турчин И.В.*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»,  
Нижний Новгород, Россия

*\*e-mail: mag1355@yandex.ru, тел.: +7 908 7290432*

Регистрация показателей флуоресценции хлорофилла является одним из ключевых инструментов при анализе феноменологии и механизмов влияния различных факторов среды на функциональное состояние растений. Подавляющее большинство подобных измерений выполняется с использованием оборудования иностранного производства. В настоящей работе представлены результаты регистрации ключевых показателей световой стадии фотосинтеза с использованием нового российского полномасштабного РАМ-флуориметра «РАМ-3» (ООО «БФВ»), позволяющего выполнять измерения на уровне целого растения в поле 25х25 см. В приборе предусмотрено использование различных длин волн для актиничного и насыщающего света, он может быть оснащен дополнительным модулем для высококонтрастной регистрации флуоресценции сенсоров на основе GFP.

Эксперименты были выполнены с использованием растений пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) и табака обыкновенного (*Nicotiana tabacum* L.). В качестве стрессоров использовались засуха и локальное кратковременное изменение температуры (нагрев и охлаждение). Показано хорошее качественное и количественное соответствие между ответами растений на стрессоры, полученными с использованием «РАМ-3» и «IMAGING-PAM MINI» (Heinz Walz GmbH, Германия) флуориметров.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 10 «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика». Этап 2026-2027.

**ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *a* ПОД  
ВЛИЯНИЕМ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ  
ОНТОГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ВЕТВЕЙ ЯБЛОНИ ДОМАШНЕЙ  
*MALUS DOMESTICA***

**Changes in the parameters of variable fluorescence of chlorophyll *a* caused by low  
and high temperatures at different stages of ontogenetic development of branches  
of the domestic apple tree *Malus domestica***

Грязнова У.В.\*, Савченко Т.В.

Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр  
биологических исследований Российской академии наук»,  
Пушино, Россия

\*e-mail: [ulyana.gr@yandex.ru](mailto:ulyana.gr@yandex.ru), тел.: +7 915 6863515

В настоящее время особенности функционирования фотосинтетического аппарата в нелистовых органах растений мало исследованы. Яблоня домашняя (*Malus × domestica* Borkh.), является одной из важнейших плодовых культур, произрастающей в пределах широких климатических условий. Хлоренхимные ткани ветвей яблони домашней сохраняют фотосинтетическую активность в течение всех сезонов года. Механизмы, отвечающие за устойчивость фотосинтетического аппарата в ветвях яблони к широкому диапазону температур внешней среды, остаются неизвестны. Никогда ранее не проводилась оценка устойчивости к повышенным и пониженным температурам фотосинтетического аппарата ветвей яблони на разных стадиях онтогенетического развития.

В данной работе с применением метода РАМ-флуориметрии были получены данные об изменениях параметров переменной флуоресценции хлорофилла *a*, характерные для листьев и ветвей яблони на разных этапах их онтогенетического развития, включая максимальный квантовый выход, распределение поглощенной световой энергии между процессами фотохимического тушения, нефотохимического тушения, и нерегулируемой тепловой диссипации. С помощью ОЛР-теста были рассчитаны площадь поверхности над кривой быстрой индукции флуоресценции хлорофилла, а также индекс производительности фотосинтетического аппарата. Было показано влияние высокой (45 °C) и низкой (-20 °C) температуры на эти параметры на разных стадиях онтогенетического развития.

Полученные результаты помогают оценить комплексное влияние температуры на фотосинтетический аппарат ветвей яблони, а также определить, на какой стадии фотосинтетический аппарат ветвей приобретает повышенную устойчивость к высоким и низким температурам.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №24-16-00142).

**ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОСИСТЕМЫ II (Fv/Fm) И  
МЕТАБОЛОМА РАСТЕНИЙ РИСА ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ**

**Alteration in Effectiveness of Photosystem II (Fv/Fm) and metabolome of rice plants under flooding**

*Емельянов В.В.\*, Смирнов П.Д., Костылев П.И.,  
Пузанский Р.К., Шишова М.Ф.*

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,  
Россия

*\*e-mail: v.yemelyanov@spbu.ru, тел.: +7 921 9036777*

В процессе адаптации к различному по интенсивности и длительности затоплению, приводящему к недостатку кислорода, у растений риса сформировались две стратегии выживания. Стратегия активного избегания (low oxygen escape syndrome, LOES) характеризуется быстрым ростом, а стратегия пассивного покоя (low oxygen quiescence syndrome, LOQS) – снижением скорости роста и сохранением метаболической энергии (Voesenek, Bailey-Serres 2009). Обе обусловлены активацией этилен-зависимых транскрипционных факторов. В случае LOES – трансфакторов SKs, а в случае LOQS – Sub1A.

Исследование проведено на сортах и интрогрессивных линиях риса из коллекции ФГБНУ АНЦ «Донской», несущих гены устойчивости к затоплению (SKs и Sub1A), включая их гибриды между собой. Растения выращивали на экспериментальном орошаемом участке. Всего было проанализировано 2 сорта и 17 интрогрессивных линий.

Соотношение Fv/Fm, характеризующее эффективность фотосистемы II (ФС II), в листьях тестируемых растений риса измеряли с помощью флуориметра Junior-PAM. У обеих исследованных SK-линий, значение было максимальным, а у линии 4570 (Sub1A) – наименьшим. Но значение Fv/Fm составило 0,75-0,8 у большинства линий, что отражает слабое повреждение ФС II при корневой гипоксии.

Сравнительный анализ метаболомов листьев растений риса, проведенный с использованием газовой хроматографии, сопряженной с масс-спектрометрией (Пузанский и др., 2018), выявил более 300 метаболитов. Метод главных компонент показал, что метаболитные профили WT и Sub1A, а также WT и SK2 образуют отдельные группы. К числу накапливаемых метаболитов для генотипов Sub1A и SK2 можно отнести ненасыщенные свободные жирные кислоты и спирты, а также аминокислоты, в том числе ГАМК, глутамат и серин. Растения Sub1A

демонстрировали общее снижение интенсивности обменных процессов, которое сопровождалось накоплением олигосахаридов. Растения *SK2* накапливали больше глюкозы и органических кислот.

Таким образом, частичное затопление в условиях рисовых чеков, вызывает лишь незначительное повреждение фотосистемы II, причем меньшее у растений линий *SK2*. Значительно сильнее проявились различия между генотипами (*SKs* и *Sub1A*) и растениями дикого типа на уровне метаболитов, которые затрагивали преимущественно интермедиаты дыхательного обмена (сахара и органические кислоты).

Исследование поддержано грантом РФФИ № 25-14-00074.

### Литература

1. Пузанский РК, Емельянов ВВ, Клюкова МС, Шаварда АЛ, Штарк ОЮ, Юрков АП, Шишова МФ (2018) Прикл биохим микробиол 54(4) 427-434. doi: 10.7868/S055510991804013X
2. Voisenek LACJ, Bailey-Serres J (2009) Nature 460(7258):959-960. doi: 10.1038/460959a

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В ХЛОРОПЛАСТАХ КЛЕТОК МЕЗОФИЛЛА И  
КЛЕТОК ОБКЛАДКИ СОСУДИСТЫХ ПУЧКОВ ЛИСТЬЕВ КУКУРУЗЫ**

**Photosynthetic electron transport in chloroplasts of both mesophyll cells and  
bundle sheath cells in maize leaves**

Иванов Б.Н.

Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр  
биологических исследований Российской академии наук»,  
Пушино, Россия

*e-mail: ivboni@rambler.ru, тел.: +7 916 7005576*

В растениях C4 типа, содержащих NADP-малик энзим, таких как кукуруза, неорганический углерод в форме  $\text{HCO}_3^-$  присоединяется к фосфоэнолпирувату (ФЭП) в клетках мезофилла с участием ФЭП-карбоксилазы, образуя оксалоацетат (ОАА), который в хлоропластах восстанавливается до малата с использованием НАДФН, продуцируемого линейным электронным транспортом (ЛЭТ); образование ФЭП из пирувата в хлоропластах мезофилла требует АТФ. Малат переносится в хлоропласты клеток обкладки сосудистых пучков, где он декарбоксилируется НАДФ-малик энзимом, образуя НАДФН и  $\text{CO}_2$ , который с участием этого восстановителя и АТФ, продуцируемой в хлоропластах этих клеток, фиксируется в цикле Кальвина.

В экспериментах с интактными хлоропластами из клеток мезофилла кукурузы было продемонстрировано, что циклический электронный транспорт вокруг фотосистемы 1 (ЦЭТ1) и водно-водный цикл (WWC) функционируют в них в отсутствие и в присутствии ОАА, акцептора электронов в ЛЭТ. ЦЭТ1 и WWC участвуют в энергизации тилакоидной мембраны одновременно с ЛЭТ. Показана роль аскорбата в этих клетках для функционирования WWC.

Измерение редокс состояния P700 в интактных клетках обкладки сосудистых пучков листьев кукурузы представило прямые свидетельства функционирования ЦЭТ1 в хлоропластах этих клеток. Подтверждено, что этот транспорт является основным путем переноса электронов в их фотосинтетической электрон-транспортной цепи (ФЭТЦ). Показано, что как малат, так и аскорбат, добавленные к клеткам обкладки, увеличивали на свету восстановление стромальных доноров, участвующих в функционировании ЦЭТ1, и протонный градиент на тилакоидных мембранах. Эти метаболиты способны донировать электроны в ФЭТЦ на участке между фотосистемами; донирование малатом обусловлено

возникновением НАДФН при его декарбоксилировании, и поступлением электронов в ФЭТЦ при окислении последнего НАДФН-дегидрогеназой (NDH), восстанавливающей пластохинон в тилакоидной мембране. Присутствие DCMU вместе с аскорбатом и малатом уменьшало светоиндуцируемое увеличение образования стромальных доноров в присутствии этих метаболитов, что свидетельствовало о роли фотосистемы 2 в их образовании, несмотря на ее низкое содержание в хлоропластах обкладки. Очень значительное уменьшение в присутствии DCMU генерации стромальных доноров аскорбатом предполагает, что в хлоропластах обкладки аскорбат, в основном, донирует электроны фотосистеме 2.

Амитал и ротенон, ингибиторы NDH, ускоряли окисление P700 на дальнем красном свете после предосвещения белым светом, подтверждая, что NDH участвует в донировании электронов в ФЭТЦ и генерации стромальных доноров. При этом амитал почти не влиял на стационарный уровень P700<sup>+</sup> на свету, тогда как антимицин А, ингибитор циклического электронного транспорта с участием ферредоксина и белков PGR5 и PGRL1, существенно его уменьшал.

## Литература

1. Ivanov B, Edwards GE (1997) Photosynth Res 52: 187–198.
2. Ivanov B, Asada K, Kramer DM, Edwards G (2005) Planta 220: 572–581.
3. Ivanov B, Asada K, Edwards G (2007) Photosynth Res 92: 65-74

**ВЛИЯНИЕ ГРИБНОЙ ИНФЕКЦИИ НА СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ХЛОРОПЛАСТОВ В ПРОРОСТКАХ ЯЧМЕНЯ РАЗНОГО ВОЗРАСТА**

**Effect of the Fungal Infection on the Structural and Functional State of Chloroplasts in Barley Seedlings of Different Ages**

Кабашикова Л.Ф.\*, Вукс Т.Н., Доманская И.Н.,  
Лукиша В.И., Шпилевский С.Н.

Государственное научное учреждение «Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

\*e-mail: kabashnikova@mail.ru, тел.: +3 75(17) 3422888

Изучение механизмов защитных реакций растений при патогенезе тесно связано с выяснением роли хлоропластов как внутриклеточных сенсоров, тонко реагирующих на внешние раздражители, включая фитопатогены.

Объектами исследований являлись первые листья зеленых проростков ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сортов белорусской селекции – пленчатых (Магутны, Рейдер) и голозерного (Адамант). Проростки разного возраста (3-, 5-, 7- и 10-дневные) заражали спорами гриба *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. – возбудителя гельминтоспориоза, и анализировали через 48 ч после заражения.

Важным критерием оценки степени развития патологического процесса в растениях является количество хлорофилла (Хл), которое определяется балансом между биосинтезом и распадом молекул пигмента в растительной клетке. В физиологических условиях обнаружены онтогенетические различия по морфологическим параметрам первого листа и содержанию фотосинтетических пигментов (Хл и каротиноидов). В инфицированных 9- и 12-дневных листьях отмечено снижение содержания фитолсодержащих форм Хл, а также увеличение активности хлорофиллазы и степени феофитинизации Хл – в проростках всех изученных возрастов. Установлены разные амплитуды изменения фонда фотосинтетических пигментов у сортов ячменя при гельминтоспориозе на определенных этапах развития первого листа.

Анализ параметров флуоресценции Хл, измеренных методом РАМ-флуориметрии, показал снижение величины потенциального квантового выхода фотохимических реакций ( $F_v/F_m$ ) ФС II в здоровых листьях ячменя по мере увеличения возраста проростков, а также в более молодых листьях – под влиянием грибной инфекции. В физиологических условиях величины коэффициентов фотохимического ( $qP$ ) и нефотохимического ( $qN$ )

тушения флуоресценции Хл снижались в 12-дневных листьях ячменя относительно более молодых (5- и 9-дневных). В результате поражения грибной инфекцией в 12-дневных растениях наблюдалось увеличение параметра ( $qN$ ) относительно контрольных растений этого возраста, что указывает на нарушение фотохимических реакций в ФС II и активацию защитного механизма, преобразующего избыточную световую энергию в тепло. Наиболее значимые нарушения структурно-функционального состояния фотосинтетических мембран в 7-дневных инфицированных листьях выявлены у сорта Рейдер, где наблюдали снижение функциональных параметров ФС I и ФС II ( $Y(I)$ ,  $ETR(I)$ ,  $F_v/F_m$ ,  $Y(II)$ ,  $ETR(II)$ ) на фоне возрастания величин нефотохимического тушения ( $Y(NA)$ ,  $qN$ ,  $NPQ$ ). У сортов Магутны и Адамант в этих условиях отмечены лишь изменения параметров нефотохимического тушения флуоресценции Хл ( $Y(ND)$ ,  $Y(NA)$ ,  $Y(NPQ)$ ,  $NPQ$ ,  $qN$ ).

На основе полученных данных сделано заключение, что структурно-функциональные характеристики хлоропластов, такие как содержание фитольных и бесфитольных форм Хл, содержание феофитина и параметры флуоресценции Хл могут служить критериями для ранней диагностики поражения растений ячменя гельминтоспориозом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов БРФФИ № Б26РНФ-057 и РНФ № 25-44-10003.

**ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТОЛЕРАНТНОСТИ ПИГМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ГИБРИДНЫХ ЛИНИЙ ЛЬНА (*LINUM USITATISSIMUM* L.) К СОЛЕВОМУ СТРЕССУ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

**Physiological diagnostics of tolerance of the pigment system of hybrid lines of fiber flax (*Linum usitatissimum* L.) to salt stress of varying intensity**

Королёв К.П.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет»,  
Тюмень, Россия

*e-mail: korolevkonstantin799@gmail.com, тел.: +7 912 9236187*

Одним из ключевых факторов, лимитирующих рост, морфогенез, продуктивность и технологические свойства волокнистой и семенной продукции льна (*Linum usitatissimum* L.), является вторичное засоление земель сельскохозяйственного назначения [1–3]. В данном контексте приоритетным вектором современной селекции становится высокопроизводительный скрининг генофонда для выявления стрессоустойчивых форм, обладающих выраженной осмотической и ионной толерантностью на ювенильной стадии онтогенеза. Настоящая работа направлена на комплексную оценку стабильности пигментного аппарата межсортовых гибридных линий F6 льна-долгунца при моделировании искусственного хлоридного токсикоза разной интенсивности. Объектом исследования служили 10 контрастных генотипов льна (Gen1–Gen10), культивируемых в трехкратной биологической повторности на средах с градиентным содержанием NaCl: 100 мМ (среда E1) и 200 мМ (среда E2) при контролируемых параметрах гидротермического и светового режимов в климатической камере. Относительное содержание хлорофилла в ассимиляционных тканях контрольных (E0) и опытных (E1, E2) растений регистрировали с использованием бесструктурного метода на приборе SPAD-502Plus (Minolta, Япония). Полученные результаты выявили строго генотип-зависимый характер перестройки пигментной системы в условиях ионного стресса. В контрольном варианте фоновые значения варьировали в диапазоне  $41,5 \pm 1,16^*$ – $54,9 \pm 2,18^*$  ед. SPAD. При умеренной солевой нагрузке (100 мМ NaCl) у гибридных линий с высокой адаптивностью зарегистрировано сохранение стабильности пигментного пула (интенсивность депрессии на уровне 8,2–12,5%), тогда как чувствительные комбинации демонстрировали существенное падение

показателя на 25,4% от контроля (E0). Экстремальный стресс (200 мМ NaCl) индуцировал глубокую деградацию светособирающих комплексов у неадаптивных форм, что сопровождалось снижением показателя до  $11,4 \pm 1,25^*$ – $22,1 \pm 1,11$  ед. SPAD. Математико-статистический анализ подтвердил высокую дискриминантную способность SPAD-метрии как неразрушающего экспресс-маркера солеустойчивости, что позволяет рекомендовать данный методологический подход для скрининга и ускоренного отбора целевых генотипов на ранних этапах селекции льна-долгунца.

### **Литература.**

1. Munns R., Tester M. Mechanisms of salinity tolerance // *Annual Review of Plant Biology*. – 2008. – Vol. 59. – P. 651–681.
2. Parihar P., Singh S., Singh R. et al. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2015. – Vol. 22. – No. 6. – P. 4056–4075.
3. Yu Y., Wu Y., Wang S. et al. Identification and expression analysis of the *Linum usitatissimum* L. salt tolerance genes under salinity stress // *Industrial Crops and Products*. – 2022. – Vol. 187. – Art. 115432.

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СВЕТА ПОД ВОДОЙ КАК СЕЛЕКТИВНЫЙ ФАКТОР СРЕДЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ВОДОЕМАХ**

**Underwater light spectral composition as a selective predictor of the vertical distribution of phytoplankton**

*Лабунская Е.А.<sup>1\*</sup>, Радченко И.Г.<sup>1</sup>, Нагаева А.С.<sup>1</sup>, Лобышев В.И.<sup>1</sup>, Воронов Д.А.<sup>2</sup>, Краснова Е.Д.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем передачи информации им. Харкевича РАН, Москва, Россия

*\*e-mail: styxelenalab@gmail.com, тел.: +7 925 4880833*

Свет является источником энергии для водных фототрофных организмов. Значимую роль играет как интенсивность светового потока, так и спектральный состав подводного света (Holtrop et al, 2021; ). Однако роль спектрального состава света как лимитирующего фактора среды, влияющего на распределение фитопланктона, на данный момент практически не исследована. В работе проведен многомерный регрессионный анализ зависимости динамики вертикального распределения фитопланктона трех меромиктических водоемов и одного пресного озера в зависимости от факторов среды: проанализировано действие каждого фактора в отдельности и кумулятивно. В двух меромиктических водоемах и пресном озере выявлена достоверная зависимость изменчивости распределения фитопланктона в вертикальном профиле от долей определенных частей спектра, соответствующих полосам поглощения основных антенных пигментов: 480-550 нм (фикоэритрин, фукоксантин) и 600-660 нм (фикоцианины, хлорофилл *c*). Введение в регрессионный анализ таких факторов среды, как доли определенных диапазонов в спектре повышает объяснимость распределения фитопланктона до 65%, при том, что, согласно литературным данным, комплекс других факторов среды кумулятивно может объяснить не более половины (50%) изменчивости вертикальной динамики фитопланктона. Таким образом, спектральный состав света может являться значимым фактором среды, накладывающим ограничения на структуру фитопланктона. При глобальных изменениях климата этот аспект приобретает высокую значимость и может позволять предсказывать динамику сообществ планктонных водорослей в меняющихся условиях подводного светового климата.

## Литература

1. Holtrop T. et al. Vibrational modes of water predict spectral niches for photosynthesis in lakes and oceans // *Nature Ecology & Evolution*. 2021. Vol. 5. № 1. P. 55-66.
2. Краснова Е.Д., Лобышев В.И., Лабунская Е.А. и др. Спектральный состав света в хемоклине стратифицированных водоемов, находящихся на разных стадиях изоляции от Белого моря // *Оптика атмосферы и океана*. 2024. Т. 37. № 4. С. 307-315.

**УВЕЛИЧЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИОНОВ БИКАРБОНАТА ВО ВНЕШНЕЙ СРЕДЕ ПРИВОДИТ К ПОВЫШЕНИЮ pH ЛЮМЕНА ИЗОЛИРОВАННЫХ ТИЛАКОИДОВ**

**Increase of bicarbonate ion concentration in the external medium triggers raising the lumen pH of isolated thylakoids**

*Маркин Р.В., Иванов Б.Н., Вильянен Д.В., Козулева М.А.*

Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук»,  
Пушино, Россия

*\*e-mail: romanmarki998@gmail.com, тел.: +7 985 0931499*

Освещение растений приводит к повышению pH стромы хлоропластов и к существенному увеличению концентрации в ней бикарбоната [1]. Поскольку бикарбонат-анион не может свободно проникать через тилакоидную мембрану, возможное влияние увеличенной концентрации бикарбоната на pH люмена тилакоидов в строме не принималось во внимание, при том, что от величины люменального pH зависит скорость и полнота протекания многих важных фотосинтетических процессов [2].

Было измерено влияние увеличения содержания бикарбоната в среде с изолированными тилакоидами на pH их люмена на свету и установлено, что это увеличение приводило к возрастанию pH. В таких условиях 1) при функционировании полной фотосинтетической электрон транспортной цепи (ФЭТЦ) увеличивалась скорость электронного транспорта и уменьшалось нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла *a* (НФХТ), 2) в изолированно функционирующей фотосистеме 1 электронный транспорт возрастал при использовании донора электронов, редокс потенциал которого зависит от pH (ДХФИФ), но не изменялся с донором, редокс потенциал которого не зависит от pH (ТМФД), 3) в изолированно функционирующей фотосистеме 2 электронный транспорт и НФХТ не изменялись. Эти результаты предполагают, что увеличение концентрации бикарбоната приводит, прежде всего, к увеличению pH стромальных тилакоидов и что ускорение электронного транспорта в полной ФЭТЦ - следствие ускорения окисления пластогидрохинона цитохромным *b<sub>6</sub>f*-комплексом.

При исследовании механизмов увеличения pH люмена тилакоидов при увеличении концентрации бикарбоната в среде было найдено, что анионы сульфит, сульфат, фосфат подавляли это увеличение, что может указывать на конкуренцию с бикарбонатом за прохождение через

анионный канал. Вход бикарбоната в люмен через такой канал на свету приводит к увеличению кислого рН люмена вследствие дегидратации бикарбоната с поглощением протона. Проникновение бикарбоната в люмен тилакоидов не изменяется при введении валиномицина, что предполагает функционирование потенциал-независимого анионного канала. Эффект увеличения концентрации бикарбоната в среде на рН люмена снижался после обработки тилакоидов н-этилмалеимидом, который алкилирует тиоловые группы АТФ-синтазы и действует как ее ингибитор, и в присутствии АТФ, подавляющей выход протонов из люмена через канал АТФ-синтазы. Стимуляция этого выхода бикарбонатом также могла быть причиной увеличения рН люмена. Таким образом, возможно существование двух механизмов, приводящих к увеличению рН люмена тилакоидов, при возрастании внешней концентрации бикарбоната.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-24-00597).

## Литература

1. K. Werdan и H. W. Heldt, «Accumulation of bicarbonate in intact chloroplasts following a pH gradient», *Biochim. Biophys. Acta BBA - Bioenerg.*, т. 283, вып. 3, сс. 430–441, дек. 1972
2. D. Farci и W. P. Schröder, «Thylakoid Lumen; from “proton bag” to photosynthetic functionally important compartment», *Front. Plant Physiol.*, т. 1, с. 1310167, дек. 2023

**РОЛЬ  $\alpha$ -КАРБОАНГИДРАЗЫ 2 В АККЛИМАЦИИ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА *ARABIDOPSIS THALIANA* К СВЕТУ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

**The role of  $\alpha$ -carbonic anhydrase 2 in the acclimation of the photosynthetic apparatus of *Arabidopsis thaliana* to high light intensity**

Надеева Е.М.\*, Игнатова Л.К., Руденко Н.Н.,  
Ветошкина Д.В., Иванов Б.Н.

Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук»,  
Пушино, Россия

\*e-mail: zhurikova.alena@yandex.ru, тел.: +7 985 1260790

Избыточная интенсивность света является одним из ключевых абиотических факторов, ограничивающих эффективность фотосинтеза. При действии избыточного света происходит изменение экспрессии фотосинтетических генов и перестройка фотосинтетического аппарата. Целью работы было исследовать вклад  $\alpha$ -карбоангидразы 2 ( $\alpha$ KA2), катализирующей реакцию  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ , в акклимацию растений *A. thaliana* к высокой интенсивности света.

Эксперименты проводили на растениях *A. thaliana* дикого типа (ДТ) и мутантных растениях с нокаутом гена *At2g28210*, кодирующего  $\alpha$ KA2 ( $\alpha$ KA2-KO), полученных с использованием системы редактирования растений CRISPR/Cas9. Растения выращивали при низкой интенсивности света 60 мкмоль квантов·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> (НС), после чего часть растений освещали постоянным светом высокой интенсивности, 600 мкмоль квантов·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> (ВС) в течение 48 ч.

В растениях  $\alpha$ KA2-KO параметры ОЛР-кинетики ABS/RC и  $\text{PI}_{\text{total}}$  были выше, чем в ДТ, тогда как Fv/Fm не различался на НС, что свидетельствует об увеличении размера антенны ФС2 без снижения максимальной квантовой эффективности ФС2. После 48 ч воздействия ВС значение ABS/RC мутантов оставалось повышенным, а снижение Fv/Fm и  $\text{PI}_{\text{total}}$  было более выраженным по сравнению с ДТ, что указывает на меньшую устойчивость фотосинтетического аппарата к световому стрессу в отсутствие  $\alpha$ KA2.

Отношение  $X_l$   $a/X_l$   $b$  в мутантах  $\alpha$ KA2-KO не отличалось от ДТ на НС. После воздействия ВС в растениях ДТ отношение  $X_l$   $a/X_l$   $b$  увеличивалось вследствие снижения содержания  $X_l$   $b$ , тогда как в  $\alpha$ KA2-KO достоверных изменений не наблюдалось.

Уровень экспрессии *lhcb1* был выше, а *lhcb2* — ниже в растениях  $\alpha$ KA2-КО по сравнению с ДТ на НС. После воздействия ВС экспрессия обоих генов снижалась у всех исследованных растений, однако в  $\alpha$ KA2-КО оставалась выше, чем в ДТ, что свидетельствует о нарушении регуляции ССК2 при отсутствии  $\alpha$ KA2. Полученные результаты позволяют предположить участие  $\alpha$ KA2 в перестройке светособирающего комплекса ФС2 (ССК2) на ранних этапах световой акклимации.

Ранее нами показано, что на ВС содержание «мембранного»  $\text{H}_2\text{O}_2$ , образованного вблизи от тилакоидной мембраны в  $\alpha$ KA2-КО было ниже, чем в ДТ [1]. Экспрессия генов транскрипционных факторов (ТФ) *ABI4* и *PTM*, участвующих в  $\text{H}_2\text{O}_2$ -зависимой ретроградной сигнализации, необходимой для запуска регуляции размера антенны ФС2 при изменении условий освещения, [2], в мутантах также была ниже, чем в ДТ. В данной работе в условиях ВС в растениях ДТ наблюдалась выраженная индукция генов ТФ *WRKY18* и *WRKY40*, тогда как в  $\alpha$ KA2-КО их экспрессия практически не изменялась. Напротив, экспрессия *WRKY60* в ДТ резко снижалась, а в мутантах подавлялась лишь частично. Полученные результаты свидетельствуют о том, что  $\alpha$ KA2 может участвовать в ретроградной сигнализации, обеспечивающей транскрипционную акклимацию фотосинтетического аппарата к высокой интенсивности света.

## Литература

1. Nadeeva, E. M., Rudenko, N. N., Ignatova, L. K., Vetoshkina, D. V., & Ivanov, B. N. (2025). Effect of the Absence of  $\alpha$  Carbonic Anhydrase 2 on the PSII Light-Harvesting Complex Size in *Arabidopsis thaliana*. *Plants*, 14(10), 1529.
2. Nikolaev, A. A., Rudenko, N. N., Novichkova, N. S., Vetoshkina, D. V., & Borisova-Mubarakshina, M. M. (2025). Revealing Missing Links in the Downsizing of the Photosystem II Antenna in Higher Plants Under Stress Conditions. *Antioxidants*, 14(12), 1505.

**ВЛИЯНИЕ ОКТЕНИДИНА И МИРАМИСТИНА НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛЕТОК ЦИАНОБАКТЕРИЙ  
*SYNECHOCOCCUS SP. PCC 7942***

**Effect of Octenidine and Miramistin on the Spectral and Fluorescent Characteristics of *Synechococcus sp. PCC 7942* Cells**

Пащенко В.З.\*, Лукашев Е.П., Тодоренко Д.А., Нокс П.П.,  
Корватовский Б.Н., Горячев С.Н., Маторин Д.Н., Рубин А.Б.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

\*e-mail: [vz.paschenko@gmail.com](mailto:vz.paschenko@gmail.com), тел.: +7 905 5644337

Для предотвращения распространения инфекционных агентов в самых разнообразных средах всё больше возрастает использование различных антисептических средств, включая катионные антисептики. Как результат, их аккумуляция в природе, включая накопление в водных экосистемах, обуславливает актуальность их экологического изучения в качестве потенциального токсиканта для полезных микроорганизмов, многих водных животных и растительных организмов, в том числе и для фитопланктона. Одними из ключевых фотопродуцентов фитопланктона являются древнейшие фотосинтезирующие организмы – цианобактерии. Ранее мы исследовали повреждающее воздействие ряда катионных антисептиков на функциональную активность фотосинтетических мембран и изолированных из них фототрансформирующих белково-пигментных комплексов из пурпурных бактерий, высших растений, цианобактерий *Synechocystis sp.* [см. обзоры 1, 2]. Представляется необходимой дальнейшая детальная оценка повреждающих эффектов этих агентов на целые активные клетки фотосинтезирующего фитопланктона в его естественной ростовой среде. Исходя из этого, в данной работе мы изучили действие наиболее «сильных» из исследовавшихся нами ранее катионных антисептиков – октенидина и мирамистина – на клетки цианобактерий *Synechococcus sp. PCC 7942*. Октенидин и мирамистин использовали в концентрациях 1- 6 мкМ. Измерения проводили через 1, 3, 6, 24 и 48 часов инкубации в культиваторе. Мирамистин оказывал существенно более слабое влияние, по сравнению с октенидином. Анализ спектров поглощения и флуоресценции образцов, временных характеристик флуоресценции показал, что в умеренных концентрациях и инкубации в течение нескольких часов антисептик (октенидин) разобщает структурное взаимодействие между фикобилисомами (ФБС) и

фотосистемой 2 (ФС 2), что сопровождается увеличением квантового выхода собственной флуоресценции ФБС. В дальнейшем же, уже по-видимому начинается процесс разрушения светособирающих хлорофилльных пигментных комплексов с образованием мономерных форм хлорофилла и последующая деградация самих светособирающих пигментов. Изучение же индукционных кривых люминесценции в свою очередь показало, что даже низкие концентрации октенидина (1 мкМ) постепенно инактивируют ФС 2, приводя к полному ингибированию её активности через 3 часа инкубации с антисептиком. При этом происходит растущее накопление восстановленного хинонного акцептора  $Q_A^-$  – в результате ограничения электронного переноса от  $Q_A^-$  к  $Q_B$  и далее в пул хинонов.

## Литература

1. Knox PP, Lukashev EP, Korvatovsky BN, Mamedov MD, Strakhovskaya MG., Gvozdev DA, Paschenko VZ, Rubin AB (2024) The influence of cationic antiseptics on the processes of light energy conversion in various photosynthetic pigment-protein complexes. *Photosynth Res*, Vol. 161, № 1-2, pp. 5-19.
2. Paschenko VZ, Lukashev EP, Mamedov MD, Gvozdev DA, Korvatovsky BN, Knox PP, Strakhovskaya MG (2024) The Effects of Cationic Antiseptics on Spectral Characteristics and Electron Transport in Isolated Photosynthetic Complexes of Photosystems I and II. *Biophysics*, Vol. 69, № 3, pp. 434-444.

**ТИЛАКОИДНАЯ КАРБОАНГИДРАЗА  $\alpha$ КА4 В *ARABIDOPSIS THALIANA*  
СПОСОБСТВУЕТ ЗАЩИТЕ ФОТОСИСТЕМЫ II ОТ ФОТОИНГИБИРОВАНИЯ**

**Thylakoid carbonic anhydrase  $\alpha$ CA4 in *Arabidopsis thaliana*  
contributes to PSII protection against photoinhibition**

Руденко Н.Н.<sup>1\*</sup>, Козулёва М.А.<sup>1</sup>, Горбачёва В.И.<sup>1</sup>,  
Пермякова Н.В.<sup>2</sup>, Иванов Б.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН Федерального исследовательского центра «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», Пушкино, Россия

<sup>2</sup>ФИЦ Институт цитологии и генетики Сибирского отделения РАН (ФИЦ ИГиГ СО РАН), г. Новосибирск, Россия

\*e-mail: nataliacherry413@gmail.com, тел. +7 4967 732448

Карбоангидразы (КА) – ферменты, катализирующие обратимую гидратацию углекислого газа с образованием бикарбоната и протона. Установлено присутствие в мембранах тилакоидов хлоропластов КА  $\alpha$ -семейства,  $\alpha$ КА4, в гранальных тилакоидных мембранах [1, 2]. В листьях всех мутантов, лишённых  $\alpha$ КА4, созданных с помощью системы редактирования генома CRISPR/Cas9 ( $\alpha$ КА4-KO), происходило уменьшение, по сравнению с растениями дикого типа (ДТ), величины нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла (НФТ), усиливавшееся с ростом интенсивности света во время измерений, а также наблюдалось снижение градиента pH через тилакоидную мембрану по сравнению с растениями ДТ. При этом в  $\alpha$ КА4-KO было существенно больше, чем в ДТ, содержание белков, регулирующих НФТ, PsbS и киназы STN7. Отсутствие  $\alpha$ КА4 в тилакоидах, выделенных из мутантов, не влияло на скорость электронного транспорта в функционально изолированной ФС1, но приводило к увеличению скорости переноса электронов в функциональной изолированной ФС2 от воды до QA. В мутантах по  $\alpha$ КА4 было снижено, по сравнению с ДТ, содержание D1, основного белка ФС2 при увеличении уровня экспрессии кодирующего его гена.

При измерении в условиях фотоингибирования, т.е. при воздействии светом высокой интенсивности (1000 мкмоль квантов  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) в течение 12 ч и при измерении при той же интенсивности света были ниже, чем в ДТ, параметры Fv/Fm и Fv/F0. Последний является показателем эффективности фотосинтеза, используемый для оценки стресса, что отражает усиление фотоингибирования в мутантах, лишённых

$\alpha$ КА4. При этом параметр  $P_m$ , отражающий степень фотоингибирования ФС1 был одинаков в растениях мутантов и ДТ. Квантовые выходы ФС2 (YII) и ФС1 (YI) при этом были ниже в мутантах, чем в ДТ, и лимитирование переноса электронов на донорной стороне ФС1, которое отражает нарушения в притоке электронов к ФС1, оказывалось выше в  $\alpha$ КА4-КО, чем в растениях ДТ.

Полученные нами данные демонстрируют участие  $\alpha$ КА4 в развитии нефотохимического тушения за счет протонирования белка PsbS и в защите ФС2 от фотоингибирования. В оптимальных для растений арабидопсиса условиях отсутствие  $\alpha$ КА4, приводившее к снижению НФТ, уменьшало лимитирование протекания фотосинтетических процессов и приводило к увеличению скорости электронного транспорта через ФС2, тогда как при воздействии света высокой интенсивности в течение не менее 12 ч отсутствие  $\alpha$ КА4 приводило к подавлению фотосинтеза за счёт фотоингибирования ФС2 вследствие недостаточного развития НФТ в стрессовых условиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-24-01078.

## Литература

1. Friso G. et al. (2004) In-Depth Analysis of the Thylakoid Membrane Proteome of *Arabidopsis thaliana* Chloroplasts: New Proteins, New Functions, and a Plastid Proteome Database. *Plant Cell*, 16, 478–49.
2. Ignatova L. et al. (2019) The presence of the low molecular mass carbonic anhydrase in photosystem II of C3 higher plants. *J. Plant Physiol.*, 232, 94–99.

Спектры люминесценции асимметричного микрорезонатора  
с экстрактом пигментов высших растений

**Luminescence spectra of asymmetric microcavity doped with higher plant pigment extract**

*Тырышкина Л.Е.<sup>1,2,3\*</sup>, Шабанов А.В.<sup>1,3</sup>, Ким П.Н.<sup>1,3</sup>, Кобяков А.В.<sup>1,2</sup>,  
Рудакова Н.В.<sup>1,2</sup>, Пыхтин Д.А.<sup>1,3</sup>, Бикбаев Р.Г.<sup>1,2</sup>, Тимофеев И.В.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики им Л.В. Киренского СО РАН – обособленное  
подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

\*e-mail: letyryshkina@iph.krasn.ru

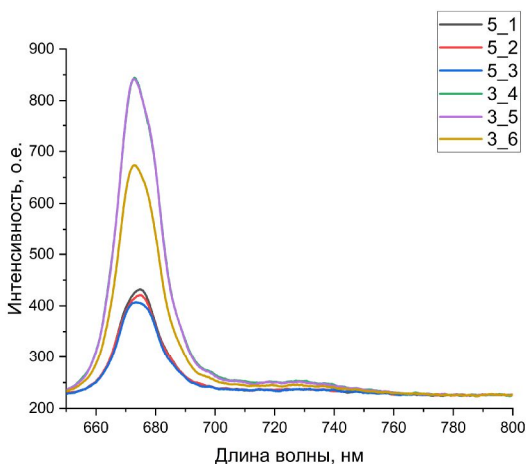
Фотонный кристалл (ФК) эффективно управляет электромагнитными волнами за счет периодической модуляции показателя преломления слоев. Наличие структурных дефектов ФК позволяет локализовать оптическое поле [1]. Данный эффект устойчив к частичному разупорядочению слоев. Такая особенность делает искусственные ФК-структуры близкими аналогами к естественным биоструктурам, например, к гранам хлоропластов. Оптимизация положения дефектного слоя позволяет повысить эффективность системы. В работе [2] на основе ФК-зеркал был собран имитирующий реальную биологическую структуру микрорезонатор с дефектным слоем, заполненным разбавленным экстрактом фотосинтетических пигментов. Было проведено исследование влияния асимметричного положения дефекта на оптические свойства и локальные характеристики световых волн, распространяющихся в такой структуре. В спектрах поглощения и отражения асимметричной структуры наблюдалось значительное отличие при падении излучения с противоположных сторон структуры. Поглощение света и люминесценция – два взаимосвязанных процесса энергетического обмена в молекулах пигментов высших растений. Измерение интенсивности флуоресценции хлорофилла позволяет быстро диагностировать различные болезни у растений.

В данной работе экспериментально исследованы спектры люминесценции асимметричного фотоннокристаллического микрорезонатора. В качестве дефектного слоя структуры использовали экстракт пигментов высших растений.

Исследуемая структура была собрана из двух различных ФК-зеркал с дефектным слоем между ними. ФК<sub>1</sub>-зеркало состояло из 3 чередующихся

слоев:  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  на стеклянной подложке. ФК<sub>2</sub>-зеркало – из 5 чередующихся слоев. Для расчета использованы нормированные показатели преломления:  $n(\text{TiO}_2) = 2,61$  и  $n(\text{SiO}_2) = 1,45$ . Расчетные толщины слоев зеркал составляли  $\text{TiO}_2 = 46$  нм и  $\text{SiO}_2 = 75$  нм. Толщина сформированного дефектного слоя составила 20 нм. В качестве наполнителя дефектного слоя использовали экстракт фотосинтезирующих пигментов из листьев шпината в этиловом спирте.

На рисунке приведены спектры люминесценции исследуемой структуры. Спектры 1-3 получены при освещении структуры излучением  $\lambda = 405$  нм со стороны ФК<sub>2</sub>, а спектры 4-6 при освещении со стороны ФК<sub>1</sub>.



**Рисунок.** Спектры люминесценции ФК-структуры с асимметрично расположенным дефектом

Из полученных спектров видно, что интенсивность люминесценции не одинакова при освещении микрорезонатора с разных сторон, а пропорциональна пропусканиям зеркал ФК<sub>1</sub> и ФК<sub>2</sub> на длине волны 405 нм.

Работа выполнена в рамках научной тематики госзадания Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

## **Литература**

1. В.Ф. Шабанов, С.Я. Ветров, А.В. Шабанов. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 209 с.
2. Л.Е. Тырышкина и др. // Физические основы приборостроения. – 2024. – Vol. 13, № 4(54).

## ВЛИЯНИЕ СВЕТОВОГО ФАКТОРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИСТОСТЕБЕЛЬНЫХ МХОВ К ЗАСУХЕ

### The Effect of Light Factor on the Drought Tolerance of Leafy Mosses

Тютерева Е.В.\*, Кузнецов В.В., Павлов И.Б.,  
Лыкова Т.Ю., Муртузова А.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: [etutereva@binran.ru](mailto:etutereva@binran.ru), тел.: +7 812 3725416

С середины XX века и по настоящее время сохраняется исследовательский интерес к высокой засухоустойчивости некоторых видов настоящих мхов, не обладающих в отличие от сосудистых растений способностью к регуляции содержания воды в тканях. В ходе вегетации в природе мхи зачастую подвергаются комплексному стрессу, сочетающему обезвоживание и высокоинтенсивное солнечное облучение.

Ксерофитные мхи обладают механизмами фотопротекции, характерными для всех наземных растений. Известны также специфичные только для мхов фотозащитные механизмы, такие, например, как синтез одновременно двух классов фотопротекторных белков: PsbS и LhcSR [1]. На модельном виде *Physcomitrium patens* был показан фотозащитный эффект уникальной агрегации участников ФЭТЦ в виде формирования мегакомплексов ФС1-ФС2, обогащенных LHCSR и PsbS белками, мигрирующими совместно с фотосистемами в составе мегакомплексов [2].

Цель исследования состояла в том, чтобы определить влияние наличия света и фотохимической активности хлоропластов на устойчивость двух контрастных по отношению к засухе видов листостебельных мхов, *Rhizomnium punctatum* (Mniaceae) и *Syntrichia ruralis* (Pottiaceae). Работа выполнена в русле исследований *Heber* с соавторами, выдвинувших гипотезу о существовании у экстремально-засухоустойчивых мхов светозависимых и светонезависимых механизмов протекции хлоропластов от фотовыцветания на фоне засухи [3]. На гаметофитах провели тестирование нескольких режимов высушивания и регидратации в присутствии/в отсутствие света. Жизнеспособность гаметофитов при наступлении засухи в темноте и на свету, а также в период пострегидратации определялась с помощью нитротетразолиевого теста. Состояние фотосинтетического аппарата оценивалось по изменению содержания и соотношения пигментов, изменению параметров

кривых быстрой флуоресценции Хла (ОЛР-кинетик), а также низкотемпературных спектров флуоресценции. Для характеристики надмолекулярной организации тилакоидных мембран хлоропластов был протестирован протокол неденатурирующего электрофореза белков. Полученные данные позволили сформулировать перспективные направления исследований для дальнейшего поиска ассоциированных с засухоустойчивостью механизмов фотопротекции мохообразных.

## Литература

1. Ptushenko V., Razjivin A. (2025). Energy-dependent non-photochemical quenching: PsbS, LhcSR, and other players. *Biochemistry*. 90(1): 44–60.
2. Furukawa R., Aso M., Fujita T. et al. (2019). Formation of a PSI–PSII megacomplex containing LHCSR and PsbS in the moss *Physcomitrella patens*. *J Plant Res* 132, 867–880.
3. Heber U., Azarkovich M., Shuvalov V. (2007). Activation of mechanisms of photoprotection by desiccation and by light: poikilohydric photoautotrophs. *Journal of Experimental Botany*, 58(11), 2745-2759.

**КИНЕТИЧЕСКАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО  
ТРАНСПОРТА ЦИТОХРОМНЫМ  $b_6f$  КОМПЛЕКСОМ**

**Kinetic regulation of photosynthetic electron transport by cytochrome  $b_6f$  complex**

*Хрущёв С.С. \*, Клименов Ю.Д., Червицов Р.Н.,  
Плюснина Т.Ю., Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б.*

Кафедра биофизики Биологического факультета Московского  
государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*\*e-mail: styx@biophys.msu.ru*

Цитохромный  $b_6f$  комплекс выступает в роли центрального «хаба», в котором перекрещиваются линейный и циклический фотосинтетические электронные потоки. Реализация цитохромным комплексом механизма Q-цикла приводит к немонокотонной зависимости скорости электронного транспорта от степени восстановленности пула пластохинонов: электронный транспорт оказывается невозможен как при полностью восстановленном, так и при полностью окисленном пуле, а максимальная скорость наблюдается при частично восстановленном пуле пластохинонов. Оптимальное соотношение количества восстановленных и окисленных хинонов может значительно изменяться при изменении параметров элементарных реакций, происходящих в цитохромном комплексе. Предложен математический подход функций отклика, позволяющий оценивать зависимость скорости стационарного потока электронов через трансмембранные комплексы от степени восстановленности пулов мобильных переносчиков и других внешних по отношению к этому комплексу условий [1]. Анализ простейшей модельной системы, состоящей из фотосистемы 2, пула пластохинонов и цитохромного комплекса, показывает, что в такой системе могут реализовываться различные варианты зависимости скорости потока электронов от интенсивности света [2]. Снижение активности цитохромного комплекса может приводить к появлению гистерезисного (триггерного) режима, в котором скорость электронного транспорта зависит не только от интенсивности света в данный момент времени, но и от того, как изменялась его интенсивность в предшествующий период. Подобные гистерезисные режимы описаны для мутантных штаммов цианобактерий [3], однако не наблюдаются у природных организмов. По-видимому, это связано с тем, что параметры фотосистемы 2 и цитохромного комплекса согласованы между собой таким образом, чтобы

избегать перевосстановления пула пластохинонов в физиологических условиях. Рассматривается возможность обобщения метода функций отклика для описания фотосинтетической электрон-транспортной цепи в целом.

## Литература

1. Хрущев С.С., Фурсова П.В., Плюснина Т.Ю. и др. (2024) Анализ скорости электронного транспорта через фотосинтетический цитохромный *b<sub>6</sub>f*-комплекс // Компьютерные исследования и моделирование. Т. 16, № 4, с. 997-1022. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-4-997-1022.
2. Khrushev S.S., Plyusnina T.Yu., Fursova P.V. et al. (2026) Mechanistic insights into photosynthetic linear electron transport flow: a mathematical modeling approach // Photosynthesis Research. Vol. 164:22. DOI: 10.1007/s11120-026-01205-5.
3. Shaku K., Shimakawa G., Hashiguchi M., Miyake C. (2016) Reduction-induced suppression of electron flow (RISE) in the photosynthetic electron transport system of *Synechococcus elongatus* PCC 7942 // Plant & Cell Physiology. Vol. 57(7):1443–1453. DOI: 10.1093/pcp/pcv198.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА КЛЕТОК ПРИРОДНОГО ФИТОПЛАНКТОНА**

**Application of machine learning methods to determine the state of photosynthetic apparatus of natural phytoplankton cells**

*Червицов Р.Н.<sup>1\*</sup>, Хрущёв С.С.<sup>1</sup>, Чуфицкий С.В.<sup>2</sup>,  
Антал Т.К.<sup>3</sup>, Плюснина Т.Ю.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Кафедра биофизики Биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Биологический факультет Донецкого государственного университета, Донецк, Россия

<sup>3</sup>Лаборатория комплексных экологических исследований Псковского государственного университета, Псков, Россия

*\*e-mail: roman123qwe123@gmail.com*

Непрерывный экологический мониторинг состояния водных объектов приводит к накоплению большого количества экспериментальных данных, в том числе кривых индукции флуоресценции хлорофилла, характеризующих состояние природного фитопланктона. Актуальна задача разработки математических методов, позволяющих выявлять закономерности в таких многомерных данных. Для анализа параметров ЛПР-теста, характеризующих состояние отдельных компонентов фотосинтетической электрон-транспортной цепи, перспективным является применение методов машинного обучения, решающих задачи уменьшения размерности данных, кластерного анализа и классификации. В работе проводится анализ массивов данных, полученных при мониторинге состояния р. Кальмиус (г. Донецк), а также водных объектов Псковской области. Уменьшение размерности данных методом главных компонент позволило выявить участки русла реки и водные объекты со сходным состоянием природного фитопланктона, что далее было подтверждено кластерным анализом. Обсуждаются возможные причины, вызывающие такие различия: видовые различия фитопланктона, присутствие в среде связанных с антропогенной нагрузкой токсикантов, различия температуры и освещенности. Анализ состава выделяемых кластеров позволил выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на состояние фотосинтетического аппарата клеток – химический состав водной среды, в частности, присутствие ингибирующих веществ (токсикантов). Создание классификаторов на

основе алгоритма «случайный лес» позволило выявить группы параметров ЛР-теста, наиболее чувствительных к изменениям в фотосинтетическом аппарате, вызываемым воздействием этих веществ. При помощи классификаторов для р. Кальмиус были с высокой точностью определены группы точек отбора проб, различающихся химическим составом водной среды. Показана также возможность определения проб с добавлением токсичных ионов ( $\text{Cd}^{2+}$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) на примере проб из водных объектов Псковской области. Высокая точность классификации достигается при значительных различиях в физиологическом состоянии клеток, то есть, когда ингибирующее воздействие приводит к существенным изменениям в параметрах фотосинтеза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-14-00036, <https://rscf.ru/project/26-14-00036/>.

### **Секция 3. Биофотоника: технологии и прикладные исследования**

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОТЛИЧИЯ  
ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТЬЕВ КЛЕНОВ В МОНИТОРИНГЕ ГОРОДСКОГО  
ОЗЕЛЕНЕНИЯ**

**Spectral Characteristics and Functional Differences of Maple Leaf Surfaces in  
Urban Greening Monitoring**

Баранова Е.Н.<sup>1,2\*</sup>, Шелепова О.В.<sup>2</sup>, Ткачева Е.В.<sup>2</sup>, Богоутдинова Л.Р.<sup>2</sup>,  
Латушкин В.В.<sup>1</sup>, Митрофанова И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АНО Институт стратегий развития, Москва, Россия

<sup>2</sup>Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Москва, Россия

\*e-mail: [greenpro2007@rambler.ru](mailto:greenpro2007@rambler.ru), тел.: +7 903 6245971

Древовидные клены являются наиболее популярными деревьями в силу высокой декоративности и быстрого роста. Наиболее распространенными в озеленении городов наравне с кленом остролистным, стали интродуцированные из Америки *Acer negundo* L. и *Acer saccharum* Marshall (Harris, 1991), являющиеся в некоторых регионах инвазивными видами, создающими риски для местной флоры. Данные виды потенциально опасны в плане неконтролируемого падения или слома ветвей, часто приводящие к повреждению автомобилей, высоковольтных проводов. Последние вопросы могут быть решены обрезкой, но обильная поросль представляет опасность вытеснения местных видов особенно в местах с недостаточным уходом. Клен остролистный (*Acer platanoides* L.), Клен ясенелистный и Клен сахарный относятся к двудомным растениям, у которых встречается андромonoэция (Rosado, 2018), что предоставляет возможность отбора на стадии семян и растений в насаждениях с целью недопущения инвазий. Визуальное определение пола очень трудоемко и невозможно до наступления плодоношения. Одним из способов сдерживания и замены является подход, при котором решение может приниматься по результатам инструментального обследования. В рамках данной задачи мы поставили целью отличать мужские и женские генотипы как на генеративной, так и на вегетативной стадиях. Мы демонстрируем отличия физиологических характеристик абаксиальной и адаксиальной сторон листовых пластинок с целью создания методов мониторинга. Анализ спектральных характеристик отраженного растениями света основан на различиях в отражательной способности. Ранее мы продемонстрировали применение технологии определения пола *Rumex acetosa* L. (Baranova E.N., 2025).

Данные были получены с использованием гиперспектральной исследовательской камеры «Синерготрон» (Золотой Шар, Москва, Россия) на гиперспектральном исследовательском модуле М.Гк.

Разница между отражениями поверхности листьев разных видов клена по индексу NDWI, связанная с гендерной принадлежность, была обнаружена в начале, в середине вегетации, но наибольшие различия мы фиксировали в осенний период. Перспектива применения фотохимических индексов и смешанных индексов, таких как SIPI и SGI у некоторых видов клена позволяет разработать метод дистанционной оценки пола при мониторинге состояния городских насаждений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Главного ботанического сада (№ 124030100058-4).

## Литература

1. Harris, J. G. S. (1991). The history of the exploration and introduction into cultivation of maples (Acer). *Arboricultural Journal*, 15(2), 113-126.
2. Rosado, A., Vera-Vélez, R., & Cota-Sánchez, J. H. (2018). Floral morphology and reproductive biology in selected maple (Acer L.) species (Sapindaceae). *Brazilian Journal of Botany*, 41(2), 361-374.
3. Baranova E.N., Vernik P.A., Fedorov A.V., Tkacheva E.V., Shelepova O.V., Konovalova L.N., Latushkin V.V. Using Leaf and Shoot Color Characteristics in Breeding for Sex Detection in *Rumex acetosa* L. Plants at the Budding Stage Issue *Photonics Russia* №8/2025

**МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИСТЬЕВ РАЗНЫХ ВИДОВ И ГИБРИДОВ *AESCULUS***

**Morphological features and spectral characteristics of leaves of different species  
and hybrids of *Aesculus***

Богоутдинова Л.Р.<sup>1\*</sup>, Ралдугина Г.Н.<sup>2</sup>, Коновалова Л.Н.<sup>1</sup>, Шелепова О.В.<sup>1</sup>,  
Латушкин В.В.<sup>3</sup>, Ткаченко О.Б.<sup>1</sup>, Митрофанова И.<sup>1</sup>, Баранова Е.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Главный ботанический сад имени Н.В. Цицина РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Автономная некоммерческая организация Институт стратегий развития, Москва, Россия

\*e-mail: bogoutdinova\_lr@rambler.ru, тел.: +7 915 2268085

Конский каштан – очень распространённое во многих городах мира декоративное дерево, широко используемое при озеленении. В настоящее время активно развиваются методы дистанционного мониторинга состояния растений. Анализ спектральных характеристик отраженного растениями света основан на различиях в отражательной способности, которые проявляются в изменчивости оптических свойств растений (Shpanev, 2022). Индекс хлорофилла тесно связан с содержанием хлорофилла в тканях листа и может служить мерой ёмкости фотосинтетического аппарата и потенциальной способности растения к поглощению солнечной радиации (Sims, Gamon, 2002). Указанные индексы нашли применение при характеристике стрессовых условий, вызванных дефицитом минерального питания и влаги (Shpanev, 2022). Таким образом, целью исследования являлось изучение спектральных характеристик листьев разных видов и гибридов *Aesculus*.

Данные были получены с использованием гиперспектральной визуализации с помощью гиперспектральной исследовательской камеры «Синерготрон» (Золотой Шар, Москва, Россия). Были изучены следующие индексы:  $NDWI = ((R842 - R560) / ((R840 - R560)))$ ;  $DSWI = R550 / R680$ ;  $SIPi = (R842 - R470) / (R842 - R705)$ .

Существенной разницы между видами конского каштана по индексу NDWI не было обнаружено, независимо от освещенности кроны. Однако изменения между видами уже были выявлены по индексу DSWI. Снижение фотохимического индекса SIPi у некоторых видов конского каштана было обнаружено в условиях сниженной освещенности кроны.

Таким образом, индексы гиперспектрального анализа DSWI и SIPI успешно применялись для оценки спектральных характеристик листьев разных видов и гибридов *Aesculus*. Это открывает перспективы дистанционной оценки при мониторинге состояния городских деревьев.

Работа выполнена в рамках государственного задания Главного ботанического сада (№ 124030100058-4).

## Литература

1. Shpanev, A.M.; Smuk, V.V. Changes in the spectral characteristics of cultivated and weed plants under the influence of mineral fertilizers in agrocenoses of the North-West of Russia. Sovr. Probl. DZZ Kosm. 2022, 19, 165–177.
2. Sims, D.A.; Gamon, J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. Remote Sens. Environ. 2002, 81, 337–354.

**ПАТОМОРФОЗ ПЕРЕВИТЫХ ОПУХОЛЕЙ У ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ  
ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАЗМОННОЙ ФОТОТЕРМИЧЕСКОЙ И  
ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ**

**Pathomorphism of transplanted tumors in laboratory animals with combined  
plasmonic photothermal and photodynamic therapy**

*Бучарская А.Б.<sup>1\*</sup>, Наволокин Н.А.<sup>1</sup>, Шушунова Н.А.<sup>1</sup>, Гуслякова О.И.<sup>1</sup>,  
Генин В.Д.<sup>1</sup>, Генина Е.А.<sup>1</sup>, Хлебцов Б.Н.<sup>2</sup>, Богатырев В.А.<sup>2</sup>, Тучин В.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»,  
Саратов, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов  
Российской академии наук, Саратов, Россия

*\*e-mail: allaalla\_72@mail.ru, тел.: +7 905 3850895*

Целью исследования была оценка морфологических изменений перевитых опухолей у лабораторных животных после комбинированной фотодинамической терапии (ФДТ) и плазмонной фототермической терапии (ПФТ).

**Материалы и методы.** Мышам Balb/c внутримышечно вводили 20 мкл суспензии клеток колоректального рака СТ-26, и когда объем опухоли достигал 500 мм<sup>3</sup>, проводили терапию. Для ПФТ использовали ЗНС, покрытые полиэтиленгликолем, которые вводили внутритуморально в объеме 30% от объема опухоли. Для ФДТ использовали индоциановый зеленый, разведенный в полиэтиленгликоле (1:100), вводили мышам внутритуморально в дозе 2 мг/кг. Для комбинированной терапии мышам вводили одновременно ЗНС и индоциановый зеленый в половинных дозах. Через 20 минут опухоль облучали чрескожно диодным ИК лазером с длиной волны 808 нм, плотностью мощности 2,3 Вт/см<sup>2</sup> в течение 5 мин. Температуру нагрева опухоли измеряли с помощью тепловизора IRYSYS 4010 (UK). Вывод животных и забор ткани опухоли для гистологического исследования проводили через 21 день после терапии.

**Результаты.** В ходе комбинированной терапии отмечено повышение температуры нагрева опухоли до 60,5±3°C, после терапии наблюдали появление ожоговой поверхности на коже над опухолевой тканью. Через 21 день отмечали значительное торможение роста опухолей и выраженный патоморфоз в группе мышей с комбинированной терапией.

**Выводы.** Предложенная технология комбинированной ФДТ и ПФТ терапии вызывает выраженный патоморфоз опухолевой ткани у мышей с перевитым колоректальным раком.

**ВЛИЯНИЕ АДСОРБЦИИ СЫВОРОТОЧНОГО АЛЬБУМИНА НА СПОСОБНОСТЬ  
УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ К СВЯЗЫВАНИЮ И ВЫСВОБОЖДЕНИЮ  
ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОВ**

**EFFECT OF SERUM ALBUMIN ADSORPTION ON THE ABILITY OF  
CARBON NANOPARTICLES TO BIND AND RELEASE  
PHOTOSENSITIZERS**

*Гвоздев Д.А. \*, Миллер Т.М., Мутовкин П.А.*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

*\*e-mail: danil131054@mail.ru, тел.: +7 985 3079421*

При попадании наночастиц (НЧ) в биологическую среду, в том числе в сыворотку крови, их поверхность практически мгновенно подвергается адсорбции белков, что приводит к формированию так называемой «белковой короны». Поверхность, образованная иммобилизованными белками, способна существенно модулировать функциональные свойства НЧ. В контексте фотодинамической терапии и направленной доставки фотосенсибилизаторов (ФС) формирование белковой короны играет двойственную роль. С одной стороны, она может блокировать активные центры НЧ, снижая эффективность загрузки ФС, модифицировать их флуоресцентные свойства (что критически важно для тераностики) и индуцировать агрегацию наночастиц. С другой стороны, корона, образованная сывороточным альбумином, содержащим несколько гидрофобных связывающих доменов, потенциально способна выступать в качестве вторичной платформы для захвата гидрофобных молекул ФС.

В рамках настоящей работы установлено, что адсорбция бычьего сывороточного альбумина (БСА) на поверхность углеродных наноточек гидротермального синтеза (уНТ) и наноалмазов детонационного синтеза (НА) приводит к тушению флуоресценции триптофанильных остатков белка. Зависимость изменения интенсивности флуоресценции БСА в присутствии углеродных НЧ, построенная в координатах Штерна-Фольмера, описывается моделью смешанного тушения. В работе обсуждаются возможные механизмы переноса энергии между аминокислотными остатками белка и поверхностными доменами НА и уНТ, образованными  $sp^2$ -гибридизованным углеродом. Методом Фурье-ИК спектроскопии в присутствии НЧ зарегистрированы незначительные конформационные перестройки БСА (полоса Амид I), а также изменение микроокружения белковых глобул (полоса Амид II). Адсорбция белка не

сопровождалась агрегацией наночастиц, однако приводила к изменению дзета-потенциала их поверхности. Кроме того, методами стационарной и времяразрешенной флуориметрии мы продемонстрировали модификацию флуоресцентных свойств уНТ в присутствии БСА, что, вероятно, обусловлено экранированием флуоресцирующих центров на поверхности уНТ молекулами белка.

БСА вступает в конкурентные отношения с ФС (водорастворимыми фталоцианинами, доксорубицином) за сайты связывания на поверхности уНТ и НА. Мы обнаружили, что стехиометрическое соотношение в конъюгате ФС-НЧ снижается в присутствии БСА, причем уменьшение максимальной стехиометрии более выражено в случае предварительной адсорбции БСА на поверхность наночастиц. Изменение стехиометрии обусловлено прежде всего экранированием доступных центров  $\pi$ - $\pi$ -стэкинга гидрофобными участками белковой глобулы, тогда как карбоксильные группы на поверхности НЧ сохраняют доступность для электростатических или ковалентных взаимодействий с ФС. При этом ФС, прочно адсорбированные на НЧ посредством  $\pi$ - $\pi$ -стэкинга, не высвобождаются в присутствии липосом, тогда как менее сильные электростатические взаимодействия между ФС и НЧ в составе конъюгата не препятствуют выходу ФС. Следовательно, адсорбция сывороточного альбумина на поверхность углеродных НЧ может способствовать эффективности доставки ФС за счет экранирования сайтов  $\pi$ - $\pi$ -стэкинга.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-24-00125, <https://rscf.ru/project/24-24-00125/>).

**МОДИФИКАЦИЯ БИОПОЛИМЕРОВ И ПОЛИМЕРОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ  
ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА С ФОРМИРОВАНИЕМ  
УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ**

*Гусенков А.А., Астафьев А.А., Осыченко А.А., Надточенко В.А.\**

Федеральный исследовательский центр химической физики  
им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

*\*e-mail: nadtochenko@gmail.com*

Углеродные наноматериалы, полученные из биополимеров или органических полимеров под действием фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона, обладают новыми интересными спектральными свойствами. При определенных условиях образуются люминесцентные продукты, которые представляют собой многообещающую альтернативу традиционным  $\pi$ -сопряженным флуоресцентным красителям для флуоресцентной визуализации и сенсорики. В докладе сообщается о методе получения люминесцентных углеродных нано-точек (УНТ) из биополимеров и органических полимеров с использованием высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов. Лазерный синтез УНТ был достигнут за счет нелинейного поглощения и фемтосекундного оптического пробоя в материале, что инициировало химические превращения с образованием углеродных материалов.

**ОЦЕНКА АНГИОГЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА И ОТВЕТА НА ТЕРАПИЮ  
КСЕНОТРАНСПЛАНТИРОВАННЫХ ОПУХОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ  
БИОМЕДИЦИНСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

Дружкова И.Н.<sup>1\*</sup>, Орлова А., Субочев П.<sup>2</sup>, Курников А.<sup>2</sup>, Глявина А.<sup>2</sup>,  
Исакова А.<sup>3,4</sup>, Куковьякина Е.<sup>4</sup>, Плотникова Е.<sup>4,5</sup>, Гаспарян М.<sup>4</sup>,  
Комарова А.<sup>1</sup>, Синюшкина С., Потапов А.<sup>1</sup>, Плехонов А.<sup>1</sup>,  
Спащанский Р.<sup>1</sup>, Яголович А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Факультет биологии, Московский государственный университет им.  
М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и  
Ю.А. Овчинникова РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр  
радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации,  
Москва, Россия

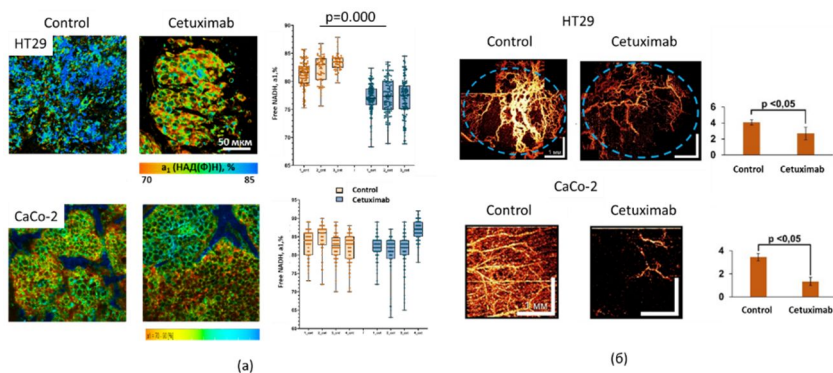
*\*e-mail: danirin@yandex.ru*

Опухолевый неоангиогенез – важный фактор роста опухоли, ее метастазирования и прогрессированию заболевания. Ангиогенный потенциал опухолей различается, что может влиять на прогноз и ответ на терапию. Другим фактором, определяющий ответ опухоли на терапию, является энергетический метаболизм раковых клеток, который также может являться перспективной терапевтической мишенью и маркером ответа опухоли на терапию [1,2]. Комбинированные сравнительные исследования структурных сосудистых характеристик и функциональных особенностей различных злокачественных опухолей могут быть крайне полезны для понимания биологии опухоли и ответа на терапию. Такие методы биоимиджинга как время-разрешенная флуоресцентная микроскопия и оптоакустическая (ОА) визуализация идеально подходят для данных задач [3].

В данном исследовании были получены ксенотрансплантаты трех наиболее агрессивных типов рака человека: глиобластомы U87MG, рака желудка MKN-45 и рака поджелудочной железы MIA PaCa-2 на иммунодефицитных мышах. Изучение сосудистой сети с помощью оптоакустической микроангиографии выявило наиболее высокую степень васкуляризации в ксенотрансплантатах U87MG и наименьшую в

ксенотрансплантатах MIA PaCa-2. Как показано с помощью двойного окрашивания PAS-CD31, опухоли, полученные из U87MG, также продемонстрировали максимальную экспрессию эндотелиального маркера CD31 и способность к васкулогенной мимикрии. Параллельно с этим, метаболическая визуализация с помощью флуоресцентной микроскопии с измерением времени жизни флуоресценции (FLIM) восстановленного никотинамидадениндинуклеотида (NADH) показала, что ксенотрансплантаты MIA PaCa-2 были наиболее гликолитическими, тогда как U87MG имели более высокие уровни окислительного фосфорилирования, а MKN-45 показали промежуточные значения.

Кроме того, мы сравнили терапевтически ответ колоректального рака CaCo-2 и HT29 на таргетную терапию препаратом цетуксимаб, блокирующим EGFR, используя оптическую когерентную томографию-микроангиографию (ОКТ-МА), FLIM и иммуногистохимический анализ. Чувствительные к терапии опухоли CaCo-2 продемонстрировали значительное снижение плотности перфузируемых сосудов по данным ОКТ-МА в результате повреждения псевдососудов. Метаболических изменений в данных опухолях не наблюдалось. В то время как опухоли HT29, не ответившие на лечение, продемонстрировали меньшее повреждение сосудов и переход к окислительному метаболическому состоянию, что может быть связано с резистентностью опухоли (рис. 1).



**Рисунок 1.** (а) репрезентативные флуоресцентные изображения с временным разрешением (б) ОКТ-МА опухолевых сенографтов в контроле и при терапии.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-15-00294-П.

**МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ВОЛНОВОДЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕМОГЛОБИНА И ГЛИКИРОВАННОГО ГЕМОГЛОБИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩЕГО СОПОЛИМЕРА 3-АМИНОФЕНИЛБОРОНОВОЙ КИСЛОТЫ И ПОЛИДОФАМИНА**

*Занишевская А.А.*

ООО НПП «Наноструктурная Технология Стекла»

*e-mail: zan-anastasiya@yandex.ru*

**Введение.** Мониторинг параметров крови - один из основных способов контроля здоровья человека. Одним из наиболее важных белков крови является гемоглобин. Его норма зависит от возраста и пола: у здоровых мужчин она обычно составляет 130–160 г/л, у женщин — 120–150 г/л, а у детей меняется с возрастом. Уровень гемоглобина измеряется в граммах на литр (г/л) и определяется с помощью общего анализа крови [Chui et al., 2003; Singer et al., 1951; Barbarani et al., 2020]. Помимо основной функции – транспорт кислорода, гемоглобин также выполняет утилизационную роль при избыточном и длительном содержании глюкозы в крови. Гликированный гемоглобин (HbA1c) – это продукт спонтанной реакции между гемоглобином и глюкозой в крови [Morley 1989; Dunn 2023]. Гликирование – это неферментативный процесс, также известный как реакция Майяра, при котором глюкоза и другие сахара спонтанно реагируют со свободными аминоконцевыми остатками сывороточных белков, особенно с лизином и аргинином. Первоначально конденсация свободной альдегидной группы углевода в ее открытой (ациклической) форме с N-концевой аминокислотой белка образует обратимый основной продукт Шиффа – промежуточный альдимин. Этот продукт может быть повторно преобразован в глюкозу и белок или подвергнут перегруппировке Амадори с образованием производного фруктозамина посредством стабильной, хотя и слегка обратимой, кетоаминовой связи [Mayer, 1983; Peacock 1984; Zhou, 2023].

Согласно рекомендациям ВОЗ уровень HbA1c менее 6,0% считается показателем нормы. Значения в диапазоне от 6% до 6,5% являются сомнительными показателями и требуют дополнительного исследования, а значения выше 6,5% свидетельствуют о сахарном диабете и высокой степени опасности развития осложнений. Результаты мониторинга используются для определения степени эффективности терапии, регулирования диеты, медикаментозных назначений и физических упражнений для достижения лучшего гликемического контроля. Таким образом, своевременное выявление перманентного или эпизодического

повышения уровня глюкозы в крови позволяет предотвратить ряд серьезных последствий, вызванных нарушениями углеводного обмена [Schnedl 1997; Джаборова 2023]. Существует множество методов определения гликированного гемоглобина, которые в целом можно разделить на 2 группы: К первой группе относятся методы количественного определения гликированного гемоглобина, основанные на разнице в заряде между гликированными и негликированными компонентами (например, катионообменная хроматография и электрофорез в агарозном геле). Ко второй группе относятся методы, разделяющие компоненты на основе структурных различий между гликированными и негликированными компонентами, такие как аффинная хроматография на боронатах и иммуноанализ [Little 2009; Sacks, D. B. (2012)].

Явление специфического связывания цис-диольных групп гликогемоглобина с борной кислотой и ее производными достаточно хорошо изучено. В частности, на этом явлении основан метод боронатной аффинной хроматографии связывании цис-диольных [Li 2002; Oremek G, 1987; Bhat, 2011].

Среди различных производных бороновой кислота 3-аминофенилбороновая кислота (3-АРВА) является одним из наиболее популярных рецепторов для создания сенсоров на HbA1c по нескольким причинам [Zhong, W 2021; Bull, 2013]:

Наличие аминокислоты: Аминогруппа в мета-положении предоставляет удобный «якорь» для ковалентной иммобилизации молекулы на различные поверхности (золото, оксиды, полимеры) или для введения в состав более сложных флуоресцентных зондов.

Оптимальные координационные свойства: Пространственное расположение функциональных групп способствует эффективному связыванию с диолами.

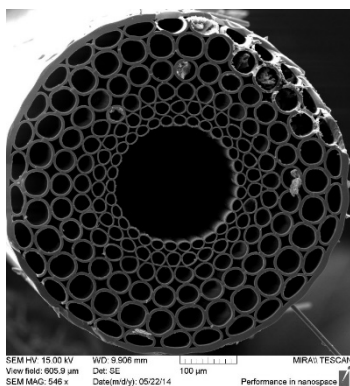
Относительно низкий рКа: рКа 3-АРВА составляет около 8.7, что позволяет работать в мягких щелочных условиях (рН 8.5–9.0), приемлемых для стабильности гемоглобина.

Современные методы измерения HbA1c (ВЭЖХ, иммуноанализ) отличаются высокой стоимостью и зависимостью от инфраструктуры. Сенсоры на основе ЛПП (локализованного поверхностного плазмонного резонанса), электрохимические и флуоресцентные сенсоры имеют ряд ограничений, таких как: сложность системы; чувствительность к внешним условиям; высокая стоимость; ограниченная селективность.

Оптические волноводы с полый сердцевинкой обеспечивают: устойчивость к электромагнитным помехам; большой динамический диапазон измерений; низкий расход пробы; быстрое время отклика;

простую интеграцию с носимыми устройствами и системами диагностики на месте оказания медицинской помощи.

В настоящее время уже продемонстрирован большой потенциал микроструктурных волокон с поллой сердцевиной (рис. 1) в обнаружении и измерении концентрации широкого спектра веществ и биомолекул, включая белки, ДНК, антитела и сахара, в том числе в крови человека [Ayayanar, N., et. al, "Protein Detection Using Hollow Core Microstructured Optical Fiber." IEEE Sensors Journal (2024); Kudryavtseva, O. M. et. al. "Direct detection of antibodies to *Yersinia pestis* using glass microstructural waveguides as an express method for assessing seroconversion in individuals vaccinated against plague." Epidemiology and vaccination. (2022); Konnova, S. S. et.al. "Determination of cholesterol levels in blood serum using microstructural waveguides." Fundamental and Applied Medicine (2022); Zanishevskaya, A.A., et. al., "Blood typing using microstructured waveguide smart cuvette." Journal of Biomedical Optics (2015); Zanishevskaya, A.A., et. al., "Microstructured waveguides for serological examination of blood." Progress in Biomedical Optics and Imaging (2014); Zanishevskaya, A.A., et. al, " Determination of glucose concentration in biological liquids using photonic crystal waveguides." Optics and Spectroscopy (2013); Konnova S.S., et. al. "Microstructured waveguide sensors for point-of-care health screening." Photonics (2025)]. Таким образом, использование микроструктурных волноводов (МОВ) является обоснованным, технологически превосходящим существующие решения и ориентированным на децентрализованную диагностику диабета.



**Рисунок 1.** Поперечное сечение микроструктурного волновода.

Принцип измерения с помощью МОВ основан на регистрации изменения максимумов и минимумов в спектре пропускания микроструктурного оптического волокна с полый сердцевинной. Эти резонансные особенности связаны с резонансами Фабри-Перо в основной стенке капилляра, а их спектральное положение однозначно связано с показателями преломления (RI) биоаналитов и представляет собой волновую гребенку. Одинокое волокно позволяет измерять RI с чувствительностью до  $\sim 3000$  нм/RIU и показателем качества (FOM), достигающим 99 RIU в видимой и ближней инфракрасной областях спектра [Ermatov et. al., 2020]. Используя в работе оптические волноводы данного типа, мы планируем решить проблему дифференцировки пиков гемоглобина и гликированного гемоглобина за счет одновременной регистрации спектра пропускания и спектра флуоресценции.

Основным геометрическим параметром, оказывающим влияние на спектральные характеристики волновода, является толщина стенок капилляров структурной оболочки. В спектре пропускания МОВ присутствуют, как правило, несколько максимумов пропускания [Fedotov, 2012]. Таким образом, варьируя параметры структуры волновода в процессе изготовления мы сможем менять его оптические свойства в соответствии с поставленными задачами. Использование флуоресцирующего со-полимера 3-аминофенилбороновой кислоты и полидофамина для количественного определения гликированного гемоглобина обеспечит селективность метода [Wang, 2019; Přibyl, 2005; Wang, 2014; Wiley, 2001 и др.].

**Материалы и методы.** Для синтеза полимера 3-APBA-PDA использовали 3-Aminophenylboronic acid (Sigma Aldrich); Dopamine hydrochloride (Solarbio); Аммиак; Дистиллированную воду, Соляная кислота. Синтез производили по методике Vona *et. al.* 2024, с модификациями:

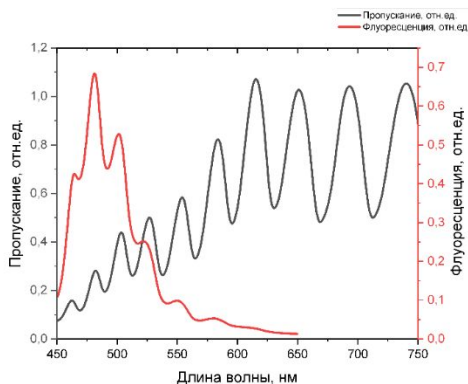
1 ммоль мономера дофамина (38 мг) добавляли в 200 мл 1% аммиака (по объему), инкубировали 15 минут при комнатной температуре на магнитной мешалке. Добавляли 1 ммоль 3-АФБК (28 мг), растворенный в 1 мл 1% аммиака и инкубировали при комнатной температуре и перемешивании в течение 24 ч. Далее останавливали реакцию 1М раствором соляной кислоты до конечной pH 7,5. Под вакуумом в роторном испарителе Heidolph, Германия полимер упаривали и трикратно отмывали ацетоном. Осадок перерастворяли в 50 мл бидистиллированной H<sub>2</sub>O и фильтровали через бумажный фильтр (синяя лента, размер пор 3 мкм). Хранили при +4. Разведения полимера для экспериментов готовили

на бидистиллированной  $H_2O$ . Для проведения измерений спектров пропускания и флуоресценции полимер разводили в соотношении 1:256.

В качестве модельных растворов использовались концентрированные контрольные образцы гликогемоглобина (Элта, TruLab) с известным содержанием HbA1c, а также набор контрольных образцов гемоглобина «Гемоглобин-контроль» (Агат), для которых содержание HbA1c определяли с помощью набора ГЛИКОГЕМОТЕСТ (Элта).

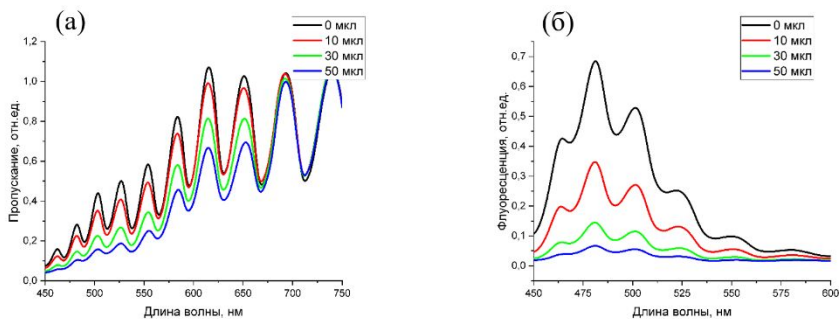
Для измерения спектров пропускания и флуоресценции использовались: галогеновая лампа белого света Ocean Optics HL-2000-HP (20 Вт, 360-1700 нм, оптоволоконный выход SMA 905), спектр-анализатор Ocean Optics HR4000, а также 3D-юстируемые подвижки, коллиматоры и микрообъективы, УФ-диод 405 нм. Основные узлы установки служат для ввода оптического излучения от источника в сердцевину волновода и регистрации прошедшего по волноводу излучения. Излучение от источника с помощью оптоволоконного кабеля с коллиматором, закрепленным на двухкоординатной юстировочной подвижке, подается на линзу с фокусным расстоянием 6 мм, закрепленную на двухкоординатной подвижке. Образец МОВ помещается в специальную стеклянную кювету-держатель. Излучение, выходящее из полый сердцевины МОВ, собирается второй линзой и подается на вход оптоволоконного кабеля цифрового спектрометра, подключенного к компьютеру через USB-интерфейс. Для проведения анализа, исследуемый раствор заливается в кювету, затем за счет капиллярных сил происходит заполнение сердцевины и каналов оболочки МОВ. После этого измеряется спектр пропускания заполненного волновода. После регистрации спектра пропускания, источник белого света заменяется УФ-диодом для возбуждения флуоресценции.

**Результаты.** На рисунке 2 показан спектр пропускания МОВ с чистым полимером 3-APBA-PDA (в разведении) и спектр флуоресценции МОВ, заполненного полимером. Спектры имеют ярко выраженную гребенчатую форму, что является особенностью используемого типа МОВ.



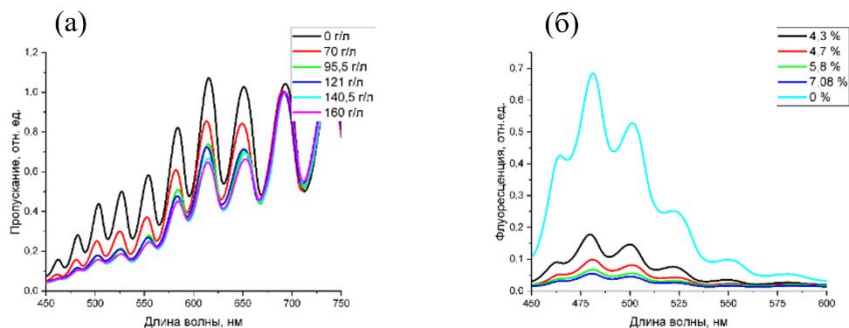
**Рисунок 2.** Спектр пропускания МОВ с чистым полимером и спектр флуоресценции МОВ, заполненного полимером

При добавлении к раствору полимера контрольного раствора гемоглобина ( $Hb = 140.5$  г/л,  $HbA1c = 5.8\%$ ) в количестве 10,30 и 50 мкл регистрируется значительное снижение интенсивности флуоресценции полимера из-за связывания с гликогемоглобином, а также снижение пропускания в белом свете за счет поглощения гемоглобина (рис. 3).



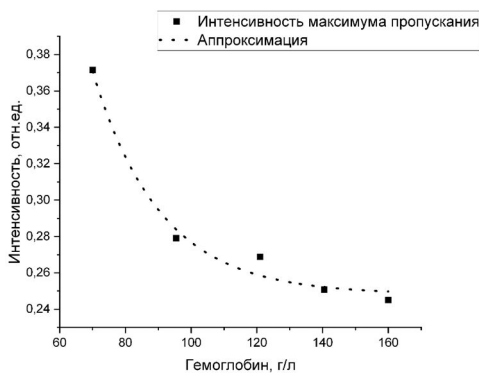
**Рисунок 3.** Спектры пропускания (а) и флуоресценции (б) МОВ, заполненных раствором полимера с контрольным образцом гемоглобина.

Далее было произведено построение калибровочных кривых для определения содержания гемоглобина в пробе и процента гликированного гемоглобина с использованием калибровочных растворов. На рис. 4 показаны полученные спектры пропускания и флуоресценции.



**Рисунок 4.** Спектры пропускания (а) и флуоресценции (б) МОВ, заполненных раствором полимера с контрольным образцом гемоглобина.

В качестве параметра для определения количества гемоглобина в образце была выбрана интенсивность максимума пропускания на 550 нм. Зависимость интенсивности максимума пропускания от концентрации гемоглобина показана на рис. 5.



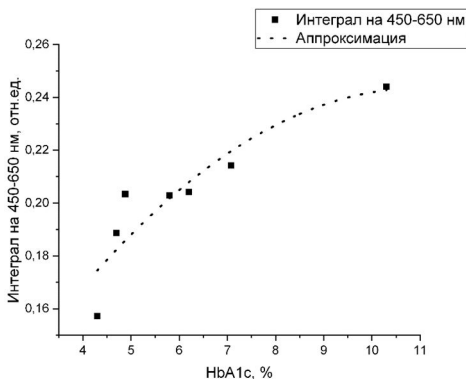
**Рисунок 5.** Зависимость интенсивности максимума пропускания на длине волны 550 нм от концентрации гемоглобина.

В качестве параметра для определения процента гликированного гемоглобина в образце было решено использовать интеграл на диапазоне длин волн 450-600 нм. Очевидно, что поглощение гемоглобина оказывает

значительное влияние на регистрируемые спектры флуоресценции. Для корректировки результата использовали следующий расчет:

$$F_k = F_{pol} - \frac{F_k * I_{pol}}{I_k},$$

где  $I_{pol}$  и  $I_k$ - интегралы на диапазоне длин волн 450-600 нм для спектров пропускания МОВ, заполненных чистым полимером и полимером с добавлением контрольных образцов гемоглобина, соответственно,  $F_{pol}$  и  $F_k$ - интегралы на диапазоне длин волн 450-600 нм для спектров флуоресценции МОВ, заполненных чистым полимером и полимером с добавлением контрольных образцов гемоглобина, соответственно. Полученная калибровочная кривая показана на рис. 6.



**Рисунок 6.** Зависимость интеграла на диапазоне длин волн 450-600 нм от содержания HbA1c.

**Выводы.** Показана возможность одновременного измерения содержания гемоглобина и гликогемоглобина в анализируемой пробе с использованием микроструктурного оптического волновода путем регистрации и анализа спектров пропускания и флуоресценции. Флуоресцирующий полимер 3-APBA-PDA, имеющий специфическое сродство с цис-диоловыми остатками применили для оценки концентрации гликированного гемоглобина крови человека.

**ГЕНОМНЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ КАК МАРКЕР ФОРМИРОВАНИЯ РЕЗИСТЕНТНОСТИ У *STAPHYLOCOCCUS AUREUS* К ФИОЛЕТОВОМУ СВЕТОДИОДНОМУ (405 НМ) ИЗЛУЧЕНИЮ**

Каневский М.В.<sup>1</sup>, Краснов Я.М.<sup>2</sup>, Катыхев А.Д.<sup>2</sup>,  
Шарабарина Т.В.<sup>1</sup>, Тучина Е.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

<sup>2</sup>Российский научно-исследовательский противочумный институт «Микроб» Роспотребнадзора

e-mail: matvejkanev@mail.ru

Развитие антимикробной фотодинамической терапии требует изучения не только внутриклеточных эффектов, но и возможной адаптации микроорганизмов к многократному облучению. Целью данной работы являлось исследование структурных изменений генома *Staphylococcus aureus* при многократном воздействии фиолетового светодиодного излучения (405 нм, 70 мВт/см<sup>2</sup>, 72 Дж/см<sup>2</sup>).

За один цикл принимали облучение бактериальной суспензии в течение 15 мин. На основе анализа динамики выживаемости в течение 30 циклов был получен экспериментальный штамм *S. aureus* MS30, обладающий потенциальной резистентностью к излучению. Генетический материал контрольного (MS1) и опытного (MS30) штаммов был изучен методом ПЦР в реальном времени с последующим биоинформатическим анализом (BLAST).

Изучение динамики численности бактериальной популяции *S. aureus* MS при последовательном повторном облучении показало следующее. С 1 по 5 цикл происходило незначительно сокращение выживаемости – с 85% до 82%, с 5 по 10 цикл снижение КОЕ приобретало более выраженный характер – с 82 до 63%, затем, с 10 по 15 цикл отмечено восстановление численности до более высоких значений (63-76%), с 15 по 20 цикл значения выживаемости после облучения сохранялся на том же уровне (76%). С 20 по 25 цикл облучения для тестируемой культуры было характерно снижение числа КОЕ с 76 до 70% и выход численности на плато, соответствующее значениям 70-68%, к 30 циклу облучения.

В ходе сравнительного анализа полученных нуклеотидных последовательностей между собой были выявлены существенные структурные различия между исследуемыми образцами. Наблюдались инсерции и делеции определенных участков хромосомной ДНК в бактериальных образцах, подвергшихся облучению. Установлено, что

размер геномов обоих образцов составил около 2,77 млн п.н. В геноме штамма MS30 выявлены существенные структурные отличия от контрольного штамма: интеграция двух транспозазных элементов (семейства IS3) в кодирующую область гена белка хвостового волокна бактериофага, а также делеция протяженного участка генома размером около 20000 п.н., содержащего гены транспозаз и фаговых белков. Увеличения копийности или делеции генов *recA*, *sodA*, *crtM* не обнаружено, однако отмечено повышение гомологии данных генов у штамма MS30 с референсными последовательностями (например, *recA* — с 99% до 99,25%), что может свидетельствовать о стабилизации генов репарации и антиоксидантной защиты.

Полученные результаты показывают, что многократное фотодинамическое воздействие способно индуцировать мобильные генетические элементы и крупные хромосомные перестройки у *S. aureus*, что имеет значение для оценки рисков формирования резистентности при клиническом применении АФДТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-24-00370 от 28.12.2024 г.

**ТЕХНОЛОГИЯ ОДНОВРЕМЕННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МЕТАБОЛИЗМА И  
ОКСИГЕНАЦИИ ОПУХОЛЕЙ *IN VIVO* С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ВРЕМЯ-РАЗРЕШЕННОЙ МИКРОСКОПИИ**

**Technology for simultaneous imaging of tumors metabolism and oxygenation  
*in vivo* using time-resolved microscopy**

Комарова А.Д.<sup>1,2\*</sup>, Бочкарев Л.Н.<sup>3</sup>, Анина А.А.<sup>1</sup>,  
Ширманова М.В.<sup>1</sup>, Щеславский В.И.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Институт металлоорганической химии имени Г.А. Разуваева,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>4</sup>Becker&Hickl GmbH, Берлин, Германия

\*e-mail: komarova.anastasii@gmail.com, тел.: +7 904 0451782

Влияние содержания кислорода в опухолях на метаболизм на данный момент является недостаточно изученным. Актуальной задачей остается разработка технологии одновременной визуализации кислородного и метаболического статусов опухолей *in vivo*. Методы PLIM (визуализация времени жизни фосфоресценции) и FLIM (визуализация времени жизни флуоресценции) позволяют проводить неинвазивную оценку кислородного и метаболического статусов в режиме реального времени.

Целью исследования было разработать протокол для одновременной оценки метаболического и кислородного статусов опухолевых клеток *in vivo* с использованием метода FLIM/PLIM микроскопии.

Исследования проводили на клетках колоректального рака мыши СТ26 (монослой, 3D-сфероиды, подкожные опухоли, привитые мышам линии Balb/c). Микроскопические исследования проводили на лазерном сканирующем микроскопе LSM880 с модулем FLIM/PLIM. Кислородный статус оценивали по времени жизни фосфоресценции чувствительного к молекулярному кислороду сенсора PtG3 одновременно с оценкой метаболического статуса по автофлуоресценции НАД(Ф)Н ( $\lambda_{\text{возб}}=750$  нм,  $\lambda_{\text{эм}}=450-490$  нм (НАД(Ф)Н),  $\lambda_{\text{эм}} = 600-740$  нм (PtG3)) [1].

Были выбраны параметры для визуализации сенсора PtG3 в опухолевых клетках, разработана и апробирована методика

одновременной FLIM/PLIM визуализации кислородного и метаболического статусов опухолевых клеток на моделях *in vitro* и *in vivo*. Установлено, что сенсор PIr3 не проявляет цитотоксичности в концентрации  $\geq 50\text{мкМ}$ , проникает в живые опухолевые клетки, локализуется в цитоплазме [1]. Методом FLIM/PLIM микроскопии на клеточном монослое *in vitro* продемонстрирована сильная положительная корреляция между метаболическими FLIM параметрами и уровнем оксигенации. В сфероиде внешний пролиферирующий слой был более оксигенированным по сравнению с внутренним, и метаболический статус внутреннего гипоксического слоя был смещен в сторону гликолиза. В опухоли *in vivo* наблюдалась высокая внутри- и межопухолевая гетерогенность кислородного и метаболического статусов, в отличие от монослойной культуры *in vitro*. В опухоли корреляция между метаболическими параметрами и содержанием кислорода была умеренной, что указывает на вклад иных факторов в регуляцию клеточного метаболизма [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 24-19-00618.

## Литература

1. Parshina Y. P. et al. Simultaneous probing of metabolism and oxygenation of tumors *in vivo* using FLIM of NAD (P) H and PLIM of a new polymeric Ir (III) oxygen sensor //International journal of molecular sciences. – 2022. – Т. 23. – №. 18. – С. 10263.
2. Komarova A. D. et al. Oxygen Assessment in Tumors *In Vivo* Using Phosphorescence Lifetime Imaging Microscopy //Hypoxia: Methods and Protocols. – New York, NY: Springer US, 2024. – С. 91-105.

**ИСКУССТВЕННЫЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОРФИРИНОВ: ПРИНЦИПЫ ДИЗАЙНА И ПРИМЕНЕНИЕ В ФОТОВОЛЬТАИКЕ**

**Artificial photosynthetic systems based on porphyrins: design principles and photovoltaic applications**

*Коновалова Н.В.\*, Шагабаева М.А.*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова Москва, Россия

*\*e-mail: nadejda\_73@mail.ru, тел.: +7 916 5680631*

Фотосинтез в природе осуществляется высокоорганизованными ансамблями фотоактивных тетрапиррольных хромофоров, окруженных протеинами, которые обеспечивают специфическое расположение пигментов в пространстве для оптимальной конверсии солнечной энергии. Структурная элегантность и химическая эффективность природных систем стимулировали поиск искусственных аналогов, большинство из которых включает порфириновые хромофоры. Искусственные фотосинтетические системы для преобразования солнечной энергии должны быть способны собирать и переносить энергию солнечного света, осуществлять разделение зарядов и использовать это состояние с разделенными зарядами для осуществления окислительно-восстановительных реакций, генерации фототока или полезной работы.

Многочисленные исследования в этой области привели к получению молекулярных и супрамолекулярных ансамблей, успешно моделирующих поглощение энергии, направленный перенос энергии и электрона и разделение зарядов [1]. Одним из практических применений подобных систем может служить разработка органических фотовольтаических ячеек, таких как ячейки Грэтцеля, использующих порфирины и молекулярные системы на их основе в качестве фотосенсибилизаторов, поглощающих энергию света и передающих электроны из возбужденного состояния в полосу проводимости полупроводникового электрода, что вызывает генерацию фототока [2, 3]. Фотосенсибилизатор в таких устройствах должен удовлетворять определенным требованиям. Во-первых, он должен содержать одну или несколько функциональных групп, обеспечивающих возможность для закрепления его на поверхности металл-оксидного полупроводника. Кроме того, спектр поглощения фотосенсибилизатора должен охватывать

значительную часть видимой области, а энергетический уровень возбужденного состояния фотосенсибилизатора должен быть выше края зоны проводимости полупроводника n-типа, что необходимо для реализации эффективной инжекции электрона в зону проводимости полупроводника.

В данном докладе будут представлены успехи в области моделирования переноса энергии и электрона в искусственных фотосинтетических системах на основе порфиринов, а также принципы молекулярного дизайна и перспективы использования этих систем в молекулярной фотонике и оптоэлектронике.

### **Литература**

1. Fukuzumi S. (2006) Bull. Chem. Soc. Jpn. 79: 177–195.
2. Urbani M., Grätzel M., Nazeeruddin M. K., Torres T. (2014) Chem. Rev. 114: 12330–12396.
3. Xie M., Liu J., Dai L., Peng H., Xie Y. (2023) RSC Adv. 13: 24699–24730.

**ВКЛАД СПЕКТРА СВЕТА В РОСТ И ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ СОИ И ТРИТИКАЛЕ, ВЫРАЩЕННЫХ В УСЛОВИЯХ СПИДБРИДИНГА**

**Contribution of light spectrum to the growth and productivity of soybean and triticale plants grown under speed breeding conditions**

Кочешкова А.А.<sup>1\*</sup>, Жидков Д.Г.<sup>2</sup>, Бизякина Д.О.<sup>1</sup>, Свистунова Н.Ю.<sup>1</sup>,  
Блинков А.О.<sup>1</sup>, Волгушева А.А.<sup>2</sup>, Черноок А.Г.<sup>1</sup>, Дивашук М.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: [alina.korotaeva@gmail.com](mailto:alina.korotaeva@gmail.com), тел.: +7 926 7552869

Спектральный состав света является важнейшим регуляторным фактором, управляющим процессами морфогенеза на протяжении всего онтогенеза растительного организма. Особое место параметрам освещения отводится в разработке протоколов спидбридинга (speed breeding).

Цель работы комплексная сравнительная оценка воздействия спектрального состава света на рост и продуктивность растений сои (*Glycine max*), а также на функциональное состояние фотосинтетического аппарата, тритикале (*Triticosecale*) и на разных этапах онтогенеза.

Объектом исследования служили 20 сортов сои и 48 линий яровой гексаплоидной тритикале. Растения сои и тритикале выращивались в климатических камерах на различных спектральных режимах света. Растения сои были сканированы с помощью высокопроизводительной системы цифрового фенотипирования TraitFinder (Phenospex). У растений тритикале диагностика функционального состояния фотосинтетического аппарата осуществлялась методом быстрой флуорометрии с использованием портативного флуориметра Handy PEA+. Проводился анализ ОЛР-кривых с последующей их интерпретацией в рамках ЛР-теста. При анализе продуктивности и фенологии растений учитывали классические агрономические показатели.

По результатам выращивания сои на разных спектрах установлено, что дальний красный (FR) достоверно задерживает цветение, тогда как синий (B) и красный (R) свет ускоряют его. Спектр B формирует компактные растения, R даёт промежуточную высоту с утолщением стебля, а FR вызывает сильное вытяжение и повышение прикрепления первых бобов. По данным цифрового фенотипирования, FR не только

увеличивает высоту, но и снижает NDVI, указывая на ухудшение фотосинтетического состояния растений.

У тритикале, вопреки типичному ускорению цветения фитохромами PhyV/PhyC, режим с высокой интенсивностью B+R совместно с белым светом замедлял развитие относительно контроля с только белым светом. При этом ключевым физиологическим итогом стала зависимость между показателем  $\delta Ro$  и озернёностью колоса. Максимальная эффективность транспорта электронов к акцепторам ФС I в варианте B+R обеспечила статистически значимое повышение числа зёрен по сравнению с группой белый + синий. Таким образом, спектр света значимо влияет на цветение, высоту и семенную продуктивность, что обосновывает его использование как инструмента оптимизации в программах спидбридинга и селекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания FGUM-2025-0010.

## Литература

1. Kalaji H. M. et. al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions //Acta Physiol Plant. – 2016. – Т. 38. – №. 102
2. Blinkov, A. O., Kroupin, P. Y., Dmitrieva, A. R., Kocheshkova, A. A., Karlov, G. I., & Divashuk, M. G. (2025). Speed Breeding: Protocols, application and achievements. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1680955

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ КОЖИ РАСТВОРОМ С ПОГЛОЩАЮЩИМ КОМПОНЕНТОМ**

### **Study of optical clearing of skin by a solution with an absorbing component**

*Лазарева Е.Н.<sup>1,\*</sup>, Шушунова Н.А.<sup>2</sup>, Бучарская А.Б.<sup>2</sup>, Тучин В.В.<sup>1,3,4</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов, Россия

<sup>3</sup>Институт проблем точной механики и управления, ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов, Россия

<sup>4</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

*\*e-mail: lazarevaen@list.ru, тел.: +7 960 3467715*

В настоящее время актуальной задачей биофотоники является поиск новых эффективных оптических просветляющих агентов (ОПА). Большой интерес для изучения в качестве ОПА представляют иммерсионные жидкости с поглощающим компонентом в УФ, видимой или ближней ИК областях, что объясняется резким повышением показателя преломления вблизи полосы поглощения, то есть более эффективным согласованием рефракции отдельных компонентов ткани [1-3].

В работе впервые представлены результаты исследования влияния водного раствора глицерина с йодом (81г глицерина, 1г йода, 2г йодида калия и 16 г воды) на оптические характеристики кожи мыши методом спектроскопии коллимированного пропускания в сравнении с обычным водным раствором глицерина 81%. Общее время воздействия ОПА на образец кожи мыши составляло 120 минут. Для регистрации спектров использовали спектрометры USB4000-Vis-NIR (Ocean Optics, США), спектральный диапазон 400-1000 нм, и NIRQuest 512-2.2 (Ocean Optics, USA), спектральный диапазон 900-2000 нм.

Результаты эксперимента показали, что оба ОПА обеспечивают значительный рост коллимированного пропускания кожи мыши. Сравнение основных параметров кинетических зависимостей для спектров коллимированного пропускания показало преимущества использования раствора глицерина с йодом в качестве ОПА. Например, для видимой области эффективность оптического просветления для образца в растворе глицерина с йодом на длине волны 633 нм достигает

25,4 отн. ед., что в 1,46 раз выше, чем для образца в растворе глицерина 81%. Процесс оптического просветления кожи в растворе глицерина с йодом протекает значительно быстрее. Характеристическое время диффузии для него в среднем в 1,9 раза меньше, а коэффициент диффузии ОПА — в 1,78 раза выше, чем для глицерина 81%, что свидетельствует о более высокой проникающей способности компонентов в структуру кожи. Следует отметить, что оба агента являются гипертоническими и вызывают дегидратацию ткани, однако раствор глицерина с йодом за счет химической активности ионов может вызывать более быструю дегидратацию белков.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-00287-П.

## Литература

1. Tuchin V. V., Zhu D., Genina E. A. (2022) Handbook of tissue optical clearing: new prospects in optical imaging, CRC Press. — 658.
2. Ou Z., Duh Y. S., Rommelfanger N. J., Keck C. H. et al. (2024) Achieving optical transparency in live animals with absorbing molecules / Science. Vol. 385. No. 6713. pp. eadm6869.
3. Genin V. D., Tuchina D. K., Sadeq A. J., Genina E. A., Tuchin V. V., Bashkatov A. N. (2016) Ex vivo investigation of glycerol diffusion in skin tissue. Journal of Biomedical Photonics & Engineering. Vol.2, №1. pp. 010303(5)

**АДРЕСНАЯ ДОСТАВКА НА ОСНОВЕ МАГНИТНО МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТРОМБОЦИТОВ**

**Targeted delivery based on magnetically modified platelets**

Майорова О.А.\*, Гуслякова О.И., Браташов Д.Н.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
Саратов, Россия

\*e-mail: oksanaamayorova@gmail.com, тел. +7 937 9632083

В современной медицине одной из актуальных задач является разработка биосовместимых систем адресной доставки, способные снизить системную токсичность и повысить эффективность транспортировки веществ в кровотоке. В последнее время особое внимание уделяется использованию природных клеточных носителей, которые лучше соответствуют требованиям биосовместимости и могут дольше циркулировать в организме по сравнению с синтетическими аналогами. В связи с этим тромбоциты представляют собой перспективные объекты исследования, за счет их способности циркулировать в кровотоке и взаимодействовать с клетками-мишенями, сохраняя свои функциональные свойства. Кроме того, возможность магнитной модификации тромбоцитов открывает новые перспективы для их направленного перемещения и удержания в нужном месте. В рамках данного исследования была изучена возможность взаимодействия тромбоцитов с магнитными наночастицами, а также проведена оценка функциональной способности тромбоцитов, содержащих эти частицы.

Для проведения исследования выделенные тромбоциты из цельной крови человека были модифицированы с помощью наночастиц магнетита, меченных бычьим сывороточным альбумином (БСА). Высокая степень интернализации FeНЧ-БСА тромбоцитами была показана с использованием ТЭМ, КЛСМ и СЭМ микроскопии. Анализ агрегации тромбоцитов спектрофотометрическим методом с использованием АДФ показал, что модификация тромбоцитов FeНЧ-БСА не вызывает значительной активации форменных элементов крови по сравнению с контрольными немодифицированными тромбоцитами. Исследования *in vitro* подтвердили, что модифицированные тромбоциты способны прикрепляться к раковым и чужеродным клеткам, при этом они не взаимодействуют с клетками, полученными из той же крови. Также была продемонстрирована передача липофильного красителя от тромбоцитов к клеткам, культивируемым совместно с ними, что может служить моделью

для доставки низкомолекулярных липофильных веществ. Для демонстрации возможности контроля движения суспензионных клеток после их взаимодействия с функционализированными тромбоцитами был проведён анализ клеточных популяций до и после воздействия магнитного поля. Эксперимент показал, что совместное инкубирование тромбоцитов, обогащённых FeNP-БСА(ТРИТЦ), с ТНР-1 в течение 24 часов приводит к переносу функционализированных тромбоцитов примерно на 20%. Однако после магнитной сепарации этот показатель увеличивается почти до 80%.

Результаты исследования показывают, что тромбоциты можно успешно модифицировать магнитными наночастицами магнетита без изменения их основных свойств. Это открывает новые возможности для адресной доставки и контроля клеточных популяций с помощью магнитов, что, в свою очередь, может привести к разработке персонализированных методов лечения и диагностики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00828, <https://rscf.ru/project/25-19-00828/>

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ СЕНСОРОВ  
КЛЕТОЧНОГО МЕМБРАННОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ОСНОВЕ  
АРХЕОРОДОПСИНА**

**Development and optimization of archaerhodopsin-based fluorescent genetically encoded voltage indicators**

*Николаев Д.М.<sup>1,2\*</sup>, Метелкина Е.М.<sup>2,3</sup>, Домский Н.А.<sup>2,3</sup>, Рязанцев М.Н.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский академический университет РАН  
им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический  
университет, Санкт-Петербург, Россия

*\*e-mail: dmitrii.m.nikolaev@gmail.com, тел.: +7 911 7499040*

Флуоресцентные генетически кодируемые сенсоры клеточного мембранного потенциала находят всё более широкое применение для визуализации активности электровозбудимых клеток и анализа физиологических и патологических процессов. В докладе будет представлено описание проведённого нами дизайна новых флуоресцентных генетически кодируемых сенсоров мембранного потенциала на основе родопсинов. Будут представлены характеристики разработанных сенсоров, а также рассмотрены их преимущества и ограничения по сравнению с другими классами генетически кодируемых сенсоров.

Работа поддержана грантом РНФ No 23-73-00041. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

## **Литература**

1. Nikolaev DM, Metelkina EM, Domsii NA, Osadchy IR, Mereshchenko AS, Bondarev SA, et al. (2025) Semirational Protein Engineering Yields Archaerhodopsin-3-Based Fluorescent Genetically Encoded Voltage Indicators with Enhanced Brightness and Red Shifted Absorption Bands. *Chem & Bio Engineering*, 2(10), 593–601
2. Nikolaev DM, Mironov VN, Metelkina EM, Shtyrov AA, Mereshchenko AS, Demidov NA, et al. (2024) Rational Design of Far-Red Archaerhodopsin-3-Based Fluorescent Genetically Encoded Voltage Indicators: from Elucidation of the Fluorescence Mechanism in Archers to Novel Red-Shifted Variants. *ACS Physical Chemistry Au*, 4(4), 347–362

**ПЕРЕНОС ЦИТОПЛАЗМЫ И ВЕРЕТЕНА ДЕЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ  
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО  
ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА**

**Cytoplasm and spindle transfer using near-infractory femtosecond laser radiation**

*Осыченко А.А. \*, Шахов А.М., Залесский А.Д.*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр химической физики  
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

*\*e-mail: alina.chemphys@gmail.com, тел.: +7 985 2293375*

Перенос цитоплазмы и веретена деления в вспомогательных репродуктивных технологиях (ВРТ) направлен на предотвращение передачи митохондриальных заболеваний для носителей мутаций митохондриальной ДНК [1]. Эти процедуры подразумевают перенос ядерной ДНК (метафазной пластинки в составе веретена деления), получаемой путём аспирации микроиглой, и слияние с здоровой, энуклеированной яйцеклеткой в электрическом поле или при помощи вирусов. В качестве альтернативы традиционным методам слияния разрабатывается новый подход с использованием фемтосекундного лазера ближнего инфракрасного диапазона для переноса цитоплазмы и веретена деления. Лазерное слияние демонстрирует перспективность для процедур ВРТ благодаря своей стерильности и точному воздействию.

В данной работе продемонстрировано слияние цитопластов (фрагментов ооцита, содержащих только цитоплазму) или кариопластов (фрагментов ооцита, содержащих веретено деления) с интактным ооцитом. Слияние подтверждали с помощью флуоресцентного красителя BODIPY, который связывается с липидами. Лазерный луч был сфокусирован на образце в вертикальной ориентации для достижения слияния. Окрашенный цитопласт (или кариопласт) сливался с неокрашенным ооцитом, и было продемонстрировано наличие флуоресценции в реконструированном ооците. Из 203 образцов слияние наблюдалось в 26% случаев. Наилучшие результаты слияния были достигнуты с использованием лазера с длиной волны 1033 нм, энергией импульса 32 нДж и частотой импульсов 200 кГц (экспозиция 10 мс).

Мы предполагаем, что лазерное слияние в сочетании с лазерной энуклеацией [2, 3] может быть полезно для вспомогательных репродуктивных технологий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-75-20020.

### **Литература**

1. F. Pasturino et al. Hum Reprod. 41(4):483-487, 2026
2. A. Osychenko et al. JBO 26(6): 065002
3. A. Osychenko et al. Biomed Opt Exp. 13(3): 1447-1456, 2022

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ПОРАЖЕНИЯ  
НЕРВНЫХ ВОЛОКОН ПРИ ИНТЕРСТИЦИАЛЬНОМ ЦИСТИТЕ**

**Functional and morphological signs of nerve damage in interstitial cystitis**

*Потапов А.Л.<sup>1\*</sup>, Беляков К.М.<sup>1</sup>, Стрельцова О.С.<sup>1</sup>, Хрулёв А.Е.<sup>1</sup>,  
Юлин В.С.<sup>2</sup>, Анина А.А.<sup>1</sup>, Александрова Е.А.<sup>2</sup>, Бородачёва И.В.<sup>2</sup>,  
Фомин С.В.<sup>2</sup>, Киселева Е.Б.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>ГБУЗ НО «Нижегородская областная клиническая больница им. Н.А. Семашко», Нижний Новгород, Россия

*\*e-mail: arseniy1109@gmail.com, тел.: +7 915 9560251*

**Актуальность.** Диагностика и лечение интерстициального цистита у женщин крайне актуальны из-за риска тяжелых осложнений – мучительных тазовых болей и дизурии [1]. Интерстициальный цистит (синдром болезненного мочевого пузыря) — это хроническое неинфекционное воспаление стенки мочевого пузыря, требующее комплексного подхода к диагностике и лечению, чтобы избежать истощения нервной системы и необратимых рубцовых изменений органа [2]. Лечение строго индивидуально, проводится поэтапно и обычно включает комбинацию методов: модификация образа жизни и диета, пероральная и внутривезикулярная терапия, физиотерапия и ботулинотерапия, в крайних случаях – хирургическое лечение [3]. Для разработки корректного плана терапии и получения индивидуальных назначений при купировании мочевого пузыря болевого синдрома необходимо точно знать выраженность изменений в нервных волокнах, расположенных в стенке мочевого пузыря, а также повреждены ли более крупные нервные структуры - половые нервы.

Цель исследования: оценить состояние полового нерва и тонких нервных волокон в ткани мочевого пузыря у пациентов с интерстициальным циститом.

**Материалы и методы.** В исследование включены 17 женщин: 6 с клиническим диагнозом интерстициальный цистит (группа «ИнтЦ», возраст 35-69 лет) и 11 условно здоровых добровольцев (группа «Норма», возраст 22-64 года). Исследование симпатической порции полового нерва проведено методом вызванного кожного симпатического потенциала (ВКСП) с применением модифицированной схемы наложения электродов.

В качестве стимуляционного и регистрирующего оборудования использовали электронейромиограф «Нейро МВП-4» (фирма «Нейрософт», РФ). Во время диагностической процедуры цистоскопии всем пациентам группы «ИнтЦ» взята петлевая биопсия из шейки мочевого пузыря. В качестве контроля для морфологического изучения нервных волокон стенки мочевого пузыря в норме взяты аутопсийные образцы от 2 кадаверов женского пола. Морфологическое исследование заключалось в оценке количества нервных волокон (окраска PGP 9,5), плазматических (CD138) и тучных клеток (Trypase).

**Результаты.** Наиболее информативным показателем ВКСП является латентность, У пациентов с интерстициальным циститом выявлено статистически значимое увеличение латентности ответа симпатической порции полового нерва, которое составило 1,22 [1,09; 1,25] по сравнению с группой контроля 0,87 [0,73; 1,03] ( $p = 0,004$ ) (используемый метод: U-критерий Манна-Уитни). Показано, что увеличение латентности более 1,06 с может рассматриваться как диагностический маркер повреждения полового нерва. Морфометрический анализ биоптатов при интерстициальном цистите показал увеличение количества нервных окончаний в подэпителиальной соединительной ткани в 3-7 раз по сравнению с контролем; наибольшее скопление плазматических клеток отмечено в собственной пластинке слизистой оболочки в местах с истонченным/атрофированным уротелием и на границе с ним; тучные клетки обнаружены как в слизистой, так и в мышечной оболочках, однако в слизистой оболочке концентрация клеток превышала контроль в 5-8 раз, то время, как в мышечном слое тучных клеток содержалось в 1,2–1,8 раз больше. Выявленные изменения позволили скорректировать назначаемую терапию, а также подобрать дозировку лекарственных препаратов в зависимости от степени обнаруженных отклонений от нормы. Такая патогенетически обусловленная терапия способствовала купированию болевого синдрома, позволила снять спазм стенки мочевого пузыря, и со временем привела к значительному увеличению его емкости.

**Выводы.** Модифицированная методика регистрации ВКСП позволяет выявлять объективные нейрофизиологические изменения полового нерва при интерстициальном цистите, уточнить, правый или левый нерв поврежден в большей степени. Полученные результаты подтверждают перспективность использования методики в комплексной диагностике интерстициального цистита. Визуализации морфологических изменений тонких нервных волокон и локализации хронического

воспалительного процесса в стенке мочевого пузыря служит способом выявления патогенеза заболевания и назначения обоснованного лечения.

Работы выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 25-15-00530.

### **Литература**

1. Butrick CW, Howard FM, Sand PK (2010) J Womens Health (Larchmt). 19: 1185-1193.
2. Зайцев АВ, Шаров МН, Арефьева ОА, Пушкарь ДЮ (2018) Вестник урологии. 6: 26-35.
3. Clemens JQ, Erickson DR, Varela NP, Lai HH (2022) J Urol. 208: 34-42.

**КОМБИНИРОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ  
ЭВОЛЮЦИИ И СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИЗАЙНА  
БЕЛКОВ С ЗАДААННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

**Combined use of directed evolution and high-performance computational  
modeling for the design of proteins**

*Рязанцев М.Н.<sup>1\*</sup>, Метелкина Е.М.<sup>2,3</sup>, Осадчий И.Р.<sup>1,3</sup>, Николаев Д.М.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский академический университет РАН  
им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический  
университет, Санкт-Петербург, Россия

*\*e-mail: mikhail.n.ryazantsev@gmail.com, тел.: +7 967 5928941*

Для дизайна белков в настоящее время используются два основных класса методологических подходов. Стохастические экспериментальные стратегии, такие как направленная эволюция, позволяют получать новые функциональные варианты белков при минимальных требованиях к априорной структурной и механистической информации. Однако их эффективность ограничивается необходимостью работы в чрезвычайно высокоразмерном пространстве аминокислотных последовательностей и экспериментального перебора большого числа вариантов. Рациональные подходы, включая протоколы, основанные на суперкомпьютерном моделировании, опираются на детализированные представления о структуре и механизмах функционирования белков и обеспечивают более целенаправленный поиск. Однако они требуют сложных вычислительных моделей и значительного объема информации о белке. В данной работе рассматривается разработка и реализация комбинированной стратегии, обеспечивающей синергетическое использование стохастических и рациональных методов для сужения и структурирования пространства поиска и повышения эффективности дизайна. Будет представлен пример реализации такого подхода для дизайна флуоресцентных генетически кодируемых сенсоров мембранного потенциала клеток на основе археородопсина.<sup>1,2</sup>

Работа поддержана грантом РНФ No 23-73-00041. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова. Работа была выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSRM-2026-0027).

## Литература

1. Nikolaev DM, Metelkina EM, Domsikii NA, Osadchy IR, Mereshchenko AS, Bondarev SA, et al. (2025) Semirational Protein Engineering Yields Archaelhodopsin-3-Based Fluorescent Genetically Encoded Voltage Indicators with Enhanced Brightness and Red Shifted Absorption Bands. *Chem & Bio Engineering*, 2(10), 593-601
2. Nikolaev DM, Mironov VN, Metelkina EM, Shtyrov AA, Mereshchenko AS, Demidov NA, et al. (2024) Rational Design of Far-Red Archaelhodopsin-3-Based Fluorescent Genetically Encoded Voltage Indicators: from Elucidation of the Fluorescence Mechanism in Archers to Novel Red-Shifted Variants. *ACS Physical Chemistry Au*, 4(4), 347-362

## РОЛЬ КОНСЕРВАТИВНОГО СЕРИНА S84 В ИНГИБИРОВАНИИ ЗЕРКАЛЬНОГО РОДОПСИНА *SpaR* ИОНАМИ ЦИНКА

### The role of the conserved serine residue S84 in the inhibition of *SpaR* mirror rhodopsin by zinc ions

Сидоров Д.В.<sup>1\*</sup>, Бухалович С.М.<sup>1</sup>, Михайлов А.Э.<sup>1</sup>, Котенко Н.А.<sup>1</sup>,  
Богородский А.О.<sup>1</sup>, Бухдрюкер С.С.<sup>2</sup>, Рижиков Ю.Л.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>Московский центр перспективных исследований, Москва, Россия

<sup>3</sup>Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

\*e-mail: sidorvx@gmail.com, тел.: +7 929 6561023

Зеркальные родопсины (DTS/DTG родопсины) представляют собой особую группу микробных родопсинов, работающих как светозависимые протонные помпы эффективные в кислых pH. Ранее нами было показано в эксперименте на плоской бислойной липидной мембране, что зеркальный родопсин из *Sphingomonas paucimobilis* *SpaR* ингибируется миллимолярными концентрациями  $Zn^{2+}$ . Основываясь на кристаллической структуре *SpaR* разрешения 2.8 Å, было высказано предположение, что его чувствительность к цинку связана с гистидиновыми остатками H33 и H37 с цитоплазматической стороны помпы, формирующие сайт связывания  $Zn^{2+}$  [1].

В настоящей работе мы уточняем эту модель, анализируя роль консервативного аминокислотного остатка DTS мотива *SpaR* S84, который располагается вблизи предполагаемого сайта связывания  $Zn^{2+}$ , а именно – на противоположной от гистидинов спирали. Для проверки роли S84 были получены мутантные варианты *SpaR* S84D и S84E, которые были исследованы методом абсорбционной спектроскопии высокого временного разрешения. Измерения показали, что при увеличении pH от 2 до 7 в отсутствие цинка, а также при фиксированном pH 5 и увеличении концентрации  $Zn^{2+}$  распад М-состояния у мутантных версий замедлялся подобно дикому типу, что свидетельствует об ингибировании прокачки протонов. Однако относительная выраженность этих эффектов у мутантов несколько иная: в отличие от дикого типа замедление их фотоцикла наблюдалось уже в отсутствие цинка при pH 5. При этом предельные значения насыщения  $Zn^{2+}$ -зависимого замедления существенно не отличались от дикого типа. Это указывает на то, что замены аминокислоты в позиции 84 не разрушают  $Zn^{2+}$ -зависимую регуляцию и характерную pH-

чувствительность, но немного изменяют характер проявления этих эффектов.

В совокупности с анализом мутантов H33 и H37, эти данные позволяют уточнить молекулярный механизм ингибирования *SpaR* ионами цинка. Согласно нашей модели, H37 находится на пути захвата протона, и вместе с H33 оба являются ключевыми остатками для формирования сайта связывания иона  $Zn^{2+}$ . S84, в свою очередь, либо взаимодействует с цинком в этом сайте напрямую, либо находится в непосредственной близости к этому участку и влияет на его работу через локальную структуру водородных связей. Связывание цинка или повышение pH приводит к нарушению захвата и передачи протона в цитоплазматической части помпы, ингибируя распад М-состояния и прокачку.

Таким образом, наши результаты указывают на перспективность использования *SpaR* в качестве модельного белка для дальнейшей инженерии светоправляемых  $Zn^{2+}$ -зависимых инструментов для оптогенетических целей. С этой целью дикий тип *SpaR* был дополнительно исследован методом локальной фиксации потенциала в конфигурации целой клетки на человеческой нейробластомальной клеточной линии SH-SY5Y. Показано, что увеличение концентрации  $Zn^{2+}$  в пипеточном растворе приводило к ингибированию работы *SpaR*, что подтверждает сохранение  $Zn^{2+}$ -зависимой регуляции в клеточном контексте.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-03-2026-305, проект FSMG-2025-0003).

## Литература

1. Okhrimenko I. S. et al. Mirror proteorhodopsins // Communications chemistry. – 2023. – Т. 6. – №. 1. – С. 88.

**ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ  
ВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ОРГАНОВ МАЛОГО ТАЗА**

**Optical coherence tomography in the assessment of inflammatory processes in  
pelvic organs**

*Сироткина М.А.<sup>1\*</sup>, Потапов А.Л.<sup>1</sup>, Губарькова Е.В.<sup>1</sup>, Мотовилова Т.М.<sup>1</sup>,  
Кузнецова И.А.<sup>1,2</sup>, Советский А.А.<sup>3</sup>, Карабут М.М.<sup>1</sup>, Симакова В.Ю.<sup>1</sup>,  
Кузнецов С.С.<sup>2</sup>, Гладкова Н.Д.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>ГБУЗ НО «Нижегородская областная клиническая больница им. Н.А. Семашко», Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», Нижний Новгород, Россия

*\*e-mail: sirotkina\_m@mail.ru, тел.: +7 904 0606873*

**Актуальность.** Диагностика и лечение воспалительных заболеваний органов малого таза у женщин крайне актуальны из-за риска тяжелых осложнений – бесплодия, внематочной беременности и хронических болей. Хронический эндометрит – это длительное, вялотекущее воспаление внутреннего слоя матки (эндометрия), которое нарушает структуру слизистой и препятствует наступлению беременности. При этом типичным проявлением эндометриопатии в результате хронического воспаления является «тонкий эндометрий», характеризующийся глубокими вторичными структурно-функциональными нарушениями, что ассоциировано с повышенным риском неудач имплантации [1]. Склеротический лихен вульвы (СЛВ) – это хронический иммуноопосредованный дерматоз, сопровождается изнуряющими симптомами и рубцовыми изменениями вульвы, что значительно снижает качество жизни женщин [2]. Одним из перспективных метода для диагностики воспалительных заболеваний органов малого таза является оптическая когерентная томография (ОКТ) [3].

Цель исследования: установить возможность оценки морфологических особенностей воспалительных процессов при СЛВ и гипопластическом варианте хронического эндометрита с помощью ОКТ и численной обработки ОКТ-сигнала.

**Материалы и методы.** ОКТ исследование эндометрия проведено 12 пациентам (возрастом 25-45 лет) с клиническим диагнозом хронический эндометрит. ОКТ исследование вульвы проведено 38 пациентам (возрастом 52-69 лет) с клиническим диагнозом СЛВ. Для ОКТ исследования использована установка «ОКТ-1300У» (ООО «Биомедтех», Россия) с центральной длиной волны 1310 нм, разрешением – 15-20 мкм и глубиной сканирования ~ 1,2 мм. Количественная оценка рассеивающих свойств вульвы и эндометрия проведена путем вычисления коэффициента затухания ОКТ-сигнала с использованием подхода с разрешением по глубине [4]. Гистологическое исследование включало окрашивание гематоксилином-эозином и пикрофуксином по Ван-Гизону.

**Результаты.** Показано, что при гипопластическом варианте хронического эндометрита («тонкий эндометрий») ОКТ способна визуализировать фиброз эндометрия по высокому уровню ОКТ-сигнала. Вычисление коэффициента затухания ОКТ-сигнала позволило определить степень выраженности фиброза.

ОКТ позволяет надежно визуализировать такие морфологические проявления классического СЛВ как: фиброз дермы, склероз дермы, снижение толщины эпидермиса (атрофия) и утолщение гранулярного слоя. При этом тонкие, воспалительные и дистрофические проявления характерные для несклеротического СЛВ с лихеноидным дерматитом надежно визуализируются только с дополнительным расчетом коэффициента затухания ОКТ сигнала.

**Выводы.** Продемонстрирована возможность неинвазивной визуализации морфологических изменений, вызванных хроническим воспалительным процессом органов малого таза с помощью применения ОКТ.

Работы по исследованию эндометрия выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 26-15-00518.

## Литература

1. Оразов МР, Краснопольская КВ, Силантьева ЕС, Михалева ЛМ, Ершова ИЮ, Лагутина ЕВ, Семенов ПА (2020) Трудный пациент №8-9.
2. Lawton S, Littlewood S (2013) Journal of Lower Genital Tract Disease. 17: 117–124.
3. Kirillin M, Motovilova T, Shakhova N (2017) Journal of Biomedical Optics 22: 1–9.
4. Vermeer KA, Mo J, Weda JJA, Lemij HG, de Boer JF (2014) Biomed. Opt. Express 5: 322-337

**МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛА ПО МОРФОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИМ РАЗЛИЧИЯМ ЛИСТЬЕВ НА ПРИМЕРЕ ВИДОВ РОДА *TAXUS* L.**

**Sex identification methods by morphological and leaves physiological differences using the example of species of the genus *Taxus* L.**

Чурилина А.А.<sup>1\*</sup>, Латушкин В.В.<sup>2</sup>, Купцов С.В.<sup>1</sup>, Баранова Е.Н.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Ботанический сад Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Автономная некоммерческая организация Институт стратегий развития,  
Москва, Россия

\*e-mail: mazaeva.alex@ya.ru, тел.: +7 915 3370839

Определение пола двудомных растений представляет значительный интерес, как для фундаментальной ботаники, так и для практического растениеводства. В отличие от животных, механизмы половой дифференциации растений характеризуются большим разнообразием – у многих видов пол не связан с наличием морфологически различимых половых хромосом. Долгое время считалось, что растения разных полов не имеют существенных различий в строении вегетативных органов и достоверно определить пол возможно только после перехода к генеративному развитию.

Однако в последнее время было показано, что у *Taxus baccata* L. существуют различия между мужскими и женскими растениями, проявляющиеся в содержании фенольных соединений, углерода и крахмала, а также площади листьев (Rabska, 2022). Исследования полового диморфизма у древесных растений свидетельствуют о существовании связанных с полом особенностей даже в вегетативных органах, что открывает перспективы для ранней идентификации пола (Chen, 2024).

Изучение представителей рода *Taxus* L., одной из наиболее древних групп голосеменных растений представляет особый интерес. Тисы являются ценными декоративными и лекарственными растениями. Мы предполагаем, что даже у такого древнего рода голосеменных растений удастся идентифицировать надежные, связанные с полом морфологические и физиологические различия.

Для идентификации пола были отобраны взрослые растения *T. baccata* L., *T. brevifolia* Nutt., *T. cuspidata* Siebold et Zucc. ex Endl. находящиеся в генеративной фазе развития, пол которых был достоверно

установлен. Комплексный анализ, включал микроскопическое исследование абаксиальной и адаксиальной поверхностей листа, 3D моделирование побегов, а также анализ гиперспектральных характеристик отражения листовых пластинок. Предварительные результаты свидетельствуют о наличии устойчивых различий между мужскими и женскими растениями по ряду исследованных признаков. Данные позволяют с высокой степенью достоверности идентифицировать пол исследованных экземпляров на основании особенностей строения листа и спектральных характеристик.

Для разработки диагностических критериев требуется расширение выборки и включение в исследование гибридных форм рода *Taxus*.

Предложенные методы позволяют проводить идентификацию пола растений не только в генеративной фазе, но и в период вегетативного развития. Это открывает перспективы ранней диагностики пола у представителей рода *Taxus*, в том числе на ювенильной стадии.

## Литература

1. Rabska, M., Giertych, M. J., Nowak, K., Pers-Kamczyc, E., & Iszkuło, G. (2022). Consequences of the Reproductive Effort of dioecious *taxus baccata* l. females in a generative bud removal experiment—important role of nitrogen in female reproduction. *IJMS*, 23(22), 14225.
2. Chen, M., Lin, C., Sun, Y., Yang, R., Lu, X., Lou, W., Deng X., Zhao Y. & Liu, F. (2024). *Ginkgo biloba* sex identification methods using hyperspectral imaging and machine learning. *Plants*, 13(11), 1501.

**СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА И НАКОПЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ МЕТАБОЛИТОВ У ФЛОКСОВ (Phlox L.) ПРИ ПОРАЖЕНИИ МУЧНИСТОЙ РОСОЙ (ERYSIPHE CICHORACEARUM F. PHLOGIS)**

**Structural and Functional Reorganization of the Photosynthetic Apparatus and Accumulation of Secondary Metabolites in Phlox (Phlox L.) Infected with Powdery Mildew (Erysiphe cichoracearum f. phlogis)**

*Шелепова О.В.\**, Ткачева Е.В., Баранова Е.Н., Богоутдинова Л.Р.,  
Гусев А.В., Митрофанова И.В.

Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Москва, Россия

\*e-mail: shov\_gbsad@mail.ru, тел.: +7 985 2116775

Флоксы (*Phlox* L.) — популярные декоративные растения, однако их ценность существенно снижается из-за высокой поражаемости мучнистой росой (*Erysiphe cichoracearum* f. *phlogis*) (Mishina et al., 2002). В полевых исследованиях, проведенных в Главном ботаническом саду им. Н.В. Цицина РАН, выявлена неоднородность сортов флоксов по устойчивости к этому патогену. На основании процента поражения листовой поверхности сорта разделены на три группы: высоковосприимчивые (>50 %), среднеустойчивые (25–50 %) и высокоустойчивые (<20 %) (Аветисян, 2026).

Показано, что различия в устойчивости сортов обусловлены способностью к быстрой мобилизации фотосинтетического аппарата для компенсации повреждений, а также интенсивностью синтеза защитных вторичных метаболитов — фенольных и флавоноидных соединений. У высокоустойчивых сортов максимальная квантовая эффективность фотосистемы II (Fv/Fm) сохранялась в пределах физиологической нормы (0,631–0,803), тогда как у восприимчивых сортов этот показатель был значительно снижен (0,342–0,436), что указывает на глубокое фотоповреждение реакционных центров. Таким образом, у устойчивых растений наблюдаются кратковременные изменения работы ФСII, позволяющие избежать необратимого фотингибирования.

Кроме того, высокоустойчивые сорта характеризовались более высокими значениями нефотохимического тушения NPQ и его квантового выхода Y(NPQ), что свидетельствует об эффективной долговременной адаптации механизмов рассеивания избыточной световой энергии. У этих же сортов отмечена низкая текучесть мембран и повышенное содержание хлорофиллов и каротиноидов — структурные изменения пигментного

комплекса, обеспечивающие стабильность фотосинтеза в условиях стресса. Интересно, что содержание кверцетина, рутина и полифенолов оказалось максимальным у высоковосприимчивых сортов. Это указывает на стресс-индуцированный характер накопления данных вторичных метаболитов, который, однако, не способен компенсировать недостаточную фотозащиту и сохранить функциональность фотосинтетического аппарата.

Корреляционный анализ по Спирмену выявил сильные отрицательные связи процента поражения с  $Fv/Fm$  ( $\rho = -0,79$ ),  $ETR$  ( $\rho = -0,72$ ),  $Y(NPQ)$  ( $\rho = -0,73$ ), содержанием  $Chl\ a$  ( $\rho = -0,78$ ) и  $Chl\ b$  ( $\rho = -0,85$ ), а также сильные положительные связи с  $Y(NO)$  ( $\rho = +0,76$ ), кверцетином ( $\rho = +0,81$ ), рутином ( $\rho = +0,84$ ) и полифенолами ( $\rho = +0,79$ ). Метод главных компонент подтвердил чёткое разделение трёх групп сортов, при этом первая главная компонента объяснила 95 % дисперсии.

Выживание флоксов в условиях заражения мучнистой росой определяется не столько индукцией синтеза вторичных фенольных соединений, сколько комплексной перестройкой фотосинтетического аппарата: поддержанием квантовой эффективности ФСII, усилением нефотохимического тушения, стабильностью мембран и сохранностью пигментного фонда. Параметры  $Fv/Fm$ ,  $ETR$  и  $Y(NO)$  могут служить информативными биофизическими маркерами для оценки устойчивости в селекционной работе.

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

## Литература

1. Mishina, G. N., Talieva, M. N., Babosha, A. V., Serezhkina, G. V., & Andreev, L. N. (2002). Influence of phytohormones on development of conidial inoculum of causative agents of the phlox and barley powdery mildew. *Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 29(1), 46-52.
2. Аветисян Г.А. (2026) Сравнительная оценка поражаемости сортов флокса возбудителем мучнистой росы. *Journal of Agriculture and Environment*, № 2 (66). DOI: 10.60797/JAE.2026.66.6

**ФОТОБИОМОДУЛЯЦИЯ НА 1267 НМ ОБРАТИМО ПОВЫШАЕТ  
ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГЭБ И ИНДУЦИРУЕТ ЛАКТАТ-ЗАВИСИМУЮ  
M1-ПОЛЯРИЗАЦИЮ МАКРОФАГОВ В МОДЕЛИ ГЛИОБЛАСТОМЫ *IN VITRO***

**Photobiomodulation at 1267 nm reversibly increases BBB permeability and induces lactate-dependent M1 polarization of macrophages in an *in vitro* model of glioblastoma**

*Широков А.А.<sup>1,2\*</sup>, Моргун А.<sup>3</sup>, Хилажева Е.<sup>3</sup>, Бойцова Е.<sup>3</sup>, Блохина И.А.<sup>1</sup>,  
Федосов И.В.<sup>1</sup>, Семякина-Глушковская О.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, научный медицинский центр, лаборатория «Умный сон», Саратов, Россия

<sup>2</sup>Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов Саратовского научного центра Российской академии наук, Саратов, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт молекулярной медицины и патобиохимии, Красноярский государственный медицинский университет им. проф. Войно-Ясенецкого, Красноярск, Россия

*\*e-mail: shirokov\_a@ibppm.ru, тел.: +7 927 2770838*

Эффективность терапии глиобластомы ограничена гематоэнцефалическим барьером (ГЭБ) и иммуносупрессивным микроокружением опухоли, в котором доминируют протуморальные M2-макрофаги. В работе исследован потенциал лазерной фотобиомодуляции (1267 нм) для модуляции функции ГЭБ и активности макрофагов в модели глиомы *in vitro*. Использовали со-культуру ГЭБ на основе микрососудистых эндотелиальных клеток мозга крысы, астроцитов и нейронов, а также клетки глиомы C6 и перитонеальные макрофаги. Облучение лазером (35,7 Дж/см<sup>2</sup>) достоверно снижало экспрессию белков плотных контактов (CLDN5, ZO-1) и трансэндотелиальное электрическое сопротивление, что приводило к повышению проницаемости ГЭБ и усилению трансмиграции макрофагов. Одновременно лазерное воздействие индуцировало сдвиг макрофагов в сторону M1-подобного фенотипа: возрастало число клеток, экспрессирующих CD38 и HIF-1α, тогда как количество макрофагов с маркерами протуморальных клеток (VEGF, CD11b) не увеличивалось. В микроокружении повышалась концентрация лактата, а предварительно активированные макрофаги демонстрировали усиленную направленную миграцию в градиенте лактата. Полученные данные свидетельствуют, что фотобиостимуляция с

длиной волны 1267 нм обратимо повышает проницаемость ГЭБ, способствует инфильтрации макрофагов и их противоопухолевой активации, что открывает новую неинвазивную стратегию для усиления иммунотерапии глиобластомы.

**Ключевые слова:** гематоэнцефалический барьер; глиома; макрофаги; фотобимодуляция; лазер 1267 нм; лактат; миграция; плотные контакты.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 25-45-20004).

## Литература

1. Arvanitis CD, Ferraro GB, Jain RK. The blood–brain barrier and blood–tumour barrier in brain tumours and metastases. *Nat Rev Cancer*. 2020; 20(1):26-41.
2. Hambardzumyan D, Gutmann DH, Kettenmann H. The role of microglia and macrophages in glioma maintenance and progression. *Nat Neurosci*. 2016; 19(1):20-27.
3. Semyachkina-Glushkovskaya O, Postnov D, Kurths J, Ilison V. Photobiomodulation of lymphatic drainage and clearance: Perspective strategy for augmentation of meningeal lymphatic functions. *Biomed Opt Express*. 2020; 11(2):725-734.
4. Shirokov A, Navolokin N, Buharskaya A, Blokhina I, Terskov A, Tzoy M, Dubrovsky A, Fedosov I, Semyachkina-Glushkovskaya O. Mechanisms of Age Differences in the Effectiveness of Phototherapy of Glioblastoma. *Discovery Medicine*. 2025, 37(193): 335-347
5. Liberti MV, Locasale JW. The Warburg effect: How does it benefit cancer cells? *Trends Biochem Sci*. 2016; 41(3):211-218.
6. Chung H, Dai T, Sharma SK, et al. The nuts and bolts of low-level laser (light) therapy. *Ann Biomed Eng*. 2012; 40(2):516-533.

## **Секция 4. Фотофармакология для биомедицинского применения**

**ФОТОФАРМАКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ АКТИВАЦИИ И КОНТРОЛЯ ЗА ДЕЙСТВИЕМ ФОТОАКТИВНЫХ СУБСТАНЦИЙ В БИОМЕДИЦИНЕ**

**Photopharmacological approaches for the activation and control of the action of photoactive substances in biomedicine**

Грин М.А.

МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий, кафедра химии и технологии биологически активных соединений, медицинской и органической химии имени Н.А. Преображенского, Москва, Россия

*\*e-mail: michael\_grin@mail.ru, тел.: +7 916 3047105*

Фотофармакология – это область медицинской химии, направленная на разработку новых лекарств, действие которых можно контролировать с помощью света. В основе данного метода лежат молекулы-фотопереключатели, способные изменять свою форму под действием света. Подобные особенности приводят к существованию двух форм лекарств, которые обратимо переходят друг в друга при облучении. При этом лишь одна из двух форм способна действовать на молекулярную мишень, что и обеспечивает возможность контроля за лекарственным действием.

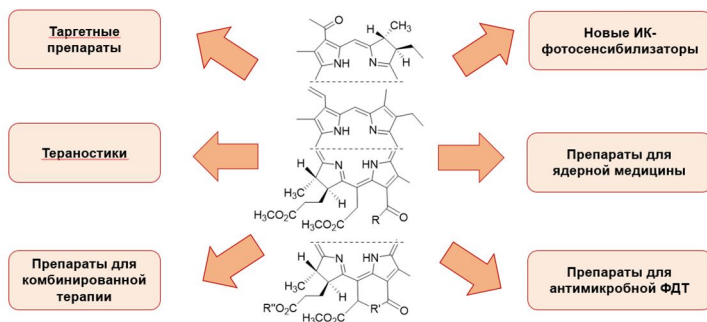
Необратимая фотофармакология включает фотодинамическую терапию (ФДТ), фотодеградируемые лекарства и лекарства на основе фоторасщепляемых линкеров.

Наиболее известными и используемыми в клинической практике фотосенсибилизаторами являются порфирины и их гидрированные аналоги – хлорины и бактериохлорины. В нашей научной группе вышеназванные макрогетероциклические соединения используются как платформа для создания фармсубстанций различного биомедицинского применения.

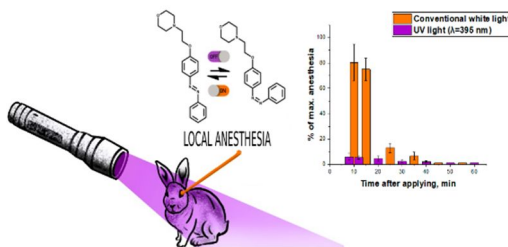
Другим направлением фотофармакологии является разработка обратимых фотоизомеризуемых соединений.

Блокаторы потенциал-зависимых натриевых ( $\text{Na}_v$ ) каналов широко используются в качестве местных анестетиков (МА) и антиаритмиков, при этом они обладают системной токсичностью. Для разработки безопасных местных анестетиков и антиаритмиков используются подходы фотофармакологии, позволяющие создавать агенты, биологическая активность которых регулируется с помощью света. Наиболее распространёнными органическими соединениями, на основе которых

создаются фотофармакологические агенты, являются азобензолы, способные к обратимой  $E \leftrightarrow Z$ -фотоизомеризации. Нами получены соединения, у которых биологической активностью обладает только один из двух изомеров, что позволяет активировать препарат локально, сводя к минимуму системное воздействие.



В РТУ МИРЭА получен управляемый светом местный анестетик этеркаин для использования в стоматологии. Проведены первичные биологические и токсикологические исследования.



## Литература

A. Noev, D. Likhobabina, E. Filonenko, M. Grin, et al. (2025) Structure–Property Relationships in Novel Series of Photoswitchable Local Anesthetic Ethercaine Derivatives: Emphasis on Biological and Photophysical Properties // Int. J. Mol. Sci., 2025. Vol.26, Article 3244

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ НАД(Ф)- И НАД(Ф)Н-ЗАВИСИМЫХ ДЕГИДРОГЕНАЗ  
В НЕЙТРОФИЛЬНЫХ ГРАНУЛОЦИТАХ КРОВИ  
У БОЛЬНЫХ ХЕЛИКОБЕКТЕРИОЗОМ**

**Use Of the Bioluminescent Method to Study Nad(P)- And Nad(P)H-Dependent  
Dehydrogenases in Neutrophilic Granulocytes of Patients with Helicobacter Illness**

*Коленчукова О.А.<sup>1</sup>, Степанова Л.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр  
СО РАН Научно-исследовательский институт медицинских проблем  
Севера, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

*\*e-mail: Kalina-chyikova@mail.ru, тел.: +7 962 0701710*

Функциональная активность клеток иммунной системы во многом определяется состоянием их энергетического и пластического метаболизма, в частности активностью НАД(Ф)- и НАД(Ф)Н-зависимых дегидрогеназ [1]. Для оценки активности данных ферментов перспективным является биолюминесцентный метод, позволяющий проводить высокочувствительный анализ в малом объеме биологического материала (до 10<sup>4</sup> клеток на измерение) [2]. В патогенезе хеликобактериоза ключевую роль которого играют нейтрофильные гранулоциты [4].

Цель исследования: Оценка активности НАД(Ф)Н-зависимых ферментов в нейтрофильных гранулоцитах крови у пациентов с эрозивно-язвенными заболеваниями, ассоциированными с *Helicobacter pylori* с применением биолюминесцентного метода.

Объекты исследования: Нейтрофильные гранулоциты крови, выделенные у пациентов (n= 44), включающие 22 пациента с эрозивно-язвенными заболеваниями, ассоциированными с *helicobacter pylori* в возрасте 11 до 18 лет (экспериментальная группа) и 22 относительно здоровых лиц аналогичного возраста (контрольная группа).

Методы исследования: Активности НАД(Ф)Н-зависимых дегидрогеназ проводили биолюминесцентным методом с использованием ферментативной системы НАД(Ф)Н:ФМН оксидоредуктаза-люцифераза.

Проведенное исследование выявило статистически значимые различия в активности ряда ключевых ферментов углеводного и энергетического обмена у пациентов с эрозивно-язвенными заболеваниями, ассоциированными с *Helicobacter pylori*, по сравнению со здоровыми лицами. Выявлено статистически значимое снижение

активности Г6ФДГ в группе больных по сравнению с контролем ( $P < 0.001$ ); значительное повышение активности Г3ФДГ в группе больных ( $P < 0.001$ ) Наиболее выраженные изменения зарегистрированы в активности ферментов цикла трикарбоновых кислот: МДГ ( $p < 0,001$ ) и НАДИЦДГ ( $p < 0,001$ ) у пациентов основной группы. Таким образом инфекция *H. Pylori* колонизирует слизистую оболочку и запускает каскад воспалительных реакций. Активированные нейтрофилы продуцируют АФК. Снижение активности Г6ФДГ ограничивает регенерацию глутатиона, делая клетки беззащитными перед АФК. АФК повреждают митохондриальные мембраны, снижается активность ферментов цикла Кребса (МДГ, НАДИЦДГ), падает продукция АТФ, митохондрии сами становятся источником АФК. Снижение активности НАДГДГ ограничивает синтез глутатиона, замыкая порочный круг. Энергодефицит, оксидативное повреждение и активация апоптоза приводят к нарушению целостности эпителия, формированию эрозий и язв, замедлению их заживления. Таким образом определение активности ферментов с помощью биолуминесцентных методов позволяет выявить патофизиологические механизмы взаимодействия микро и макроорганизма.

## Литература

1. Савченко А.А. Определение активности NAD(P)-зависимых дегидрогеназ в нейтрофильных гранулоцитах биолуминесцентным методом // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 2015. – Т. 159, № 5. – С. 656-660.
2. Datta R., Miskolci V., Gallego-Lopez G.M., et al. Single cell autofluorescence imaging reveals immediate metabolic shifts of neutrophils with activation across biological systems // Frontiers in Immunology. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1617993. – DOI: 10.3389/fimmu.2025.1617993.
3. Литвинова И.С., Коленчукова О.А. Функциональная и метаболическая активность нейтрофильных гранулоцитов крови у детей с эрозивно-язвенными поражениями желудка и двенадцатиперстной кишки при *helicobacter pylori*-инфекции // Медицинская иммунология. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 923-926. – DOI: 10.15789/1563-0625-FAM-2870.

**ХЕМИЛОМИНЕСЦЕНТНОЕ И БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
СЛЮНЫ СТУДЕНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УМСТВЕННОЙ НАГРУЗКИ**

**Chemiluminescence and bioluminescence study of students' saliva to assess their  
mental stress**

*Кравчук В.Ю.<sup>1\*</sup>, Коленчукова О.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Сибирский федеральный университет»,  
Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук» –  
Научно-исследовательский институт медицинских проблем Севера,  
Красноярск, Россия

*\*e-mail: v.kravchuk99@mail.ru, тел.: +7 963 2637892*

**Введение.** Субъективность традиционных методов оценки и неприменимость сложных биохимических исследований для скрининга физиологического состояния студентов в учебном процессе обуславливают интерес к исследованиям слюны. Её состав отражает системный метаболический, иммунный и эндокринный статус и чувствителен к изменениям нейроэндокринной, иммунной и вегетативной регуляции [1].

Для оценки стресс-индуцированных сдвигов перспективны биолюминесцентные и хемилюминесцентные методы, чья динамика характеризует стрессовое реагирование, адаптационное напряжение и физиологические изменения при умственной работе. Связь антиоксидантной активности слюны с системным окислительным статусом обуславливает её применение как комплексного маркера многоуровневых реакций на когнитивную нагрузку.

**Цель.** Оценка диагностической значимости хемилюминесцентных, биолюминесцентных показателей слюны в качестве маркеров функционального состояния организма студентов при умственной нагрузке.

**Материалы и методы.** Для проведения эксперимента была отобрана группа из 176 студентов второго курса КрасГМУ (от 17 до 20 лет, мужского и женского пола). При исследовании слюны использовали надосадочную жидкость. Исследования проводили в два этапа. Первый – на обычных занятиях и второй – в период сессии. Активность

антиоксидантов в слюне оценивали по методу  $H_2O_2$ -люминол-зависимой хемилюминесценции. Хемилюминесцентное исследование проводили с использованием планшетного люминометра TriStarLB 941. Биолюминесцентное тестирование проводили с использованием комплекта реактивов, содержащих лиофилизированные препараты высокоочищенных ферментов (лаборатория нанобиотехнологии и биолюминесценции Института биофизики СО РАН).

**Результаты.** Установлено достоверное снижение хемилюминесцентной активности слюны в период сессии: начальная интенсивность свечения снизилась в 1,8 раза ( $p < 0,001$ ), амплитуда – в 4,5 раза ( $p < 0,001$ ), светосумма – в 3,7 раза ( $p < 0,001$ ). Максимальная интенсивность свечения и время выхода на максимум достоверно не изменились. При этом выявлено повышение остаточного свечения биолюминесценции в 2,3 раза ( $p < 0,001$ ) слюны во втором этапе исследования.

**Выводы.** При умственной нагрузке регистрируются специфические изменения слюны: падение амплитудных и интегральных показателей хемилюминесценции (свидетельство истощения окислительного резерва и включения компенсаторных антиоксидантных механизмов) в сочетании с ростом остаточного свечения. Данные показатели могут использоваться как неинвазивные маркеры адаптационного напряжения для оценки функционального резерва студентов в период сессии и обоснования индивидуальных профилактических мероприятий.

## Литература

1. Кмить Г. В., Рублева Л. В., Ермакова И. В. Характер краткосрочной адаптации сердечно-сосудистой и эндокринной систем организма младших школьников с разными типами кровообращения. Новые исследования. 2020; 2: 30–36.

**ФОТОФАРМАКОЛОГИЧЕСКИЕ АГЕНТЫ НА ОСНОВЕ АЗОБЕНЗОЛОВ И АЗОГЕТАРЕНОВ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ СВЕТОМ АНЕСТЕЗИИ**

**Azobenzene- and azoheteroarene-based photopharmacological agents for light-controlled local anesthesia**

Ноев А.Н.<sup>1,2\*</sup>, Лихобабина Д.А.<sup>1</sup>, Горпищенко В.А.<sup>1</sup>, Чуркин М.С.<sup>1,2</sup>,  
Кан А.С.<sup>1</sup>, Грин М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА-Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup>МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии»  
МЗ РФ, Москва, Россия

\*e-mail: [aleksey-noev@yandex.ru](mailto:aleksey-noev@yandex.ru), тел.: +7 985 7754497

Несмотря на широкое применение блокаторов потенциал-зависимых натриевых каналов ( $\text{Na}_v$ ) в роли местных анестетиков и антиаритмических средств, их использование ограничено недостаточной избирательностью и связанными с этим побочными эффектами. Один из подходов к решению данной проблемы заключается в создании фоточувствительных молекул, активность которых можно обратимо регулировать светом. Ранее нами был предложен этеркаин – фотопереключаемый блокатор  $\text{Na}_v$ -каналов, демонстрирующий управляемое светом местноанестезирующее действие *in vivo* [1]. Дальнейшие исследования были направлены на оптимизацию его физико-химических и биологических параметров, а также на выявление закономерностей между особенностями строения и его физико-химическими свойствами, а также величиной фармакологической активности.

В рамках данной работы был получен ряд аналогов этеркаина, различающихся расположением алкоксизаместителей в азобензольном фрагменте, природой линкерного фрагмента, строением терминального амина и наличием гетероциклического кольца вместо одного из ароматических колец [2]. Установлено, что производные с *N*-метилпиразольным фрагментом превосходят исходное соединение по водорастворимости и ряду фотофизических характеристик, однако проявляют меньшую эффективность в модели поверхностной анестезии *in vivo*. Близкий профиль изменений наблюдается и при замене одного из фенильных колец азобензола на тиазольный цикл; при этом также уменьшается время релаксации *Z*-изомера в *E*-форму. Напротив, введение фрагментов *N,N*-диэтиламина или *N*-метилпиперазина вместо морфолинового цикла сопровождается усилением

местноанестезирующего действия при облучении, но одновременно приводит к ослаблению фотомодуляции эффекта.

В совокупности полученные данные могут использоваться для направленной разработки светочувствительных блокаторов  $\text{Na}_v$ -каналов с требуемыми характеристиками.

## Литература

1. Noev A. et al. A novel photoswitchable azobenzene-containing local anesthetic ethercaine with light-controlled biological activity in vivo. *Int. J. Mol. Sci.*, 2022, 23(10), 5352.
2. Noev A. et al. Structure–property relationships in novel series of photoswitchable local anesthetic ethercaine derivatives: emphasis on biological and photophysical properties. *Int. J. Mol. Sci.*, 2025, 26(7), 3244.

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ФОТОФАРМАКОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ХЛОРИНОВ**

**Rational approaches to the development of photopharmacological drugs based on natural chlorins**

Островерхов П.В.<sup>1\*</sup>, Плотникова Е.А.<sup>1</sup>, Демина А.И.<sup>1</sup>, Медведев Д.Ю.<sup>1</sup>,  
Боржиская Е.О.<sup>1</sup>, Дурнев Д.А.<sup>1</sup>, Говоров Н.Д.<sup>1</sup>,  
Безбородова О.А.<sup>2</sup>, Грин М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Москва, Россия

\*e-mail: [ostroverhov@mirea.ru](mailto:ostroverhov@mirea.ru), тел.: +7 985 9727069

Фотофармакология – это область медицинской химии, направленная на разработку новых лекарств, действие которых можно контролировать с помощью света. Фотодинамическую терапию (ФДТ) и разработку фотосенсибилизаторов можно рассматривать как одно из направлений фотофармакологии. Соединения хлоринового ряда активно используются в ФДТ, но только в качестве фотосенсибилизаторов. Однако, природные хлорины могут быть использованы в качестве платформы для создания фотоактивируемых препаратов широкого спектра действия. При этом, благодаря интенсивному поглощению хлоринов в ближней ИК-области спектра, что соответствует окну проницаемости ткани, осуществляется более эффективное поглощение света, что расширяет границы использования фотофармакологии.

В рамках данной работы получены и исследованы различные конъюгаты природных хлоринов с противоопухолевыми препаратами. Структуры конъюгатов можно разделить на три составляющих: 1) фотоактивное хлориновое ядро, 2) линкер, содержащий чувствительный фрагмент и 3) препарат цитостатик. Варьирование всех трех компонентов предлагаемых систем, позволяет добиться наибольшей противоопухолевой активности в отношении опухолей различных нозологий. Полученные конъюгаты также изучены нами в различных биологических тест системах *in vitro* и *in vivo*. Показано увеличение цитотоксичности конъюгатов хлорин-препарат в отношении опухолевых клеток, а также подтверждена возможность управляемой активации цитотоксического действия.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSFZ-2025-0020).

**ДИЗАЙН И СИНТЕЗ АФК-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КОНЬЮГАТОВ  
ДОКСОРУБИЦИНА С ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ СЫВОРОТОЧНЫМ АЛЬБУМИНОМ**

**Design and synthesis of ROS-sensitive conjugates of doxorubicin with human serum albumin**

*Пухова А.С.\*; Соломатина П.В., Островерхов П.В., Кирин Н.С., Грин М.А.*

МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*\*e-mail: pukhova-1996@bk.ru, тел.: +7 963 0275266*

Разработка селективных систем доставки цитостатиков является одной из ключевых задач современной химиотерапии онкологических заболеваний, поскольку системная токсичность многих химиопрепаратов, в том числе антрациклиновых антибиотиков, в частности доксорубицина (DOX), существенно ограничивает их терапевтическое применение в клинической практике [1]. Перспективным подходом к решению этой проблемы является использование человеческого сывороточного альбумина (HSA) в качестве транспортного вектора. Благодаря способности HSA преимущественно накапливаться в опухолевой ткани и хорошо изученному строению, данный белок является эффективным носителем для доставки противоопухолевых агентов [2]. Развитием данного подхода для доставки лекарств стало создание пролекарства на основе HSA. При этом, АФК-чувствительные системы доставки, использующие высокий уровень АФК в опухолевых клетках как триггер для высвобождения цитостатиков, остаются малоизученными [3]. В связи с этим целью настоящей работы является дизайн и синтез АФК-чувствительного производного доксорубицина, конъюгированного с человеческим сывороточным альбумином, для направленной химиотерапии, что позволит создать новый прототип пролекарства с улучшенным профилем селективности.

В рамках настоящего исследования осуществлен дизайн и синтез тиокеталь-содержащего производного доксорубицина. Строение синтезированного соединения было подтверждено с использованием комплекса физико-химических методов анализа, включая ЯМР-спектроскопию и масс-спектрометрию. В ходе работы также была экспериментально исследована реакция расщепления тиокетального фрагмента под действием АФК, генерируемых при облучении фотосенсибилизатора. Также полученное соединение было ковалентно связано с HSA. Полученный конъюгат DOX-тиокеталь-HSA представляет

собой перспективную платформу для таргетной химиотерапии, потенциально обеспечивающую селективное высвобождение доксорубина в опухолевых клетках с повышенным уровнем АФК.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSFZ-2025-0020).

## Литература

1. Liu, Yang, et al. "Improved targeting and safety of doxorubicin through a novel albumin binding prodrug approach." *ACS omega* 9.1 (2023): 977-987.
2. Kratz, Felix. "Albumin as a drug carrier: design of prodrugs, drug conjugates and nanoparticles." *Journal of controlled release* 132.3 (2008): 171-183.
3. Jafari, Mina, et al. "Modified peroxamide-based reactive oxygen species (ROS)-responsive doxorubicin prodrugs." *Bioorganic Chemistry* 127 (2022): 105990.

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ХЛОРИНОВ ДЛЯ ФОТОИНАКТИВАЦИИ ПАТОГЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ**

**Development of new photosensitizers based on natural chlorins for photoinactivation of pathogenic microorganisms**

*Суворов Н.В.<sup>1\*</sup>, Шагабаева М.А.<sup>1</sup>, Минаков Д.А.<sup>1</sup>, Усачев М.Н.<sup>1</sup>,  
Щелкова В.В.<sup>2</sup>, Румянцева В.Д.<sup>1</sup>, Васильев Ю.Л.<sup>1,3</sup>, Грин М.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>РТУ МИРЭА, Москва, Россия

<sup>2</sup>РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва, Россия

<sup>3</sup>Первый МГМУ им. И.М. Сеченова (Сеченовский Университет),  
Москва, Россия

*\*e-mail: suvorov.nv@gmail.com, тел.: +7 915 7563731*

Множественная устойчивость микроорганизмов к антибиотикам является одним из основных рисков для безопасности и здоровьесбережения населения. Развитие резистентности бактерий к уже имеющимся препаратам и дефицит структур, которые потенциально могли бы лечь в основу новых антибиотиков, поставили на повестку дня поиск новых способов борьбы с антибиотикорезистентными возбудителями инфекций. Одним из таких инновационных способов является антимикробная фотодинамическая терапия, которая эффективна в отношении антибиотикорезистентных штаммов патогенов. На сегодняшний день синтезировано множество фотосенсибилизаторов для антимикробной ФДТ, как исходя из природных и синтетических тетрапиррольных соединений, так и на основе других классов красителей. Особого внимания заслуживают фотодинамические агенты на основе хлорофилла А. Производные природных хлоринов, в отличие от своих синтетических аналогов, обладают низкой темновой токсичностью и легко выводятся из организма с образованием безвредных метаболитов. На сегодняшний день, ряд хлоринов активно применяется в противоопухолевой ФДТ, однако их использование в антимикробной ФДТ ограничено. Нами были предложены подходы, позволяющие существенно повысить эффективность фотосенсибилизаторов на основе природного хлорофилла в отношении патогенных бактерий. Данные модификации включают в себя введение положительно-заряженных групп на периферию макроцикла, включение сидерофорных фрагментов в состав хлорина, создание комплексов с различными металлами, а также получение конъюгатов хлоринов с антибиотиками.

Работа была выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSFZ-2024-0013).

**НОВЫЕ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ  
МЕЗО-АРИЛПОРФИРИНОВ ДЛЯ ФДТ**

**New photosensitizers based on meso-arylporphyrins for PDT**

*Шапошников А.А. \*, Жданова К.А., Брагина Н.А.*

МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*\*e-mail: artemsh03@mail.ru, тел.: +7 985 4840844*

Для диагностики и лечения онкологических заболеваний в настоящее время активно используется фотодинамическая терапия (ФДТ), основанная на действии трех компонентов: фотосенсибилизатора (ФС), света и кислорода. Вместе они инициируют фотохимическую реакцию, в результате которой образуются активные формы кислорода, в том числе синглетный кислород ( $^1\text{O}_2$ ), индуцирующий клеточную гибель. Противоопухолевый эффект ФДТ обусловлен тремя взаимосвязанными механизмами: прямым цитотоксическим воздействием на опухолевые клетки, повреждением сосудистой системы опухоли и индукцией мощной воспалительной реакции, которая может привести к развитию системного иммунитета [1].

Перспективным направлением исследований является разработка ФС на основе тетрапиррольных макроциклов, обладающих поглощением в красной и ближней инфракрасной области. Такие спектральные характеристики позволяют достичь требуемой глубины воздействия светом, что критически важно для эффективности ФДТ.

Основной целью данной работы является разработка порфиринов АЗВ типа с аминогруппой в качестве базовой платформы для синтеза различных производных. Такой подход реализуется через ковалентное присоединение к аминогруппе хелатирующих агентов (терпиридинового, бис(имино)аценафтонового и др. фрагментов), способных прочно связывать ионы тяжелых металлов ( $\text{Ru}^{2+}$ ,  $\text{Pd}^{2+}$ ,  $\text{Ir}^{3+}$ ,  $\text{Pt}^{2+}$ ) вне плоскости порфиринового кольца. Такая комплексная структура позволяет эффективно использовать фототерапевтическое окно, гарантируя глубокое проникновение возбуждающего излучения в биологические ткани, и усиливает фотокаталитическую активность. В рамках настоящей работы был синтезирован ряд несимметрично замещенных аминопорфиринов АЗВ типа для дальнейшей модификации и хелатирования тяжелых металлов.

Работа поддержана грантом РНФ (проект №22-73-10176-П).

## **Литература**

1. Agostinis, Patrizia, et al. "Photodynamic therapy of cancer: an update." *CA: a cancer journal for clinicians* 61.4 (2011): 250-281.

## **Секция 5. Фоторецепция и трансдукция**

## БАКТЕРИОРУБЕРИН КАК СТРУКТУРНЫЙ КОФАКТОР ОЛИГОМЕРИЗАЦИИ АРХЕОРОДОПСИНА-3

### **Bacterioruberin as a structural cofactor of archaeorhodopsin-3 oligomerization**

Василенко Л.М.<sup>1</sup>, Дронова Е.А.<sup>1\*</sup>, Михайлов А.Э.<sup>1</sup>, Котенко Н.А.<sup>1</sup>,  
Бухалович С.М.<sup>1</sup>, Шишкин А.Ю.<sup>1</sup>, Бухдрюкер С.С.<sup>2</sup>, Рижиков Ю.Л.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>Московский центр перспективных исследований, Москва, Россия

<sup>3</sup>Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

\*e-mail: [dronova.ea@phystech.edu](mailto:dronova.ea@phystech.edu), тел.: +7 915 4829602

Археородопсин-3 (AR3) – светозависимая протонная помпа из галофильной археи *Halorubrum sodomense*, образующая тримеры в нативных бордовых мембранах. В таких мембранах AR3 сосуществует с C50-каротиноидом бактериоруберином, однако связь пигмента с олигомерным состоянием белка остается недостаточно охарактеризованной [1]. Для родственных ретиналь-связывающих белков показано, что бактериоруберин может располагаться между протомерами в тримере и стабилизировать белок-каротиноидный комплекс [2-4].

В данной работе мы исследовали сольюбилизацию AR3 из нативных бордовых мембран с использованием двух детергентов: мягкого неионного DDM и анионного лаурилсаркозината (LS). Для образцов, сольюбилизированных в DDM, варьировали концентрацию NaCl в диапазоне от 0 до 3 М; сольюбилизацию в LS проводили при 150 мМ NaCl. Все образцы были подготовлены по единой схеме: ночная сольюбилизация в 20 мМ MES, pH 5,7, последующее ультрацентрифугирование и анализ растворимой фракции. Состав и олигомерное состояние белка оценивали с помощью аналитической SEC-HPLC хроматографии, совмещенной с UV-VIS спектрофотометрией.

Эффективность сольюбилизации AR3 в DDM существенно зависела от концентрации соли: максимальное количество белка переходило в растворимую фракцию в отсутствие NaCl, тогда как при 3 М NaCl выход был существенно снижен. При этом увеличение ионной силы сопровождалось изменением олигомерного профиля: при низкой концентрации соли преобладала мономерная форма, тогда как при 3 М NaCl растворимая фракция была представлена преимущественно тримером. Спектральный анализ хроматографических пиков показал, что бактериоруберин преимущественно ассоциирован с олигомерными

фракциями, тогда как мономерный AR3 практически не содержит каротиноида. При солюбилизации в LS наблюдался мономерный пик без признаков связанного бактериоруберина.

Полученные данные указывают на функциональную связь между бактериоруберином и тримерной организацией AR3 и позволяют рассматривать этот каротиноид как возможный структурный кофактор, стабилизирующий нативную упаковку белка в мембранах. Зависимость олигомерного состояния AR3 от концентрации NaCl особенно важна с учетом высокосолевого среды обитания *H. sodomense*: при условиях, более близких к физиологически релевантной высокой ионной силе, солюбилизация становится менее эффективной, но сопровождается преимущественным сохранением бактериоруберин-связанной тримерной формы белка.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-24-00851.

## Литература

1. Bada Juarez J.F. et al. Nat. Commun. 2021. 12:629.
2. Yoshimura K., Kouyama T. J. Mol. Biol. 2008. 375:1267–1281.
3. Sasaki T. et al. Biochemistry. 2012. 51:2785–2794.
4. Chan S.K. et al. PLoS ONE. 2014. 9:e108362.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАБИРИНТА-ТРАНСФОМЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ ОПТОГЕНЕТИЧЕСКОМ ПРОТЕЗИРОВАНИИ ГРЫЗУНОВ**

**Transformer Maze for the visual function assess in optogenetic treatment in rodents**

*Велигура В.И.<sup>1</sup>, Мешалкина Д.А.<sup>1</sup>, Морина И.Ю.,<sup>1</sup>  
Фирсов М.Л.<sup>1</sup>, Филатова Е.В.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова  
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Department of Life Sciences, Ben-Gurion University of the Negev,  
Be'er Sheva, Israel

*\*e-mail: asioflammeus203@gmail.com, тел.: +7 999 2396407*

**Введение.** Оптигенетическое протезирование сетчатки имеет огромный потенциал для лечения слепоты у людей с дегенерацией клеток фоторецепторного слоя. На сегодняшний день актуально как определить наиболее эффективные конструкции на животной модели заболевания, так и оценить зрительные функции на поведенческом уровне.

Цель данного исследования – подбор оптимального поведенческого теста для определения сформированности зрительных образов и степени восстановления зрения.

**Методы.** Мы использовали лабиринт-трансформер для зонирования пространства и создания отсеков с разным уровнем освещенности. Это задание является вариантом черно-белого ящика. Однако, в отличие от него, у животного есть выбор между темной и светлой областью в любой точке пространства. Внутри лабиринта-трансформера строился крест. В одном случае животные исследовали пространство при одинаковом освещении, в другом периферия была темной, а центр светлым, а в третьем, наоборот, периферия была светлой, а центр темным. В этих исследованиях использовались взрослые мыши с сохранным зрением C57BL/6 (n=28). Контрольные животные получали инъекции PBS. У двух экспериментальных групп в результате интравитреального введения туникамицина повреждалась сетчатка (туникамицин вызывает массовую гибель фоторецепторов). Первая экспериментальная группа ослепших животных получала оптигенетическую терапию плазмидой, содержащей родопсин. Вторая группа не получала лечение. Для оценки функциональности сетчатки использовали регистрацию электроретинограммы.

**Результаты и обсуждение.** Контрольные животные проводили время в центре и на периферии лабиринта в одинаковой пропорции при одинаковом освещении всех частей лабиринта. В случае с неоднородным освещением они проводили значительно больше времени в темной области независимо от геометрии. Обе экспериментальные группы проводили больше времени на периферии, независимо от освещения. Однако животные, получавшие оптогенетическую терапию, проводили больше времени в центре, чем животные без терапии. Можно предположить, что слепые животные полностью переключились на тактильную навигацию и исследовали окружающую среду только на основе периферийных ощущений. В то же время животные, получавшие оптогенетическую терапию, проявляли меньшее влечение к периферии, что может косвенно свидетельствовать о неполном переключении на тактильную ориентацию, что может быть следствием частично восстановленной активности зрительной системы.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания ИЭФБ РАН (программа № 075-00264-26-00).

**ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ КРАСНОГО И ДАЛЬНОГО КРАСНОГО СВЕТА НА РОСТОВЫЕ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ *LACTUCA SATIVA* L. ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА**

**Effect of red to far-red light ratio on growth and photosynthetic parameters of *Lactuca sativa* L. under different light intensities**

*Елизаров Д.О. \*, Худякова А.Ю., Креславский В.Д.*

Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук»,  
Пушино, Россия

\*e-mail: danilka.elizarov.97@mail.ru, тел.: +7 915 2832718

Соотношение красного и дальнего красного света (КС:ДКС) является одним из ключевых световых сигналов, регулирующих фотоморфогенез и рост растений. Сигнал воспринимается фитохромами и снижение КС:ДКС <1 запускает синдром избегания тени, что в естественных условиях обычно снижает продуктивность. В условиях светокультуры умеренное обогащение спектра ДКС может оптимизировать работу фотосистем за счет более эффективного поглощения фотосистемы 1, а также увеличения листовой поверхности, в итоге стимулировать накопление биомассы.

Цель работы заключалась в изучении влияния ДКС на рост, морфологию и фотосинтетическую активность салата (*Lactuca sativa* L.) выращенного при четырех уровнях интенсивности ФАР (60, 80, 180 и 240 мкмоль/м<sup>2</sup> с) и двух соотношениях КС:ДКС = 0.4 и 1.3.

Растения выращивали на 16 ч фотопериоде. Через 33 дня оценивали биомассу, морфологию, площадь листьев, скорость фотосинтеза (Pn) и параметры флуоресценции хлорофилла *a*.

При низких (60, 80 мкмоль/м<sup>2</sup> с) и умеренной (180 мкмоль/м<sup>2</sup> с) интенсивностях ФАР и при отношении КС:ДКС = 0.4 по сравнению с соотношением 1.3 наблюдалось достоверное увеличение биомассы растений, обусловленное ростом общей площади листьев. Скорость фотосинтеза в расчете на растение также была выше при КС:ДКС = 0.4. При высокой интенсивности света (240 мкмоль/м<sup>2</sup> с) положительный эффект КС:ДКС = 0.4 был менее выражен или отсутствовал, что может быть связано с насыщением при этой интенсивности фотосинтеза и накопления биомассы листьев.

Положительное действие дальнего красного света (КС:ДКС = 0.4) на рост салата, заключающееся в увеличении площади листьев и

повышении фотосинтеза в расчете на растение, эффективно при низких и средних интенсивностях ФАР (60–180 мкмоль/м<sup>2</sup> с) и нивелируется при высокой интенсивности (240 мкмоль/м<sup>2</sup> с).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-14-00037.

## Литература

1. Voitsekhojskaja, O. (2019) 'Phytochromes and other (photo)receptors of information in plants', *Russian Journal of Plant Physiology*, 66(3), pp. 351–364.
2. Cheng, M.C., Kathare, P.K., Paik, I. and Huq, E. (2021) 'Phytochrome signaling networks', *Annual Review of Plant Biology*, 72, pp. 217–244.
3. Zhen, S. and van Iersel, M.W. (2017) 'Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis', *Journal of Plant Physiology*, 209, pp. 115–122.
4. Jin, W., Urbina, J.L., Heuvelink, E. and Marcelis, L.F.M. (2021) 'Adding far-red to red-blue light-emitting diode light promotes yield of lettuce at different planting densities', *Frontiers in Plant Science*, 11, 609977.

**ДАЛЬНИЙ КРАСНЫЙ СВЕТ ИНДУЦИРУЕТ ВЗАИМОПРЕВРАЩЕНИЕ ДВУХ  
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ФИТОХРОМА А – phyA' и phyA''**

**Far-red light induces interconversion between the two distinct phytochrome A  
types – phyA' and phyA''**

*Коппель Л.А. \*, Синещев В.А.*

Кафедра Биохимии, Биологический ф-т, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*\*e-mail: koppel@mail.ru*

Фоторецептор растений фитохром А (phyA) уникален среди других фитохромов. Он активен в дальнекрасном (ДКС) диапазоне спектра и опосредует все три различных типа фотоответов – сверхнизко-, низко- и высокоэнергетического, VLFR, LFR и HIR, соответственно. Нами установлено, что это многообразие реакций обусловлено существованием в растениях двух структурно и физико-химически различных типа phyA – светостабильного и водорастворимого phyA' и относительно светостабильного и амфифильного phyA'' [1]. Первый отвечает за VLFR, второй опосредует HIR и, возможно, LFR.

В данной работе [2] мы продолжили исследовать природу и функции двух типов phyA, обратившись к бесхлорофильному мутанту ячменя Albino 9 (abo9), что позволило проводить флуоресцентные измерения phyA в предосвещенных проростках. Исследования состояния пулов phyA в них проводили с помощью флуоресцентной спектроскопии *in vivo* в полностью этиолированных проростках (в колеоптилях и первичных листьях) и после их освещения (дальним красным (ДКС), красным или белым светом). Процедура флуоресцентного определения состояния и содержания phyA в тканях описана в [3].

Мутант *Albino* характеризовался более высоким общим содержанием phyA и большей долей фотоактивного пула phyA' в этиолированных колеоптилях по сравнению с диким типом. В первичных листьях ячменя соотношение phyA'/phyA'' было таким же, как в колеоптилях, тогда как общее содержание существенно ниже. В мутантных колеоптилях phyA' проявлял большую фотостабильность по сравнению с phyA дикого типа, что указывает на возможное влияние мутации *albino* на протеолитическую деградацию phyA'.

Основным наблюдением было, однако, действие ДКС на состояние phyA – относительно быстрое (десятки минут) превращение под ДКС phyA' в phyA'', которое происходит, вероятно, по типу VLFR. Это

означает, что адаптация фитохромной системы к свету включает, помимо деградации phyA под действием света [4] и ингибирования его биосинтеза [5], обнаруженную в данной работе светоиндуцированную конверсию phyA' в phyA".

## Литература

1. Sineshchekov, V., & Koppel, L. (2022). Phytochrome A in plants comprises two structurally and functionally distinct populations—water-soluble phyA' and amphiphilic phyA". *Biophysical Reviews*, 14(4), 905-921.
2. Sineshchekov, V., & Koppel, L. (2025). Phytochrome A in etiolated wild-type and albino barley seedlings: a far-red pulse induces interconversion between the two physicochemically and functionally distinct phyA types—phyA' into phyA". *Functional Plant Biology*, 52(5), FP25012.
3. Sineshchekov V (1994) Two spectroscopically and photochemically distinguishable phytochromes in etiolated seedlings of monocots and dicots. *Photochemistry and Photobiology* 59(1), 77–85.
4. Clough RC, Vierstra RD (1997) Phytochrome degradation. *Plant, Cell & Environment* 20(6), 713–721.
5. Sineshchekov VA, Weller JL (2004) Two modes of the light-induced phytochrome A decline – with and without changes in the proportion of its isoforms (phyA' and phyA''): evidence from fluorescence investigations of mutant phyA-3D pea. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 75(3), 127–135.

**ВОДОРАСТВОРИМЫЕ ХЛОРОФИЛЛ-СВЯЗЫВАЮЩИЕ БЕЛКИ (WSCP):  
ФОТОГЕНЕРАЦИЯ АФК, ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ  
ДЛЯ БИОТЕХНОЛОГИИ**

*Неверов К.В.<sup>1,2</sup>, Обухов Ю.Н.<sup>1</sup>, Крицкий М.С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт биохимии им. А.Н. Баха, ФИЦ биотехнологии» РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: neverovk@mail.ru*

Белки семейства WSCP (water-soluble chlorophyll-binding proteins) являются уникальным семейством водорастворимых белков, содержащих хлорофилл (Хл). Эти белки – стресс-индуцированные, но их физиологическая роль в растениях до сих пор не выяснена. Их тетрамерные холоформы содержат четыре молекулы Хл, уложенные в виде двух симметричных димеров, структурно сходных со «специальной парой» фотохимически активных молекул Хл в РЦ фотосистем. При этом фотохимическая активность хромофорной группы холобелков WSCP по отношению к экзогенным донорам и акцепторам электрона ранее изучена не была.

В данной работе мы показали, что холобелки класса II (BoWSCP, Па, из *Brassica oleracea* и LvWSCP, Пб, из *Lepidium virginicum*) при облучении светом, поглощаемым только Хл ( $\lambda \geq 650$  нм), способны окислять биологически важные соединения — NADH и аскорбат (AscH). Эта реакция является кислородзависимой и ингибируется азидом натрия, тушителем синглетного кислорода ( $^1\text{O}_2$ ). Константа скорости фотоокисления AscH была в два раза выше, чем для NADH, что соответствует отношению констант тушения  $^1\text{O}_2$  для этих веществ. Анализ эффекта  $\text{NaN}_3$  подтвердил, что фотоокисление NADH и AscH опосредовано  $^1\text{O}_2$ , который генерируется возбужденным триплетным Хл в WSCP. Нами также показано, что холобелки BoWSCP и LvWSCP фотосенсибилизируют в присутствии кислорода восстановление цитохрома *c*. Этот фотопроцесс полностью подавлялся супероксиддисмутазой и ионами  $\text{Cu}^{2+}$ , что указывает на то, что медиатором переноса электрона на цитохром является супероксид анион-радикал ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ).

Данные абсорбционной и КД-спектроскопии показали, что димеры Хл в холобелках WSCP устойчивы к сильному свету ( $\lambda \geq 650$  нм,  $I=700$  мкЭ•м<sup>-2</sup>•с<sup>-1</sup>). При этом значения констант скорости фотодеградации

свободного Хл в 2% Тритоне X-100 в 15-20 раз превышали значения этих констант для Хл в WSCP.

Полученные данные по фотохимической активности и фотостабильности холоформ WSCP подтверждают гипотезу об их функции в растениях, согласно которой апобелки WSCP извлекают слабосвязанный Хл из мембран повреждённых стрессом хлоропластов и упаковывают его в холоформы, тем самым удаляя из фотосинтетических мембран активный Хл и предотвращая развитие фотоокислительного стресса.

Способность холобелков WSCP класса II к фотосенсибилизированной генерации

$^1\text{O}_2$ , а также фотостабильность структуры делает белки семейства WSCP перспективными для разработки на их основе новых фотосенсибилизаторов для фотодинамической терапии рака. Обнаруженная редокс-активность холоформ WSCP может стать основой для разработки оригинальных моделей пигмент-пигментных и пигмент-белковых взаимодействий в фотосинтетических комплексах фототрофных организмов.

## Литература

1. Neverov K. V., Obukhov Y. N., Kritsky M. S. (2025) *Russian J. of Plant Physiology*, 72, 252.

**ФОТОАКТИВИРУЕМЫЕ И ЦИНК-ЗАВИСИМЫЕ ПРОТОННЫЕ НАСОСЫ  
ПРОКАРИОТ**

**Photoactivated and zinc-dependent proton pumps of prokaryotes**

Охрименко И.С.\*, Zagryadskaya Y.A., Taldaev A.K.

Центр исследований молекулярных механизмов старения и возрастных заболеваний, Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный, Россия

\*e-mail: okhrimenko.is@mipt.ru, тел.: +7 495 4087974

Цинк играет принципиально важную роль в патогенезе возрастной болезни Альцгеймера, поскольку  $Zn^{2+}$  модулирует агрегацию A $\beta$  (Urban, 2021). В процессе старения дефицит  $Zn^{2+}$  приводит к изменениям баланса иммунных клеток (Rink, 2000; Haase, 2009), что с возрастом меняет иммунный ответ на бактериальные инфекции (Chen, 2014), так как  $Zn^{2+}$  непосредственно участвует в развитии и врождённого и адаптивного иммунного ответа (Rink, 2000; Cerasi, 2013). При этом, бактерии могут использовать  $Zn^{2+}$  при заражении (Gonzalez, 2019; Xia, 2021). Известно, что бактерии родов *Sphingomonas*, *Patonea* и *Pseudomonas* обладают сродством к цинку (Choudhury, 2001; Ye, 2020) и среди данных грамотрицательных микроорганизмов известны условно-патогенные. Также им принадлежат фотоактивируемые переносчики через мембрану протонов – протеородопсины, получившие название зеркальных. Так протеородопсин SpaR из микроорганизма *Sphingomonas paucimobilis* функционирует как протонный насос при низком pH, но не при нейтральном или высоком pH (Okhrimenko, 2023; Mowery, 1979) – в отличие от большинства известных родопсинов архей и эукариот (Friedrich, 2002). Было обнаружено ещё одно уникальное свойство SpaR – перенос протонов ингибируется ионами  $Zn^{2+}$ .

Работа поддержана Российским научным фондом 23-14-00160-П.

## Литература

- Cerasi M., Ammendola S., Battistoni A. Competition for zinc binding in the host-pathogen interaction //Frontiers in cellular and infection microbiology. – 2013. – Т. 3. – С. 108.
- Chen M. M. et al. Age-related differences in the neutrophil response to pulmonary pseudomonas infection //Experimental gerontology. – 2014. – Т. 54. – С. 42-46.
- Choudhury R., Srivastava S. Mechanism of zinc resistance in *Pseudomonas putida* strain S4 //World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2001. – Т. 17. – С. 149-153.
- Friedrich T. et al. Proteorhodopsin is a light-driven proton pump with variable vectoriality //Journal of molecular biology. – 2002. – Т. 321. – №. 5. – С. 821-838.
- Gonzalez M. R. et al. *Pseudomonas aeruginosa* zinc homeostasis: Key issues for an opportunistic pathogen //Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Regulatory Mechanisms. – 2019. – Т. 1862. – №. 7. – С. 722-733.
- Haase H., Rink L. The immune system and the impact of zinc during aging //Immunity & Ageing. – 2009. – Т. 6. – С. 1-17.
- Mowery P. C. et al. Effect of acid pH on the absorption spectra and photoreactions of bacteriorhodopsin //Biochemistry. – 1979. – Т. 18. – №. 19. – С. 4100-4107.
- Okhrimenko I. S. et al. Mirror proteorhodopsins //Communications chemistry. – 2023. – Т. 6. – №. 1. – С. 88.
- Rink L. Zinc and the immune system //Proceedings of the Nutrition Society. – 2000. – Т. 59. – №. 4. – С. 541-552.
- Urban A. S., Pavlov K. V., Kamynina A. V., Okhrimenko I. S., et al. Structural studies providing insights into production and conformational behavior of amyloid- $\beta$  peptide associated with Alzheimer's disease development //Molecules. – 2021. – Т. 26. – №. 10. – С. 2897.
- Xia P. et al. Zinc is an important inter-kingdom signal between the host and microbe //Veterinary Research. – 2021. – Т. 52. – №. 1. – С. 39.
- Ye Q. et al. Iron and zinc ions, potent weapons against multidrug-resistant bacteria //Applied Microbiology and Biotechnology. – 2020. – Т. 104. – С. 5213-5227.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В КАРОТИНОИД-РОДОПСИНОВЫХ КОМПЛЕКСАХ

### Energy transfer efficiency in carotenoid-rhodopsin complexes

*Павлов В.В., Павлов А.В., Федотов Д.А. \**

Научно-исследовательский центр молекулярных механизмов старения и возрастных заболеваний, Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*\*e-mail: fedotov.daniil.kras@gmail.com, тел.: +7 995 1208013*

Детальное понимание процессов переноса энергии в биологических макромолекулах является одним из наиболее перспективных направлений современной науки о жизни. Особое место в этом направлении занимает перенос энергии в фотоактивных белок-лигандных комплексах, таких как комплекс каротиноидного пигмента и бактериального родопсина, отвечающего за перенос ионов через клеточную мембрану. Уникальность такого комплекса заключается в слаженной работе сразу двух светособирающих пигментов - ретиналя и каротиноида, в котором каротиноид выполняет роль внешней светособирающей антенны и значительно расширяет диапазон поглощения световой энергии [1].

Несмотря на то, что каротиноид-родопсиновые комплексы (КРК) известны на протяжении более чем двух десятилетий, детальный механизм переноса энергии между каротиноидом и родопсином остается нераскрытым. Возможным ключом к пониманию фотохимических свойств КРК является структурные изменения, происходящие с родопсином при связывании с каротиноидным пигментом, а также при олигомеризации такого КРК. В настоящем исследовании мы оценили эффективность переноса энергии между каротиноидным и ретинальным пигментами, используя метод молекулярного моделирования. Анализ был проведен на основе известной структуры глеобактер родопсина (*Gloeobacter Rhodopsin*) в комплексе с каротиноидом салиниксантином [2,3] (PDB code: 6NWD). Мы также проанализировали набор ненативных каротиноидов и сравнили динамические характеристики (расстояние между пигментами, подвижность) и эффективность переноса энергии. Наши наблюдения указывают на структурное перестроение белка при связывании с каротиноидом, слабую специфичность связывания и эффективности переноса энергии в исследуемых каротиноид-родопсиновых комплексах.

Исследование было выполнено при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 25-74-00077 (<https://rscf.ru/project/25-74-00077/>).

Исследование было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение 075-03-2026-305, проект FSMG-2025-0003).

### Литература

1. Peng, H. Q., Niu, L. Y., Chen, Y. Z., Wu, L. Z., Tung, C. H., & Yang, Q. Z. (2015). Biological applications of supramolecular assemblies designed for excitation energy transfer. *Chemical reviews*, 115(15), 7502-7542.
2. Morizumi, T., Ou, W. L., Van Eps, N., Inoue, K., Kandori, H., Brown, L. S., & Ernst, O. P. (2019). X-ray crystallographic structure and oligomerization of Gloeobacter rhodopsin. *Scientific reports*, 9(1), 11283.
3. Imasheva, E. S., Balashov, S. P., Choi, A. R., Jung, K. H., & Lanyi, J. K. (2009). Reconstitution of Gloeobacter violaceus rhodopsin with a light-harvesting carotenoid antenna. *Biochemistry*, 48(46), 10948-10955.

## **ИЗУЧЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТОГЕНЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВИРУСНЫХ РОДОПСИНОВ 1-ГО ТИПА**

### **Study and optimization of viral rhodopsins 1**

*Петрова Е.А. \*, Бухалович С.М., Сударев В.В.*

Центр исследований молекулярных механизмов старения и возрастных заболеваний, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

*\*e-mail: petrova.ekaterina@phystech.edu, тел.: +7 915 1363790*

Родопсины встречаются во многих живых организмах, а также в геноме некоторых вирусов. Особый интерес представляют вирусные родопсины 1 типа, а именно гомологичные белки OLPVR1 и VirChR1, которые могут оказаться перспективными оптогенетическими инструментами [1]. Так в недавней работе [2] было показано, что OLPVR1 генерирует кальциевый ток из ЭПР. Считается, что кальциевые свойства вирусных родопсинов используются вирусами для управления фитопланктоном. Вирусы заражают одноклеточные водоросли и благодаря родопсинам получают возможность направлять протистов в области, богатые питательными веществами, необходимыми для размножения вирусов [3]. Такой контроль достигается путём свето-зависимого влияния родопсинов на кальциевый сигналинг клетки, например, через изменение направления вращения жгутика. Однако на данный момент не имеется достаточного количества информации о внутриклеточной локализации вирусных родопсинов.

В данной работе проведено исследование внутриклеточной локализации белков VirChR1 и OLPVR1 на модельных клеточных линиях, а также изучена возможность генерации кальциевых токов этими белками. С трансфицированными клетками НЕК293Т мы провели эксперименты по определению внутриклеточной локализации с помощью метода конфокальной микроскопии и показали, что вирусные родопсины преимущественно локализуются в ЭПР. Используя генетически кодируемый флуоресцентный сенсор, мы наблюдали свето-зависимые кальциевые токи как для OLPVR1, так и для VirChR1. Для VirChR1 мы получили оптимизированную генетическую конструкцию с большей долей белка, локализованного на внешней клеточной мембране, и для неё получили свето-зависимые токи с помощью метода локальной фиксации потенциала (patch-clamp). Из полученных результатов следует, что VirChR1 и OLPVR1 локализуются преимущественно в ЭПР и обладают

возможностью генерировать свето-зависимые кальциевые токи. Для VirChR1 возможно создание конструкций со значительной долей белка, локализованного на внешней клеточной мембране. Таким образом, совместное применение VirChR1 и OLPVR1 может быть использовано для управления внутриклеточными кальциевыми сигналами и, в перспективе, привести к созданию новых оптогенетических инструментов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-24-00786).

### Литература

1. Zabelskii, Dmitrii, et al. "Viral rhodopsins 1 are an unique family of light-gated cation channels." *Nature communications* 11.1 (2020): 5707.
2. Eria-Oliveira, Ana-Sofia, et al. "Hijacking of internal calcium dynamics by intracellularly residing viral rhodopsins." *Nature Communications* 15.1 (2024): 65.
3. Yutin, Natalya, and Eugene V. Koonin. "Proteorhodopsin genes in giant viruses." *Biology direct* 7.1 (2012): 34.

**РАЦИОНАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН МИКРОБНЫХ РОДОПСИНОВ:  
ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРИМЕНЕНИЯ**

**Rational design of microbial rhodopsins: functional optimization and  
biotechnological applications**

Петровская Л.Е.<sup>1,2\*</sup>, Крюкова Е.А.<sup>1</sup>, Лукашев Е.П.<sup>3</sup>, Силецкий С.А.<sup>4</sup>,  
Максимов Е.Г.<sup>3</sup>, Охрименко И.С.<sup>2</sup>, Долгих Д.А.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН ГНЦ Институт биоорганической химии  
имени М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный,  
Московская обл., Россия

<sup>3</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова,  
Биологический факультет, Москва, Россия

<sup>4</sup>НИИ ФХБ им. А.Н. Белозерского, Московский государственный  
университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: [lpetr65@yahoo.com](mailto:lpetr65@yahoo.com)

Микробные родопсины – мембранные светочувствительные белки, широко распространённые у архей, бактерий и некоторых эукариотических микроорганизмов. Благодаря способности преобразовывать энергию света в ионный транспорт или сигнальные процессы, эти белки представляют значительный интерес как для фундаментальной науки, так и для прикладных исследований. Используя рациональный дизайн на основе структурно-функциональных данных и методы направленной эволюции, белковая инженерия позволяет получать микробные родопсины с улучшенными свойствами [1].

Объектами наших исследований являются хорошо изученные представители семейств протейродопсинов – ретинальный белок *Exiguobacterium sibiricum* (ESR) и ксантородопсинов – родопсины *Salinibacter ruber* (XR) и *Gloeobacter violaceus* (GR). Для ESR сконструирован ряд точечных мутантов, демонстрирующих изменённую кинетику оптических преобразований и различную эффективность транспорта протонов [2-6]. Установлено, что объединение с N-концевыми белками-партнерами CaflM и MBP обеспечивает единообразное встраивание ESR в протеолипосомы и, как следствие, высокую эффективность трансмембранного переноса протонов [7].

Оптимизация аминокислотной последовательности впервые обеспечила возможность экспрессии XR и его мутантных вариантов в

клетках бактерий, однако рекомбинантные белки обладали низкой стабильностью [8]. Для решения этой проблемы получена и исследована серия гибридных белков, содержащих замены фрагментов последовательности XR на гомологичные участки стабильного родопсина *Gloeobacter violaceus* (GR). В результате обнаружены оптимизированные варианты, которые демонстрируют повышенную стабильность, а также ускоренный фотоцикл и увеличенную эффективность транспорта протонов [9].

Работа проводится при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-14-00160-П.

### Литература

1. Kaneko A., et al. *Biophys. Rev.*, 2017, 9, 861-876.
2. Balashov S.P., et al. *J. Biol. Chem.*, 2013, 288, 21254-21265.
3. Balashov S.P., et al. *Biochemistry*, 2012, 51, 5748-5762.
4. Siletsky S.A., et al. *BBA-Bioenergetics*, 2019, 1860, 1-11.
5. Siletsky S.A., et al. *BBA-Bioenergetics*, 2021, 1862, 148328.
6. Petrovskaya L.E., et al. *J. Photochem. Photobiol. B*, 2022, 234, 112529.
7. Petrovskaya L.E., et al., *Int. J. Mol. Sci.*, 2023, 24, ijms24087369.
8. Petrovskaya L.E., et al., *Protein J.*, 2023, 42, 408-420.
9. Petrovskaya L.E., et al., *BBA-Bioenergetics*, 2025, 1866, 149547.

**СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАРОТИНОИД-СВЯЗЫВАЮЩЕГО  
РОДОПСИНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ pH**

**Structural Features of Carotenoid-Binding Rhodopsin at Different pH Values**

Поспелов В.А.<sup>1\*</sup>, Белоусов А.С.<sup>1</sup>, Максимов Е.Г.<sup>2</sup>, Петровская Л.Е.<sup>3</sup>,  
Бухдрукер С.С.<sup>1</sup>, Борщевский В.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр молекулярных механизмов старения и возрастных заболеваний, МФТИ, Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>Институт биохимии им. А.Н. Баха Федерального исследовательского центра биотехнологии Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт биоорганической химии им. Шемякина-Овчинникова Российской академии наук, Москва, Россия

*\*e-mail: pospелov.va@phystech.edu, тел.: +7 926 6565131*

Протеородопсины – разнообразное семейство светочувствительных семи спиральных трансмембранных белков, функционирующих как обратная протонная помпа [1]. Они используют энергию света для индуцирования изомеризации ретиналя – молекулы кофактора, ковалентно связанной с консервативным лизином на седьмой  $\alpha$ -спирали. Фоточикл протеородопсина существенно отличается от архейных и эукариотических протонных помп, а его скорость сильно зависит от значения pH среды [2]. Благодаря участию в фототрофном метаболизме морских микроорганизмов протеородопсины рассматриваются как значимый компонент энергетических процессов в океанических экосистемах. Их распространенность в океанических бактериях составляет порядка 50% [3].

Отдельное место в семействе протеородопсина занимают ксантородопсины, выделенные в отдельную группу в 2005 году [4]. Их ключевая особенность заключается в использовании двух хромофоров для поглощения света: ретиналя и дополнительного каротиноидного хромофора, ассоциированного с внешней частью белка.

В текущем исследовании была изучена структурная организация и pH-зависимое функционирование белка, относящегося к группе ксантородопсина. Для этого были получены структуры белка в пентамерном состоянии при кислом и функциональном значениях pH. Анализ полученных структур подтвердил участие His-Asp пары, выполняющей роль акцептора протона, в pH-зависимом механизме и позволил проследить влияние pH на локальную организацию функционально значимых участков белка. Кроме того, был изучен

характер межпротомерных взаимодействий и определены основные элементы, стабилизирующие олигомерную сборку. Также был обнаружен ранее не охарактеризованный N-концевой участок родопсина, положение которого указывает на его возможное участие в пути переноса протона во внеклеточную среду. Таким образом, полученные данные расширяют представления о механизме работы ксантородопсинов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-03-2026-305, проект FSMG-2024-0012).

### Литература

1. Gordeliy, Valentin, ed. *Rhodopsin*. Springer, 2022.
2. Bukhdruker, Sergey, et al. "Proteorhodopsin insights into the molecular mechanism of vectorial proton transport." *Science advances* 11.16 (2025): eadu5303.
3. Gomez-Consarnau, Laura, et al. "Proteorhodopsin phototrophy promotes survival of marine bacteria during starvation." *PLoS biology* 8.4 (2010): e1000358.
4. Balashov, Sergei P., et al. "Xanthorhodopsin: a proton pump with a light-harvesting carotenoid antenna." *Science* 309.5743 (2005): 2061-2064.

**СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МИКРОБНЫХ РОДОПСИНОВ В  
МЕМБРАНОМИМЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПО ДАННЫМ  
МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ**

**Structural organization of microbial rhodopsins in membrane-mimetic systems as revealed by small-angle scattering**

*Рижиков Ю.Л.<sup>1,2\*</sup>, Куikliна Д.Д.<sup>1</sup>, Сидоров Д.В.<sup>1</sup>, Шишкин А.Ю.<sup>1</sup>,  
Безручко И.О.<sup>1</sup>, Бухалович С.М.<sup>1</sup>, Дронова Е.А.<sup>1</sup>, Михайлов А.Э.<sup>1</sup>,  
Семёнов Ю.С.<sup>1</sup>, Иванов А.И.<sup>2</sup>, Куikliн А.И.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Центр исследований молекулярных механизмов старения и возрастных заболеваний, Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка,  
Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*\*e-mail: rizhikov@phystech.edu, тел.: +7 903 7270087*

Микробные родопсины – ретиналь-содержащие светочувствительные мембранные белки, обеспечивающие транспорт ионов, фоторецепцию и фототаксис, а также служащие основой для оптогенетики [1]. Для понимания их работы важны не только атомарные структуры, но и олигомерное состояние, мембранное окружение и организация комплексов. Однако для мембранных белков эти параметры не всегда корректно выводятся только из кристаллографии или крио-ЭМ: упаковка в кристалле, детергент и пробоподготовка могут менять наблюдаемую архитектуру. Поэтому малоугловое рентгеновское и нейтронное рассеяние (МУРР/МУРН) важны для анализа белков в растворе и мембраномиметических системах.

Для комплекса сенсорного родопсина II с трансдюсером NpSR<sub>II</sub>-NpNtr<sub>II</sub>, модельного фотосенсора двухкомпонентной системы фототаксиса, интеграция МУРР/МУРН с молекулярным моделированием показала зависимость олигомерного состояния от ионной силы: при низкой концентрации соли преобладают димеры, а при повышении солёности формируются тримеры димеров [2,3]. Полученная модель указывает на tripod-подобную организацию, где контакты между димерами реализуются преимущественно через цитоплазматические домены трансдюсеров [2].

Второе направление связано с транспортными микробными родопсинами в детергенте. Интерпретация МУРР-данных для таких объектов осложняется вкладом детергентного пояса и олигомерной

полидисперсностью [3]. Гибридное моделирование с учетом детергентного пояса, например в MEMPROT [4], и стехиометрические ограничения, получаемые методом МУРН с вариацией контраста, позволяют сузить пространство допустимых моделей белок-детергентных комплексов. Такой подход тестируется на DDM-солюбилизованных родопсинах, включая пентамерный натрий-транспортирующий родопсин KR2 [5].

Кроме того, МУРН используется для характеристики мембраномиметических систем, необходимых для функциональных исследований: азолектиновых липосом со встроенными протонными помпами MAR и MrP, везикул из пурпурных мембран бактериородопсина и мицелл детергентов. Эти данные позволяют оценивать целостность, однослойность и размеры липосом, геометрию везикул и параметры детергентного окружения, что важно для последующих  $\Delta pH$ - и BLM-экспериментов. Таким образом, малоугловое рассеяние связывает атомные модели, состояние белка в мембраномиметической среде и функциональные вопросы фоторецепции, транспорта и передачи сигнала.

Работа выполнена при поддержке Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и научно-исследовательской инфраструктуры Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-512).

## Литература

- [1] Ernst O.P. et al. Chem. Rev. 114 (2014). doi:10.1021/cr4003769.
- [2] Ryzhykau Y.L. et al. Sci. Rep. 11 (2021) 10774. doi:10.1038/s41598-021-89613-6.
- [3] Ryzhykau Y.L. et al. Acta Cryst. D77 (2021). doi:10.1107/S2059798321009542.
- [4] Pérez J., Koutsioubas A. Acta Cryst. D71 (2015). doi:10.1107/S1399004714016678.
- [5] Kovalev K. et al. Sci. Adv. 5 (2019) eaav2671. doi:10.1126/sciadv.aav2671.

**МЕХАНИЗМ ТУШЕНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ПУЧКООБРАЗНЫХ  
ФИКОБИЛИСОМ *GLOEOBACTER VIOLACEUS***

**Fluorescence quenching mechanism of the bundle-shaped phycobilisome from  
*Gloeobacter violaceus***

*Слонимский Ю.Б.<sup>1\*</sup>, Бурцева А.Д.<sup>1,2</sup>, Баймухаметов Т.Н.<sup>3</sup>,  
Синетова М.А.<sup>4</sup>, Гвоздев Д.А.<sup>5</sup>, Цораев Г.В.<sup>5</sup>, Черепанов Д.А.<sup>6,7</sup>,  
Максимов Е.Г.<sup>5</sup>, Попов В.О.<sup>1</sup>, Бойко К.М.<sup>1</sup>, Случанко Н.Н.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы  
биотехнологии» Российской академии наук,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный  
исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской  
академии наук, Москва, Россия

<sup>5</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>6</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики  
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>7</sup>Научно-исследовательский институт физико-химической биологии  
имени А.Н. Белозерского, Москва, Россия

*\*e-mail: santloxan@bk.ru, тел.: +7 916 0786721*

Фотозащита цианобактерий включает нефотохимическое тушение флуоресценции (NPQ), благодаря которому избыток энергии света, поглощенной фикобилисомами (ФБС) рассеивается в виде тепла. Основные участники этого процесса – фотоактивный Оранжевый Каротиноидный белок (OCP) и его белок-партнер FRP (от англ. Fluorescence Recovery Protein), обращающий действие OCP на ФБС. OCP под воздействием интенсивного синего света переходит в свою фотоактивированную форму, которая взаимодействует с ФБС. Это взаимодействие приводит к сближению молекул фикоцианибина и каротиноида в пространстве и переносу поглощенной энергии света на каротиноид с последующим рассеиванием энергии в виде тепла. Однако для лишенной тилакоидов цианобактерии рода *Gloeobacter*, ФБС которого имеет уникальную пучкообразную архитектуру, механизмы NPQ оставались неизученными. Кроме того, в геноме *G. violaceus* закодированы

два гомолога ОСР ( $\alpha$  и  $\beta$ ) и было неясно являются ли оба белка функциональными. Нами впервые было показано, что оба белка способны взаимодействовать с ФБС в двух независимых сайтах, а их эффект на флуоресценцию ФБС аддитивен. Как ОСР $\alpha$ , так и ОСР $\beta$  нечувствительны к действию белка FRP, что, по-видимому, является следствием раннего разделения (2 млрд. лет назад) *Gloeobacteria* от основного филогенетического древа цианобактерий еще до возникновения системы регуляции белком FRP. Полученная нами структура пучкообразной ФБС *Gloeobacter violaceus* с разрешением до 2.72 Å, а также физико-химическая характеристика гомологов ОСР $\alpha$  и ОСР $\beta$  позволяют выявить эволюционные предпосылки, обусловившие сосуществование двух гомологов ОСР. В отличие от ОСР $\alpha$ , эффективно связывающегося с основным сайтом ФБС на центральном цилиндре В (как и ОСР других цианобактерий), ОСР $\beta$  взаимодействует с уникальным сайтом на латеральных цилиндрах С/С', характерных для пентацилиндрического ядра ФБС. Оба сайта пространственно удалены, что обеспечивает аддитивный эффект тушения флуоресценции белками ОСР. Таким образом, дупликация гена *osr* и появление второго сайта связывания в ходе эволюции позволила *Gloeobacter* тонко регулировать функционирование ФБС с пучкообразной морфологией.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ.

## Литература

1. Burtseva A.D. et al. Science Advances. 2025. Vol. 11. eadz6774.
2. Dominguez-Martin M.A. et al. Nature. 2022. Vol. 609. P. 835-845.
3. Slonimskiy Y.B. et al. Int. J. Biol. Macromol. 2022. Vol. 222. P. 167-180.

**ВЛИЯНИЕ СВЕТА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ У *ARABIDOPSIS* И ТОМАТА ПРИ ДЕФИЦИТЕ ФИТОХРОМОВ И КРИПТОХРОМОВ**

**Effect of high-intensity light on photosynthetic processes in *Arabidopsis* and tomato with phytochrome and cryptochrome deficiency**

*Строкина В.В.*\*, Креславский В.Д., Худякова А.Ю., Кособрюхов А.А.

Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук»,  
Пушино, Россия

\*e-mail: *strokina.93@mail.ru*

В течение дня интенсивность фотосинтетически активной радиации может возрастать, и растения вынуждены балансировать между поглощением света и защитой фотосинтетического аппарата (ФА) от избытка энергии. Фотосистема II и система фиксации CO<sub>2</sub> — одни из наиболее чувствительных к свету высокой интенсивности (СВИ) систем [1]. СВИ, особенно в сочетании с другими стрессами, вызывает ингибирование фотосинтеза. Однако защитные механизмы растений при действии СВИ изучены недостаточно [2]. Поскольку свет воспринимается фоторецепторами (криптохромами и фитохромами), важно понять их роль в работе ФА. Фитохромы — датчики красного (КС) и дальнего красного света (ДКС), тогда как криптохромы — УФ-А и синего света (СС). Для выявления роли фоторецепторов в защите ФА использовали мутанты с дефицитом ключевых фоторецепторов ФхА, ФхВ и криптохрома 1 (Kp1) [3].

Обнаружена заметная разница в устойчивости к кратковременному СВИ у арабидопсиса, томата и их мутантов с дефицитом фоторецепторов. Сильнейшее снижение фотосинтетической активности отмечено у мутантов арабидопсиса с дефицитом ФхВ и Kp1, а также у тройных мутантов томата (ФхАФхВ1ФхВ2 и ФхАФхВ1Kp1). Среди одинарных мутантов томата фотосинтетическая активность была наиболее чувствительна к СВИ у мутанта с дефицитом Kp1. У чувствительных к СВИ мутантов наблюдались низкая активность антиоксидантных ферментов и высокий уровень ТБКРп (маркер окислительного стресса). Также содержание УФ-поглощающих пигментов, антоцианов и каротиноидов у таких мутантов было снижено. Все это согласуется с высокой чувствительностью этих мутантов к СВИ.

Таким образом, ФхВ1 у томата и Кр1, а также ФхВ у арабидопсиса играют ключевую роль в адаптации растений к СВИ, что согласуется с низким антиоксидантным потенциалом при их дефиците. Дополнительные эксперименты показали: не только дефицит фоторецепторов, но и спектральный состав света, в частности соотношение КС к ДКС, в период развития растений критически влияет на их реакцию при действии СВИ. Снижение отношения КС/ДКС приводило к падению устойчивости фотосинтетического аппарата томата к СВИ, что указывает на необходимость контроля доли дальнего красного света при выращивании. Эти данные углубляют понимание интеграции сигналов разных спектральных диапазонов при стрессе и могут помочь в разработке оптимизированных световых режимов для защищённого грунта.

Работа поддержана финансовыми средствами гранта РФФИ №25-14-00037.

### **Литература**

1. Voitsekhovskaja, O. (2019) 'Phytochromes and other (photo)receptors of information in plants', *Russian Journal of Plant Physiology*, 66(3), pp. 351–364.
2. Cheng, M.C., Kathare, P.K., Paik, I. and Huq, E. (2021) 'Phytochrome signaling networks', *Annual Review of Plant Biology*, 72, pp. 217–244.
3. Zhen, S. and van Iersel, M.W. (2017) 'Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis', *Journal of Plant Physiology*, 209, pp. 115–122.

**Секция 6. Фотосинтез и биоэлектрогенез у  
растений и микроорганизмов**

**ИММОБИЛИЗАЦИЯ ФРАГМЕНТОВ МЕМБРАНЫ, ОБОГАЩЁННЫХ ФС2, НА МАКРОПОРИСТОМ  $\text{TiO}_2$  С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕИОННОГО ДЕТЕРГЕНТА: ПОВЫШЕНИЕ БЕЗМЕДИАТОРНОЙ АКТИВНОСТИ**

**Immobilization of Membrane Fragments Enriched with Photosystem II on Macroporous  $\text{TiO}_2$  Using a Nonionic Detergent: Enhancement of Mediator-Free Activity**

Доронин И.А.<sup>1\*</sup>, Бушнев С.О.<sup>2</sup>, Ежова А.А.<sup>3</sup>, Пыхова Е.С.<sup>1</sup>, Трунькин И.Н.<sup>2</sup>,  
Василов Р.Г.<sup>2</sup>, Цыганков А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук»,  
Пушкино, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия

\*e-mail: iadoronin@yandex.ru, тел.: +7 926 1256680

Фотосистему 2 (ФС2) и её синтетические аналоги рассматривают как компонент систем искусственного фотосинтеза для производства зелёного водорода. Эффективная иммобилизация комплекса является важнейшим этапом создания подобных систем. За годы исследований предлагались различные способы иммобилизации как ФС2, так и мембранных фрагментов<sup>1</sup>. Для безмедиаторного переноса обычно используется изолированные ФС2. Однако их стабильность значительно ниже, чем у мембранных фрагментов. Мы предлагаем простой способ иммобилизации препарата мембранных фрагментов, обогащённых ФС2 на макропористой подложке из широкозонного полупроводника  $\text{TiO}_2$  на поверхности оксида олова, допированного фтором (FTO) и показываем, что использование детергента при иммобилизации позволяет значительно увеличить безмедиаторный фототок.

Мы добавили неионный детергент n-додецил- $\beta$ -D-мальтозид (ДДМ) на последнем этапе перед нанесением на электрод, что позволило достигнуть проникновения частиц, содержащих ФС2 внутрь пор ( $d = 1$  мкм) электрода. В качестве контроля также был нанесен препарат без добавления ДДМ. Электрод, на который наносили препарат без добавления ДДМ включал большее количество ФС2, что связано с

агрегацией мембранных фрагментов. Оба электрода высушивали и промывали буфером, чтобы убрать несвязавшуюся фракцию.

Электроды были исследованы в трехэлектродной ячейке при медиаторном и безмедиаторном электронном переносе (МЭП и БЭП) при потенциале 0,65 В vs СВЭ (стандартный водородный электрод). При МЭП ДДМ+ образец показал значительно большую активность 3 мкА см<sup>-2</sup>, в то время как ДДМ- показывал активность на уровне контроля без нанесенного препарата ФС2. Это говорит о том, что доля оптимально ориентированного комплекса выше. При этом добавление медиатора 2,6-дихлор-р-бензохинона (DCBQ) приводило к значительному увеличению плотности тока в образце ДДМ-, в сравнении с изменениями в образцах ДДМ+. Это свидетельствует о том, что ДДМ препятствовал образованию мультислоев<sup>2</sup>. При этом фотокинетика электродов значительно различалась для медиаторной и безмедиаторной системы. Так, при включении света в отсутствие медиатора плотность тока увеличивалась скачкообразно, а затем убывала, в то время, как при медиаторном переносе ток нарастал в течении большего периода времени. Электрохимическая кинетика ФС2 на макропористых электродах соответствуют данным мезопористых электродов<sup>2</sup>, за исключением более высокой плотности тока.

Таким образом ДДМ способствует проникновению частиц с ФС2 внутрь пор, уменьшает образование многослойных агрегатов и, несмотря на меньшую суммарную загрузку белка, увеличивает долю функционально ориентированных комплексов, что проявляется в повышенной плотности фототока при прямом переносе электронов.

## Литература

1. Doronin IA, Bushnev SO, Vasilov RG, Tsygankov AA. Photosystem II for photoelectrochemical hydrogen production. *Biophys Rev* 2023;15:907–20. <https://doi.org/10.1007/s12551-023-01139-5>.
2. Brinkert K, Le Formal F, Li X, Durrant J, William Rutherford A, Fantuzzi A. Photocurrents from photosystem II in a metal oxide hybrid system: Electron transfer pathways. *Biochim Biophys Acta - Bioenerg* 2016;1857:1497–505. <https://doi.org/10.1016/j.bbabo.2016.03.004>.

**РОЛЬ НИЗКОАМПЛИТУДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В РЕГУЛЯЦИИ ФОТОСИНТЕЗА И УСТОЙЧИВОСТИ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ПОЛИВА И ПОЧВЕННОЙ ЗАСУХИ**

**The role of low-amplitude electrical signals in the regulation of photosynthesis and resistance of wheat under conditions of irrigation and soil drought**

*Юдина Л.М. \*, Попова А.Ю., Абашева К.Р., Сухов В.С.*

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Россия

*\*e-mail: lyubovsurova@mail.ru, тел.: +7 915 9571127*

Растения, находясь в постоянно меняющихся условиях, сталкиваются с разнообразными внешними факторами, требующими быстрой адаптации. При этом, обеспечить скоординированную регуляцию физиологических процессов помогают сигнальные системы. Известно, что экстренную сигнальную связь и системный ответ у растений обеспечивают электрические сигналы с большой амплитудой. Последние исследования показали: аналогичную функцию могут выполнять и низкоамплитудные электрические сигналы, возникающие при воздействии умеренных стрессоров. Цель работы – изучить, могут ли такие сигналы регулировать фотосинтез, ключевой процесс в накоплении биомассы, и приводить к адаптации растения.

Эксперименты проводили на пшенице, выращенной при контролируемом поливе, для моделирования почвенной засухи полив прекращали. Электрические сигналы вызывали умеренным нагревом и освещением кончика листа, в отдельной серии экспериментов использовали локальное повышение давления, либо обработку АБК. Регистрацию электрической активности выполняли экстраклеточно с помощью AgCl-макроэлектродов. Параметры фотосинтеза – нефотохимическое тушение флуоресценции (NPQ) и квантовый выход фотосистемы II (YII) измеряли с помощью РАМ-флуориметра Open FluorCam.

Локальная стимуляция нагревом и освещением вызывала у пшеницы электрические сигналы двух типов – деполяризационные и гиперполяризационные, с амплитудой около 10-15 мВ. Их распространение приводило к росту NPQ и снижению YII вблизи зоны стимуляции, по мере отдаления от зоны, эффект ослабевал и исчезал. При

умеренной засухе распространение сигнала усиливало ответ фотосинтеза: NPQ заметно возрастал на расстояниях 5, 7 и 9 см от зоны стимуляции, а YII снижался на расстояниях 5 и 7 см. В то же время сильная засуха подавляла как электрические сигналы, так и фотосинтетические ответы.

Показано, что локальное повышение давления также влияло на характер электрических сигналов и вызывало ответы фотосинтеза: умеренное повышение давления приводило к распространению гиперполяризационных сигналов, а сильное – к появлению деполяризационных. Это вызывало достоверные изменения NPQ и YII, что подтверждает гидравлический механизм распространения низкоамплитудных электрических сигналов.

Применение предварительной обработки АБК повышало достоверность изменений параметров фотосинтеза, на фоне засухи показаны наиболее выраженные изменения, что подчёркивает роль АБК в модуляции фотосинтетической активности растений при стрессовых воздействиях.

Наконец, было выявлено, что индукция электрических сигналов, а также обработка АБК с последующим развитием фотосинтетических ответов на фоне умеренной засухи способствовали более высокому итоговому уровню биомассы к моменту завершения засухи. Таким образом, выявленные сигналы положительно влияют на устойчивость пшеницы при адаптации к почвенной засухе.

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

## **Секция 7. Биолюминесценция и фотоника флуоресцентных белков**

## ХИМЕРНЫЕ $\text{Ca}^{2+}$ -РЕГУЛИРУЕМЫЕ ФОТОПРОТЕИНЫ НА ОСНОВЕ ОБЕЛИНА

### Chimeric $\text{Ca}^{2+}$ -regulated photoproteins based on obelin

Буракова Л.П. \*, Артемова С.А., Маликова Н.П., Высоцкий Е.С.

Институт биофизики СО РАН, обособленное подразделение ФИЦ КНЦ  
СО РАН, Красноярск, Россия

\*e-mail: burakoval@mail.ru, тел.: +7 923 2894558

$\text{Ca}^{2+}$ -регулируемые фотопротеины отвечают за свечение гидромедуз, а в рекомбинантном виде используются как индикаторы внутриклеточного  $\text{Ca}^{2+}$  и в качестве маркерных молекул *in vitro* [1]. К настоящему времени клонированы обелины из *Obelia longissima* и *Obelia geniculata*, акворин из *Aequorea victoria*, клитин из *Clytia gregaria* и митрокомин из *Mitrocoma cellularia*. Гомология их аминокислотных последовательностей составляет 58-75%, при этом они отличаются по ряду свойств [2]. Все они содержат по 4 EF-hand домена, 3 из которых функциональны, а II EF-hand утратил способность связывать  $\text{Ca}^{2+}$  и наиболее разнообразен по аминокислотному составу. Однако эта область содержит 3 консервативных аминокислотных остатка, участвующих в координации субстрата и в формировании эмиттера биолюминесцентной реакции. Полная замена II EF-hand в обелине на клитиновый позволила повысить эффективность работы этого белка в эукариотических клетках [3], поэтому можно рассматривать такой подход для создания фотопротеинов с улучшенными свойствами. Данная работа включает получение и характеризацию подобного химерного белка на основе обелина с использованием другой изоформы клитина (OLCGII), а также варианты с заменой II EF-hand в обелине на таковой митрокомины (OLMCII) и на I EF-hand обелина (OLII→I). Химеры с гомологичными заменами эффективно формировали фотопротеиновый комплекс, тогда как для OLII→I выход активного белка составлял не более 10%, что, вероятно, связано с позициями консервативных аминокислотных остатков. Во всех случаях отмечалось снижение константы спада биолюминесцентной реакции и сдвиг максимума биолюминесценции в голубую область спектра. В случае OLCGII наблюдалось повышение квантового выхода на 5% по сравнению с обелином дикого типа, тогда как у OLMCII он составлял 85%, а у OLII→I – менее 0,1%. OLCGII и OLII→I по термостабильности не отличались от дикого обелина, тогда как у OLMCII она несколько снижена. Обе активные химеры продемонстрировали небольшое снижение чувствительности к  $\text{Ca}^{2+}$  и

сужение ее диапазона. Таким образом, при замене II EF-hand в обелине на гомологичные участки других фотопротеинов гидромедуз функциональность сохраняется, что нельзя сказать о негомологичной замене. В случае перестановок необходимо учитывать сохранность как положения консервативных аминокислот, так и размер полипептидной цепи. При соблюдении этих условий можно использовать данный способ для создания фотопротеинов с новыми свойствами, что открывает возможности как для пополнения пула маркерных молекул, так и для углубления знаний о роли отдельных доменов в светящихся белках.

Работа была поддержана фондом РФ (грант № 24-44-00009)

### Литература

1. Sharifian S., Homaei A., Hemmati R., B Luwor R., Khajeh K. The emerging use of bioluminescence in medical research // Biomed Pharmacother. 2018. V. 101. P. 74-86.
2. Malikova N.P. et al. Characterization of hydromedusan  $\text{Ca}^{2+}$ -regulated photoproteins as a tool for measurement of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration // Analytical and bioanalytical chemistry. 2014. V. 406. P. 5715-5726.
3. Bovolenta S. et al. Development of a  $\text{Ca}^{2+}$ -activated photoprotein, Photina®, and its application to High-Throughput Screening // J Biomol Screen. 2007. V. 12. P. 694-704.

**ХИМЕРНЫЕ ФОТОПРОТЕИНЫ НА ОСНОВЕ АКВОРИНА С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

**Chimeric photoproteins based on aequorin with improved properties**

*Буракова Л.П.<sup>1,2</sup>, Коновалова О.В.<sup>1,2\*</sup>, Наташин П.В.<sup>1</sup>, Маликова Н.П.<sup>1</sup>,  
Иванова А.И.<sup>3</sup>, Поспелов В.А.<sup>3</sup>, Шевцов М.Б.<sup>3</sup>, Борщевский В.И.<sup>3</sup>,  
Высоцкий Е.С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт биофизики СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Московский центр передовых исследований, Москва, Россия

\*e-mail: okonovalova-bb20@stud.sfu-kras.ru, тел.: +7 983 4515767

Ca<sup>2+</sup>-регулируемые фотопротеины гидромедуз широко используются как индикаторы кальция *in vivo*, а также как маркерные молекулы *in vitro*. Их аминокислотные последовательности высокоомологичны, однако белки отличаются по ряду основных параметров, среди которых стабильность фотопротеинового комплекса, кинетика биолюминесценции, квантовый выход, чувствительность к ионам кальция и т.д. [1]. Эти особенности открывают возможность проводить замены целых доменов между фотопротеинами гидромедуз без нарушений структуры белка и потери его биолюминесцентных свойств. II EF-hand мотив гидромедуз не способен координировать двухвалентные ионы, а выполняет больше структурную и регуляторную роль. Так, в этом участке находятся аминокислоты, участвующие в координации субстрата, а также определяющие спектр излучения. Подобная замена целых Ca<sup>2+</sup>-связывающих доменов, доказала свою эффективность при создании высокоактивного белка Photina<sup>®</sup>, представляющего собой обелин со II EF-hand мотивом клитина [2].

В данной работе получены и охарактеризованы 4 варианта химерных фотопротеинов на основе акворина, в которых II EF-hand мотив заменен на соответствующие участки из митрокомина, обелина и клитина. Во всех случаях наблюдалось эффективное связывание субстрата, значительное замедление кинетики биолюминесцентной реакции, небольшое снижение чувствительности к Ca<sup>2+</sup>, а у химер с обелиновым или клитиновым доменом – сдвиг спектров биолюминесценции вправо. Как наиболее перспективный для практического применения можно рассматривать акворин со II EF-hand мотивом митрокомина с частичной заменой второй  $\alpha$ -спирали этого домена, продемонстрировавший высокий квантовый выход, а также повышение термостабильности

фотопротеинового комплекса почти на 5°C и замедление скорости спада интенсивности излучения в 20 раз по сравнению с акворином дикого типа. Для этой химеры была решена пространственная структура, которая показала высокую гомологию со структурой дикого акворина, однако небольшие изменения в положении боковых групп некоторых аминокислотных остатков могут объяснять различия в свойствах. Создание таких комбинированных молекул позволяет не только расширить понимание роли отдельных участков фотопротеинов в их функционировании, но и является шагом к рациональному дизайну белков и расширению пула маркерных молекул с различными свойствами.

Работа была поддержана фондом РФ (грант № 24-44-00009).

### **Литература**

1. Malikova N.P. et al. Characterization of hydromedusan  $\text{Ca}^{2+}$ -regulated photoproteins as a tool for measurement of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration // Analytical and bioanalytical chemistry. 2014. V. 406. P. 5715-5726.
2. Bovolenta S. et al. Development of a  $\text{Ca}^{2+}$ -activated photoprotein, Photina®, and its application to High-Throughput Screening // J Biomol Screen. 2007. V. 12. P. 694-704.

**НАПРАВЛЕННЫЙ ПОИСК МУЛЬТИТАРГЕТНЫХ АНТИМИКРОБНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДАМИ *IN SILICO* И БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА**

**Directed Searching Multi-Target Antimicrobial Compounds by *in silico* and Bioluminescent Analysis Methods**

Васильев П.М.<sup>1\*</sup>, Ломакина Г.Ю.<sup>2</sup>, Голубева А.В.<sup>1</sup>, Васильева С.Д.<sup>2</sup>,  
Перфильев М.А.<sup>1</sup>, Кочетков А.Н.<sup>1</sup>, Угарова Н.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский государственный медицинский университет,  
Волгоград, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

\*e-mail: pvassiliev@mail.ru, тел.: +7 988 9673404

Поиск антимикробных веществ, действующих одновременно на несколько биомишеней, позволяет создавать лекарственные препараты, эффективные в отношении резистентных штаммов микроорганизмов. Такие соединения будут проявлять высокую антимикробную активность; одновременное появление во всех ингибируемых биомишенях резистентных мутаций является маловероятным; штаммы с множественными подобными мутациями будут менее жизнеспособными и менее вирулентными. Особую роль в поиске таких веществ играют методы *in silico*, позволяющие по структурной формуле оценивать комплексное воздействие молекул на совокупность релевантных биомишеней.

Биолюминесцентные тест-системы на основе про- и эукариотических клеток, продуцирующих термостабильную люциферазу светляков, являются весьма перспективными в связи с их высокой чувствительностью и быстротой.

Целью настоящего исследования является проведение *in silico* скрининга *E. coli* антимикробной активности новых мультитаргетных соединений с последующим экспериментальным тестированием перспективных веществ методом биолюминесцентного анализа.

С применением системы Microcosm BioS методом структурного сходства к эталонам [1] выполнен прогноз уровней таргетных активностей 71 нового соединения в отношении 105 белков-мишеней *E. coli*. Для каждой структуры был рассчитан средний индекс уровня активности *Ind*, отражающий совокупную мультитаргетную аффинность прогнозируемых соединений.

Для экспериментального тестирования отобрано 20 структурно-разнородных соединений – производных хиназолина, бензопентатиепина, адамантана, ди- и тритерпеноидов.

Антимикробная активность указанных соединений была исследована биолюминесцентным методом [2] на клетках *E. coli*, штамм *BL21 (DE3) CodonPlus*, экспрессирующих мутантную термостабильную люциферазу светляков *L. mingrelica*. Ночную культуру *E. coli*, разбавленную до концентрации  $2 \times 10^8$  КОЕ/мл средой LB, инкубировали при 37°C в аэрированных условиях в присутствии 55 мкг/мл анализируемого вещества. В процессе инкубации измеряли кинетику изменения люциферазы *Luc* внутри и вне клеток в процентах к контролю через 200 мин инкубации.

Коэффициент корреляции Гудмана-Краскела кластеризованных мультитаргетных индексов аффинности *Ind* и экспериментальных значений антимикробной активности *Luc* составил  $R_G=0.417$ , что соответствует  $p=0.0338$ .

Таким образом, показана эффективность совместного использования *in silico* метода структурного сходства к эталонам и *in vitro* биолюминесцентного метода в поиске мультитаргетных веществ с высокой *E. coli* антимикробной активностью.

Расчетная часть работы выполнена в рамках государственного задания Минздрава России № 23022400009-9. Экспериментальная часть работы выполнена в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова № 121041500039-8.

## Литература

1. Vasilyev PM, Luzina OA, Babkov DA, Appazova DT, Salakhutdinov NF, Spasov AA (2019) J Struct Chem 60(11):1827-1832.
2. Lomakina GY, Ugarova NN (2022) Biophys Rev 14(4):887-892.

## БЕЛОК СЕМЕЙСТВА FbFP В КОМПЛЕКСЕ С ЛЮМАЗИНОМ

### FbFP family protein in complex with lumazine

Кузнецова Е.А.\*, Афанасьев А.А., Николаев А.С., Натаров И.И.,  
Ремеева А.А., Гуцин И.Ю.

Центр исследования молекулярных механизмов старения и возрастных заболеваний, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный,  
Московская область, Россия

\*e-mail: [kuznetsova.ea@phystech.edu](mailto:kuznetsova.ea@phystech.edu), тел.: +7 925 5989611

Домены LOV (Light, Oxygen, Voltage) относятся к числу наиболее распространённых фоторецепторов синего света и нековалентно связывают флавины в качестве хромофоров. На их основе было разработано семейство флуоресцентных белков FbFP (flavin-based fluorescent proteins). Одним из наиболее стабильных представителей этого семейства является белок CagFbFP, созданный на основе LOV-домена термофильной бактерии *Chloroflexus aggregans* [1].

Поскольку в биосинтезе рибофлавина одним из ключевых промежуточных соединений является 6,7-диметил-8-рибитиллюмазин (далее – люмазин) [2], представляло интерес выяснить, способен ли этот хромофор связываться с белком CagFbFP. Нами была получена кристаллическая структура комплекса CagFbFP с люмазином, а структурный анализ показал, что люмазин действительно образует с белком флуоресцентный комплекс. При этом люмазин занимает тот же связывающий карман, что и FMN, сохраняя близкую ориентацию и сеть водородных связей с аминокислотными остатками белка.

Связывание люмазина сопровождалось заметным изменением спектральных свойств комплекса. Так, для комплекса CagFbFP–люмазин максимум возбуждения наблюдается при 420 нм, а максимум эмиссии — при 462 нм. По сравнению с FMN-связанной формой CagFbFP, флуоресцирующей при 499 нм [3], наблюдается гипсохромный сдвиг эмиссии на 37 нм. Ранее наиболее коротковолновый вариант среди производных CagFbFP обладал максимумом флуоресценции при 486 нм [4]. Кроме того, было показано, что несмотря на снижение температуры денатурации комплекса до 39 °С, белок сохранял способность к ренатурации. Исследование фотостабильности методом спектроскопии поглощения с временным разрешением показало, что при облучении синим светом в анаэробных условиях наблюдается деградация хромофора,

сопровождающаяся минимальной агрегацией белка. При этом спектр поглощения продукта фотодеградаци с максимумом при 340 нм позволяет предположить образование 6-метил-7-оксо-8-рибитиллюмазина.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность использования альтернативных люмазиновых хромофоров в белках семейства FbFP и открывают перспективы расширения их спектрального разнообразия.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-24-00200).

## Литература

1. Nazarenko VV, Remeeva A, Yudenko A, Kovalev K, Dubenko A, Goncharov IM, Kuzmichev P, Rogachev AV, Buslaev P, Borshchevskiy V, Mishin A, Dhoke GV, Schwaneberg U, Davari MD, Jaeger K-E, Krauss U, Gordeliy V, Gushchin I (2019) A thermostable flavin-based fluorescent protein from *Chloroflexus aggregans*: a framework for ultra-high resolution structural studies. *Photochem Photobiol Sci* 18(7):1793-1805.
2. Bacher A, Eberhardt S, Fischer M, Kis K, Richter G (2000) Biosynthesis of vitamin B2 (riboflavin). *Annu Rev Nutr* 20(1):153-167.
3. Smolentseva A, Goncharov IM, Yudenko A, Bogorodskiy A, Semenov O, Nazarenko VV, Borshchevskiy V, Fonin AV, Remeeva A, Jaeger K-E, Krauss U, Gordeliy V, Gushchin I (2021) Extreme dependence of *Chloroflexus aggregans* LOV domain thermo- and photostability on the bound flavin species. *Photochem Photobiol Sci* 20(12):1645-1656.
4. Nikolaev A, Yudenko A, Smolentseva A, Bogorodskiy A, Tsybrov F, Borshchevskiy V, Bukhalovich S, Nazarenko VV, Kuznetsova E, Semenov O, Remeeva A, Gushchin I (2023) Fine spectral tuning of a flavin-binding fluorescent protein for multicolor imaging. *J Biol Chem* 299(3):102977.

## **БИОАНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СИСТЕМЫ СВЕТЛЯКОВ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

### **Bioanalytical Applications of the Firefly Bioluminescent System: Achievements and Prospects**

*Ломакина Г.Ю.\*, Угарова Н.Н.*

МГУ имени М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия

*\*e-mail: lomakinagalina@yahoo.com*

Разработаны научные основы биолюминесцентного экспресс-анализа для использования в медицине, клинической диагностике, фармацевтике, экологии, биотехнологии, пищевой промышленности и пр. Возможность получения стабильных мутантных форм люциферазы и их модификаций с заданными физико-химическими характеристиками позволяет использовать фермент в качестве селективного и чувствительного маркера в биолюминесцентных сенсорах на основе живых клеток, продуцирующих термостабильную люциферазу светляков, что обеспечивает хорошие аналитические показатели и открывает широкие возможности для изучения функционирования живых организмов в условиях клеточного стресса различной природы. Изучение кинетики изменения АТР и люциферазы внутри и вне клеток позволяет в режиме реального времени наблюдать за изменением жизнеспособности клеток и выживаемости в присутствии стрессора, скорости трансляции белков, проницаемости клеточной мембраны, а также позволяет быстро определять МИК эффектора уже на начальной стадии процесса. Уровень внутриклеточного  $АТР_{in}$  — высокочувствительный показатель жизнеспособности клетки и ее выживаемости в условиях клеточного стресса, содержание внеклеточного  $АТР_{ex}$  характеризует степень повреждения клеточной мембраны и наличие ростовых процессов. Эндогенная люцифераза светляков ( $Luc_{in}$ ), экспрессируемая клетками — высокочувствительный индикатор функционирования рибосом и синтеза белка, а обнаружение люциферазы вне клеток ( $Luc_{ex}$ ) свидетельствует о необратимых изменениях проницаемости клеточной мембраны и гибели клеток.

Приведены примеры по использованию люциферазы и АТР для определения чувствительности прокариотических и эукариотических клеток к лекарственным средствам, изучения антибиотического стресса *E. coli* и выявления персистеров. Тенденции последних лет показывают, что увеличение эффективности и длительности действия

антибактериальных агентов, в том числе против резистентных штаммов, может достигаться не только изменением химической структуры эффекторов, но и их модификацией наночастицами и созданием новых гибридных форм. Действительно, мы наблюдали синергизм действия композиций гентамицина с наночастицами серебра на живые клетки *E. coli* при концентрациях каждого компонента ниже МИК.

Созданная универсальная реагентная и приборная база для измерения АТР и фермента позволяет быстро адаптировать метод для быстрого анализа сложных биологических объектов (биопленок и сессильных клеток). Высокая чувствительность биолюминесцентной системы дает возможность конструирования биосенсоров и микрофлюидных устройств на основе живых клеток для использования в высокопроизводительном скрининге.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (тема № 121041500039-8).

## Литература

1. Lomakina GY, Ugarova NN. Bioluminescent test systems based on firefly luciferase for studying stress effects on living cells // Biophysical Reviews. –2022. –Vol. 14, –no. 4. –pp. 887-892.
2. Ломакина ГЮ, Каминская СС, Угарова НН. Биолюминесцентная тест-система на основе рекомбинантной люциферазы светляка *L. mingrelica* для изучения эффективности действия гентамицина на живые клетки *E. coli* // Биофизика. - 2024. - Т. 69. - №3. - С. 565-573.

**ЗАМЕНА КОНСЕРВАТИВНОГО Ile144 НА Leu В ОБЕЛИНЕ УВЕЛИЧИВАЕТ  
ИНТЕНСИВНОСТЬ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО СИГНАЛА ПРИ НИЗКИХ  
КОНЦЕНТРАЦИЯХ КАЛЬЦИЯ**

**Substitution of conservative Ile144 to Leu in obelin increases its light output at low calcium concentrations**

*Маликова Н.П., Еремеева Е.В., Вяткина М.О., Буракова Л.П.,  
Коротков И.А., Маркова С.В., Высоцкий Е.С.\**

Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук,  
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия

*\*e-mail: [eugene.vysotski@gmail.com](mailto:eugene.vysotski@gmail.com), тел.: +7 391 249443*

В течение многих лет кальций-регулируемые фотопротейны гидромедуз успешно используются для измерения концентрации и динамики ионов кальция в различных типах клеток эукариот. В данной работе мы представляем мутант обелина с заменой консервативного Ile144 на Leu, который был выявлен среди девятнадцати мутантов с заменой этого консервативного остатка на все возможные аминокислоты. Мутант продемонстрировал значительно увеличенную чувствительность к ионам кальция, сохранив при этом высокую удельную активность, кинетику светового сигнала и спектральные свойства обелина дикого типа. Более того, как и в случае обелина дикого типа, ионы магния в физиологической концентрации 1 мМ не оказывали существенного влияния на биолюминесцентную активность мутанта. Пригодность полученного мутанта обелина в качестве внутриклеточного репортера кальция была успешно продемонстрирована на примере активации эндогенного пуринорецептора P2Y<sub>2</sub> АТФ в клетках СНО, показав более высокую (в 2,4 раза) чувствительность по сравнению с обелином дикого типа. Соответствующая мутация была также введена в последовательности акворина и клитина, кальций-регулируемых фотопротейнов из гидромедуз *Aequorea victoria* и *Clytia gregaria*, соответственно. Оба мутанта показали повышенную интенсивность биолюминесценции при низкой концентрации кальция по сравнению с соответствующими фотопротейнами дикого типа, однако увеличение световых сигналов у этих мутантов было значительно ниже, чем у соответствующего мутанта обелина.

Исследования поддержаны грантом РНФ № 24-44-00009.

## **ОБРАЗОВАНИЕ 2-ГИДРОПЕРОКСИЦЕЛЕНТЕРАЗИНА И АКТИВАЦИЯ ФОТОПРОТЕИНОВ**

### **2-Hydroperoxycocelenterazine formation and photoprotein activation**

*Маликова Н.П.<sup>1</sup>, Рогова А.В.<sup>2</sup>, Еремеева Е.В.<sup>1\*</sup>, Наташин П.В.<sup>1</sup>, ван Беркель В.<sup>3</sup>, Томилин Ф.Н.<sup>2</sup>, Аврамов П.В.<sup>4,5</sup>, Высоцкий Е.С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Вагенингенский университет и научно-исследовательский центр, Вагенинген, Нидерланды

<sup>4</sup>Харбинский институт технологии, Харбин, Китай

<sup>5</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

*\*e-mail: l\_ermeeva@mail.ru, тел.: +7 983 1639375*

Биолюминесценция многих морских организмов обусловлена активностью  $\text{Ca}^{2+}$ -регулируемых фотопротеинов, которые представляют собой стабильный фермент-субстратный комплекс, состоящий из апо-фотопротеина (~22 kDa) и молекулы преактивированного кислородом субстрата – 2-гидропероксицелентеразина [1]. Являясь яркими представителями семейства «EF-hand» белков, при связывании ионов кальция фотопротеины претерпевают конформационные изменения, запускающие реакцию окислительного декарбоксилирования 2-гидропероксицелентеразина, в результате которой образуется целентерамид в возбужденном состоянии и  $\text{CO}_2$  [2]. Переход целентерамида из возбужденного состояния в основное сопровождается излучением кванта света.

К настоящему времени выполнены многочисленные исследования, посвященные выяснению механизма биолюминесценции и роли аминокислот, локализованных во внутренней полости фотопротеинов, в излучении света. Однако, о самом первом этапе этого процесса – образовании активного фотопротеинового комплекса, известно очень мало, хотя понимание механизма этой реакции и влияния различных факторов на процесс очень важно, особенно в связи с использованием фотопротеинов в качестве сенсоров для мониторинга уровня кальция как

в цитоплазме, так и в органеллах различных типов клеток при разных условиях.

В данной работе представлены результаты масштабного исследования механизма образования активного фотопротеинового комплекса с применением экспериментальных и теоретических методов. Изучено влияние рН на скорость превращения апо-обелина и апо-акворина в активные фотопротеины, а также на выходы активных белков. Установлена форма целентеразина, связывающаяся с апо-белками на начальном этапе формирования комплекса и механизм депротонирования нейтрального целентеразина с участием аминокислот активного центра апофотопротеинов. С помощью методов молекулярной динамики смоделированы структуры апофотопротеинов и исследовано их взаимодействие с различными формами субстрата при различных значениях рН. В результате, на основании полученных экспериментальных данных и применения теоретических методов предложен молекулярный механизм образования 2-гидроперокси-целентеразина, а также роль отдельных аминокислот активного центра фотопротеинов в этом процессе.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 24-44-00009 и Министерства науки и высшего образования РФ № FWES-2024-0018.

## Литература

1. Shimomura O., Johnson F.H. Proc. Natl Acad. Sci. USA, 1978, 75 (6), 2611-2615.
2. Vysotski E.S., Lee J., Acc. Chem. Res., 2004, 37 (6), 405-415.

## SOS-ОТВЕТ БИОСЕНСОРА *ESCHERICHIA COLI* pXen7

### SOS-response of biosensor *Escherichia coli* pXen7

Фомин В.В., Сахаров Д.И.\* , Манухов И.В.

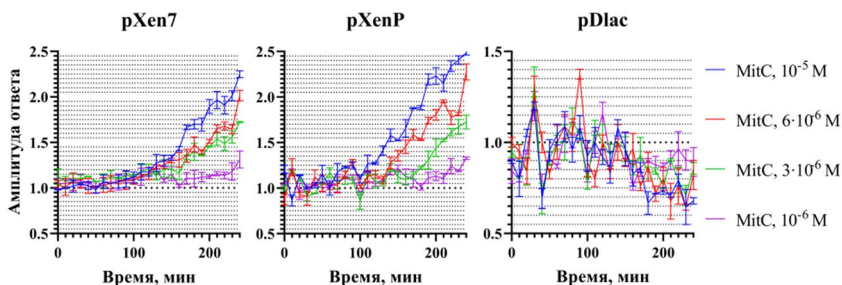
Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

\*e-mail: dansacharoff@gmail.com, тел.: +7 953 5053088

Цельноклеточные lux-биосенсоры в настоящее время широко применяются в качестве аналитического инструмента в экологических и молекулярно генетических исследованиях. Они представляют собой клетки *Escherichia coli*, которые содержат бактериальные lux-гены в качестве генов-репортеров под контролем промоторов, активируемых в ответ на присутствие токсикантов. В результате при внесении исследуемых химических соединений детектор фиксирует рост люминесцентного сигнала. Однако помимо активируемых промоторов, контролирующих экспрессию lux-генов, применяются промоторы с конститутивной экспрессией для оценки падения общей выживаемости за счет падения люминесцентного сигнала. К таким конструкциям относят pXen7, в которой lux-оперон *Photorhabdus luminescens* клонирован под собственным промотором. Однако относительно недавно была показана индукция данного биосенсора в условиях теплового стресса [1]. В сообщении [2] в последовательности pXen7 перед lux-опероном был обнаружен SOS-бокс. В данной работе мы решили проверить индукцию как клонированного в клетках *E. coli*, так и нативного в клетках *Photorhabdus laumondii* TT01 (ранее *P. luminescens* TT01) промотора lux-оперона в условиях SOS-ответа, вызванного митомицином С.

Для проверки помимо pXen7 в работе использовали pXenP (промотор lux-оперона Zm1) и pDlac (промотор Plac-оперона) в векторе pDEW201 перед luxCDABE кассетой [2].

Суспензии клеток *E. coli* MG1655 pXen7, pXenP и pDlac инкубировали в жидкой LB до оптической плотности  $OD_{600} \approx 0,1$ . После, пробы смешивали с митомицином С (MitC) и переносили в планшетный ридер для измерений люминесценции. Полученные значения люминесценции нормировали на значение контрольного образца с добавкой воды принятого за 1. В результате такой обработки на рисунке 1 отображена амплитуда ответа биосенсоров.



**Рисунок 1.** Зависимость амплитуды ответа от времени при добавлении митомцина С (MitC) клеток *E. coli* MG1655, содержащих биосенсорные конструкции pXen7, pXenP и pDlac. Значение 1 соответствует люминесценции образца с водой. Ошибки получены в результате трех повторов.

Данные на рисунке 1 указывают на концентрационно-зависимую активацию после введения MitC промотора *lux*-оперона *Photorhabdus*, которые отвечают за экспрессию *lux*-генов в биосенсорных конструкциях pXen7 и pXenP. В то же время активация отсутствует в контрольном образце pDlac: наблюдается только падение, связанное с общей токсичностью. В результате показана активация считавшегося конститутивным к SOS-ответу биосенсора pXen7.

Следует отметить, что сайт посадки LexA находится значительно дальше промотора *lux*-оперона, что указывает на остаток транскрипционной активности гена перед *lux*-генами. Данный сайт встречается у *P. laumondii* TT01, но не у прочих близкородственных видов *Photorhabdus*, что указывает на случайность такой организации. Любопытно, что при тестировании MitC в клетках *P. laumondii* TT01, активация *lux*-оперона отсутствовала.

## Литература

1. Manukhov, I. V., Rastorguev, S. M., Eroshnikov, G. E., Zarubina, A. P., & Zavl'gelskii, G. B. (2000). Cloning and expression of the *lux* operon of *photorhabdus luminescens*, strain ZM1: the nucleotide sequence of *lux* genes and basic characteristics of luciferase. *Genetika*, 36(3), 322–330.
2. Fomin, V V et al. “*Photorhabdus lux*-operon heat shock-like regulation.” *Heliyon* vol. 9,3 e14527. 11 Mar. 2023, doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14527
3. Завильгельский Г Б и др. “Репрессор LexA участвует в регуляции экспрессии генов *lux*-оперона почвенных светящихся бактерий *Photorhabdus luminescens*.” *Современные проблемы физиологии, экологии и биотехнологии микроорганизмов*. 2014: 96-96.

**Секция 8. Фототрофные микроорганизмы:  
светозависимые процессы и производимые  
ценные продукты**

**ИЗУЧЕНИЕ АДАПТАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ОЖР КРИВЫХ НА ОТДЕЛЬНЫХ КЛЕТКАХ**

**Study the acclimation of microalgae by recording the OJIP transients on individual cells**

*Антал Т.К.<sup>1\*</sup>, Волгушева А.А.<sup>2</sup>, Конюхов И.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Псковский государственный университет,  
Псков, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

*\*e-mail: antal@photo.ru, тел.: +7 811 2201699*

Адаптация фототрофных микроорганизмов к стрессу может обеспечиваться сдвигом в структуре популяции, когда ключевую роль в выживании начинают играть немногочисленные покоящиеся или устойчивые клетки, присутствующие в популяции в оптимальных условиях роста (Tang et al., 2024). Понимание механизмов, лежащих в основе такой гетерогенности популяции, необходимо для выявления закономерностей устойчивости фототрофных организмов к действию неблагоприятных факторов окружающей среды. Однако подобные исследования затруднены в связи с недостатком методов, позволяющих достоверно и без высоких трудозатрат оценивать физиологическое состояние отдельных клеток микроводорослей.

Методы измерения флуоресценции хлорофилла (ФХ) предоставляют достаточно простой в использовании и быстрый способ оценки активности первичных реакций фотосинтеза, которая, в целом, соответствует физиологическому состоянию организма. В частности, в последнее время появились высокочувствительные флуориметры, сопряженные с микроскопией, позволяющие измерять отношение  $F_v/F_m$ , отражающее фотохимическую активность ФС2, на отдельных клетках микроводорослей. Уникальный прибор, сконструированный на кафедре биофизики биологического факультета МГУ, способен регистрировать более информативные индукционные кривые ФХ (ОЖР кривые) на отдельных клетках микроводорослей. С его помощью можно оценивать не только фотохимическую активность ФС2 у отдельной клетки, но и функциональное состояние донорной и акцепторной стороны ФС2, размер антенны функционального центра ФС2, и другие важные характеристики первичных реакций фотосинтеза. Использование данного прибора в последние годы позволило изучить характер изменения структуры

популяций модельных зеленых микроводорослей в условиях дефицита биогенных элементов и действия токсикантов разного типа. Исследования выявили существование субпопуляций устойчивых к стрессу клеток, которые, наиболее вероятно, позволяют популяции переживать стресс и восстанавливаться после прекращения его действия. Более того, данный метод позволил выявить стратегии адаптации популяций фитопланктонных микроводорослей к различным условиям освещенности.

### **Литература**

1. Tang, S., Liu, Y., Zhu, J. et al. Bet hedging in a unicellular microalga. *Nat Commun* 15, 2063 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46297-6>

**МОТИВЫ МЕТИЛИРОВАНИЯ ГЕНОМНОЙ ДНК И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ  
ЭНДОНУКЛЕАЗЫ РЕСТРИКЦИИ ПУРПУРНОЙ НЕСУЛФУРНОЙ БАКТЕРИИ  
*RHODOBACTER CAPSULATUS* B10**

**Genomic DNA methylation motifs and related restriction endonucleases of the  
purple non-sulfur bacterium *Rhodobacter capsulatus* B10**

*Бабенко В.В.<sup>1</sup>, Майорова Е.В.<sup>2\*</sup>, Петушкова Е.П.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр  
биологических исследований Российской академии наук»,  
Пушино, Россия

*\*e-mail: ekaterina.majorova.97@mail.ru, тел.: +7 4967 732791*

Бактериальные системы рестрикции-модификации (СРМ) ДНК, состоящие из метилтрансфераз и родственных рестрикционных ферментов, защищающих геном хозяина от инвазии транспозонов и вирусной ДНК [1], снижают эффективность генетической модификации при направленном мутагенезе, который используется для получения высокопродуктивных биотехнологических штаммов бактерий. Все СРМ имеют сайт-специфические ДНК-связывающие домены, распознающие специфические короткие последовательности ДНК, которые должны быть метилированы для предотвращения активности эндонуклеаз рестрикции. В 2010 в собранном геноме фотосинтезирующей бактерии *R. capsulatus* SB1003 было выявлено пять полных СРМ [2]. СРМ RcaSBIV распознаёт последовательность AGAN7RTAG (Н. Strnad и V. Paces, неопубликованные данные). Согласно актуальной аннотации полного генома бактерия обладает не 5, а 7 генами сайт-специфических ДНК-метилтрансфераз. Однако экспериментально не для всех установлены сайты узнавания ДНК.

В настоящей работе на основе данных секвенирования Oxford Nanopore Technology с помощью усовершенствованной версии алгоритма Snapper [3] выполнена высокочувствительная идентификация мотивов метилирования ДНК *R. capsulatus* B10 (продуцента практически значимых соединений [4]). Обнаружено 9 уникальных мотивов метилирования, что может указывать на наличие еще двух не идентифицированных ранее у данной бактерии метилтрансфераз. 6 из обнаруженных мотивов содержат метилированный аденин, 3 – метилированный цитозин. В каждой этой группе имеются по два часто встречающихся в геномной ДНК мотива с

метилованным нуклеотидом (4981-9852 штуки в геноме), при том медианный процент метилирования сайта находится в диапазоне от 60 (для редко встречающихся: 211-525 штук в геноме) до 93,3 (для часто встречающихся).

С целью обнаружения неизвестных метилтрансфераз *R. capsulatus* B10 и возможного соотнесения генов с их сайтами узнавания, был использован алгоритм автоматического поиска ферментов по мотиву узнавания ДНК (<https://www.genscript.com/tools/restriction-enzyme-map-analysis>) из числа уже охарактеризованных рестриктаз (компонента CPM) с последующим применением алгоритма tBLASTn NCBI. Для 4 из 9 обнаруженных мотивов метилирования алгоритмом были предложены несколько изоизомеры нескольких эндонуклеаз рестрикции. Полученные результаты обсуждаются.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-24-00459, <https://rscf.ru/project/25-24-00459/>

## Литература

1. Mayorova, E.V., Romanova A.I., Petushkova E.P., Tsygankov A.A. (2023) Nanotechnol Russia, №18, P. 496– 505, doi.org/10.1134/S2635167623700362
2. Strnad H., Lapidus A., Paces J. [et al.] (2010) J Bacteriol., V. 192, № 13. P. 3545-3546, doi: 10.1128/JB.00366-10
3. Konanov, D.N., Krivonos D.V., Babenko V.V., Ilina E.N. (2025) *bioRxiv.*, P. 08., doi.org/10.1101/2025.08.03.668330
4. Morrison H.M., Bose A. (2025) J Ind Microbiol Biotechnol.,52: kuac052, doi: 10.1093/jimb/kuac052

**КОРМОПРОИЗВОДСТВО С МИКРОВОДОРОСЛЯМИ ДЛЯ АКВАКУЛЬТУРЫ:  
ИМПОТРОЗАМЕЩЕНИЕ КОРМОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ПИТАТЕЛЬНЫМИ И  
ЦЕЛЕБНЫМИ СВОЙСТВАМИ. ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ИНДУКЦИИ  
БИОСИНТЕЗА ЦЕННЫХ МОЛЕКУЛ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ БИОМАСС В  
КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ**

**Microalgae feed production for aquaculture: home production of feed with  
enhanced nutritional and healing properties. A promising method for inducing  
biosynthesis of valuable molecules for the use of biomass in feed production**

*Козлова Т.А.<sup>1,3\*</sup>, Мальшиева Е.В.<sup>2</sup>, Бородина Н.Н.<sup>2</sup>,  
Егоркина К.В.<sup>2</sup>, Скарилкина К.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Кубанский государственный аграрный университет  
им. И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

<sup>2</sup>Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,  
Тамбов, Россия

<sup>3</sup>Институт природно-технических систем РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: k\_tatiana15@yahoo.com, тел.: +7 977 5957718*

Микроводоросли содержат сбалансированный состав питательных веществ (полиненасыщенные жирные кислоты, каротиноиды, витамины, белки и углеводы) и, при использовании в кормах, повышают репродукцию, выживаемость молоди, нормализует микробиом кишечника и общее самочувствие сельскохозяйственных животных по сравнению со стандартными кормами [1]. Существенно повышается также качество производимой продукции рыбоводства за счет улучшения цвета, содержания ценных питательных компонентов и вкусовых качеств мяса и икры [2]. Микроводоросли синтезируют натуральные красители и антиоксиданты (каротиноиды), вещества антибактериального, антивирусного, антигрибкового и другие целительные вещества [3].

В наших экспериментах, проведенных на молоди карповых рыб (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1759), которых кормили стандартным кормом CF-110 в сочетании с 25% микроводорослей (15% *Chlorella vulgaris* Beijer IPPASC-38 в порошке и 10% суспензии из каротиногенной водоросли *Coelastrella rubescens* (Vinatzer) Kaufnerova & Elias IPPAS H-350) в течение месяца. Насколько известно авторам, *C. rubescens*, которая характеризуется повышенным содержанием каротиноидов, до 35 мг/г сухого вещества [4], не применялась ранее в качестве кормовой добавки.

Полученные результаты наглядно продемонстрировали положительное влияние микроводорослей как на качество корма, так и на

физиологические параметры рыбы. Значительно повысилась водостойкость гранул (до 65 раз по сравнению со стандартным кормом), что может быть связано с наличием в них вяжущих, цементирующих веществ. Коэффициент накопления массы увеличился в среднем в 1,5 раза, что отражает увеличение продуктивности рыбной биомассы. Коэффициент жирности был в пределах нормы во всех группах. В экспериментальном корме содержание белка было увеличено на 2,41%, а содержание сырых липидов - на 1,2%, в то время как содержание ПНЖК в сырых липидах увеличилось на 12,5%.

Также были проведены эксперименты по индукции ростовых показателей ( $\mu$ , биомасса) и биосинтеза ценных молекул в клетках каротиногенных водорослей *C. rubescens* и *Lobosphaera incisa* с помощью фитогормонов гибберелина (ГКЗ) и 3-индолуксусной кислоты (ИУК) и комбинацией ИУК с наночастицами серебра. В подтверждение ранее сделанных экспериментов, оба гормона в наноконцентрациях (5 и 10 нмоль/л) продемонстрировали значительную способность повышать скорость роста, содержание белка, сырых липидов и каротиноидов, в то время как наночастицы Ag существенно усиливали положительный эффект ИУК, облегчая проникновение гормона в клетки.

## Литература

1. Alcaraz R, Hernández-Contreras PI, Hernández MD. Algal Research, 2021, V. 53, P. 102167, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102167>.
2. Gong Y, Bandara T, Huntley M, Johnson Z.I, Dias J, Dahle D, Sørensen M, Kiron V. Aquaculture. 2019, V. 501, P. 455–464. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.049>
3. Nagappan S, Das P, AbdulQuadir M, Thaher M, Khan S, Mahata C, Al-Jabri H, Vatland AK, Kumar G. J. Biotechnol. 2021, V. 341, P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>
4. Minyuk G, Chelebieva E, Chubchikova I, Dantsyuk N, Drobetskaya I, Sakhon E, Chekanov K, Solovchenko A. Algae. 2017. V. 32(3), P. 245–259. <https://doi.org/10.4490/algae.2017.32.8.6>

**ПОВЫШЕНИЕ ПИТАТЕЛЬНОЙ И ИММУНОМОДУЛИРУЮЩЕЙ ЦЕННОСТИ КОРМОВ ДЛЯ АКВАКУЛЬТУРЫ ЗА СЧЕТ ВВЕДЕНИЯ КОРМОВОЙ ДОБАВКИ ИЗ БИОМАССЫ ЗЕЛЕННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ. ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ БИОСИНТЕЗА ЦЕННЫХ БИОМОЛЕКУЛ**

**Enhancing the nutritional and immunomodulatory value of aquaculture feed by introducing a feed additive from green algae biomass. A promising way to increase the biosynthesis of valuable biomolecules**

Козлова Т.А.<sup>1</sup>, Малышева Е.В.<sup>2</sup>, Бородин Н.Н.<sup>2</sup>, Егоркина К.В.<sup>2</sup>,  
Скарилкина К.А.<sup>2</sup>, Максим Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кубанский государственный аграрный университет  
им. И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

<sup>2</sup>Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,  
Тамбов, Россия

Микроводоросли являются ценным источником хорошо сбалансированных питательных веществ, таких как полиненасыщенные жирные кислоты, каротиноиды, белки и углеводы, обладающие повышенной усвояемостью для человека и животных. Некоторые виды микроводорослей также синтезируют уникальные соединения, которые могут подавлять воспалительные заболевания бактериальной или вирусной природы, рак, заболевания печени и другие патологические состояния или оказывать иммуномодулирующее действие. Эти особенности микроводорослей в сочетании с их высокой скоростью роста и инновационными методами стимулирования биосинтетических процессов делают этот ресурс биомассой, пользующейся большим спросом при производстве кормов для животноводства, особенно в аквакультуре. В наших экспериментах, проведенных на молоди карповых рыб (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1759), три контрольных аквариума, в которых кормили основным кормом (CF-110), сравнивали с тремя экспериментальными аквариумами, в которых кормили CF-110 в сочетании с 25% микроводорослей (15% хлореллы обыкновенной Пекинской IPPASC-38 в порошке и 10% суспензии из каротиногенных водорослей *Coelastrella rubescens* (Vinatzer) Kaufnerova & Elias IPPAS H-350) в течение месяца. Полученные результаты наглядно продемонстрировали положительное влияние микроводорослей как на качество корма, так и на физиологические параметры рыбы. Значительно повысилась водостойкость гранул (примерно в 65 раз), что может быть связано с наличием в них вяжущих веществ. Коэффициент накопления массы увеличился в среднем в 1,5 раза, что отражает увеличение

продуктивности рыбной биомассы. Коэффициент жирности был в пределах нормы во всех группах. В экспериментальном корме содержание белка было увеличено на 2,41%, а содержание сырых липидов – на 1,2%, в то время как содержание ПНЖК в сыром жире увеличилось на 12,5%. Также были проведены эксперименты по стимулированию роста и биосинтеза ценных молекул в клетках каротиногенных водорослей *C. rubescens* и *Lobosphaera incisa* с помощью фитогормонов гибберелина, ИУК и комбинации ИУК с наночастицами серебра. Оба гормона продемонстрировали мощную способность повышать скорость роста, содержание белка, сырых липидов и каротиноидов, в то время как наночастицы Ag значительно усиливали положительный эффект гормона, облегчая проникновение гормона в клетки.

## **ДВУХКАНАЛЬНЫЙ CO<sub>2</sub>-АНАЛИЗАТОР ДЛЯ МОНИТОРИНГА СКОРОСТИ ДЫХАНИЯ И ФОТОСИНТЕЗА**

**Dual-channel CO<sub>2</sub> analyzer for monitoring respiration and photosynthesis rate**

Конюхов И.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

*\*e-mail: vanka.kon@gmail.com, тел.: +7 916 7900931*

Непрерывный мониторинг обмена живых организмов углекислым газом (CO<sub>2</sub>) с окружающей средой – важный исследовательский инструмент для специалистов в различных областях биологии: физиологов растений, физиологов животных и микробиологов. С его помощью изучают механизмы и особенности регуляции фотосинтеза и дыхания, осуществляют контроль промышленного культивирования растений и микроорганизмов, а также наблюдение за состоянием пациентов в медицине.

Относительно молодым направлением, где также необходимо измерение скорости потребления CO<sub>2</sub>, является культивирование фототрофных микроорганизмов – одноклеточных водорослей и цианобактерий. Здесь речь идет об оценке общей скорости фотосинтеза в биореакторе по разности объемной доли CO<sub>2</sub> (частей на миллион, ppm) между газовой смесью, нагнетаемой в биореактор, и газовой смесью, покидающей его. В при постоянном и известном объемном расходе воздуха в биореакторе (см<sup>-3</sup> мин<sup>-1</sup>) расчет скорости поглощения CO<sub>2</sub> возможен в абсолютных единицах (см<sup>-3</sup> мин<sup>-1</sup> или мг мин<sup>-1</sup>).

Подобные измерения, проводимые в газовой фазе, позволяют без отбора проб клеточной суспензии оценивать скорость производства биомассы в биореакторе, а также наблюдать в реальном времени реакцию скорости производства биомассы на изменение условий культивирования. Таким образом удастся в относительно сжатые сроки подобрать оптимальные сочетания физико-химических параметров культивирования: интенсивность освещения, температуру, скорость барботирования и концентрацию CO<sub>2</sub> на входе в реактор.

Для таких практических задач нужны газоанализаторы с разрешением по объемной доле CO<sub>2</sub> не хуже 5 ppm и сохраняющие точность в условиях дестабилизирующего влияния температуры, влажности воздуха и атмосферного давления. В настоящее время такие приборы производятся серийно, например SBA-5 (PP Systems, США) и Li-

830 (LiCor, США). Но так как цены на них начинаются от 9000 USD (по состоянию на осень 2024 г.) такие анализаторы доступны далеко не каждой исследовательской лаборатории. В данной работе описан опыт построения дифференциального CO<sub>2</sub>-анализатора с использованием сравнительно недорогого (200 USD) CO<sub>2</sub> датчика для теплиц и систем вентиляции помещений. С учетом стоимости дополнительных компонентов и стоимости работ по сборке и программированию бюджет системы составил около 1000 USD.

Характеристики анализатора были изучены в опытах на микроводорослях в фотобиореакторе (*Chlorella vulgaris* Beijer.) и в более «тонких» экспериментах на одиночных прорастающих семенах растений (редис). Эксперименты подтвердили возможность измерения скорости фотосинтеза и дыхания водорослей в биореакторе в условиях лимитирования по свету или по CO<sub>2</sub>. Изменение интенсивности освещения фотобиореактора сопровождалось изменением скорости поглощения CO<sub>2</sub> из барботажного воздуха. Однако скорость поглощения CO<sub>2</sub>, которая детектируется в газовой фазе, реагирует на изменение освещенности фотобиореактора с некоторой задержкой (30-60 минут), которая, по всей видимости, обусловлена буферной емкостью культуральной жидкости.

Собственный шумовой порог прибора по скорости поглощения или выделения CO<sub>2</sub> в камере составил порядка 0.5 мм<sup>-3</sup> ч<sup>-1</sup>, что позволило осуществить мониторинг дыхания и фотосинтеза на одиночном растении редиса на протяжении первых 7 дней от момента увлажнения сухого семени.

**НАПРАВЛЕННОЕ КУЛЬТИВИРОВАНИЕ *VISCHERIA PUNCTATA* VISCHER С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ СИНТЕЗА КАРОТИНОИДОВ**

**Directed cultivation of *Vischeria punctata* Vischer to increase carotenoid synthesis**

*Кузнецова Т.А.\**

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

*\*e-mail: kuznetsova.ta1@spbstu.ru, тел.: +7 911 7947869*

Метаболизм многих штаммов микроводорослей лабилен. В ответ на дозированное стрессовое воздействие в биомассе микроводорослей накапливаются липиды, углеводы и антиоксиданты. УФ-излучение [1], изменение кислотности среды, снижение температуры культивирования [2], увеличение в питательной среде концентрации йодида калия [3] приводит к накоплению каротиноидов. Большое внимание обращено на микроводоросли (например, *Chloromonas reticulata* Gobi, *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*, *Scenedesmus almeriensis* [4]), накапливающие вторичные каротиноиды вне хлоропластов – нефотосинтетические пигменты, локализованные во внетилакоидных структурах (липидных глобулах) [5].

Микроводоросли *Vischeria punctata* Vischer, штамм IPPAS H-242 (ИФР РАН им. К.А. Тимирязева) культивировали в лабораторном фотобиореакторе, наилучшей средой для выхода биомассы стала среда Болда. Для увеличения содержания каротиноидов в биомассе микроводорослей было использовано дозированное воздействие различных концентраций перекиси водорода: от 0,1 до 0,3 мл/л суспензии микроводорослей. Одновременно с перекисью водорода в суспензию вносили пиридоксин в концентрации 50 мг/л. Перекись и пиридоксин вносились каждые двое суток при культивировании *V. punctata*, которое продолжалось 10 суток. Добавки перекиси водорода приводят к снижению продолжительности экспоненциальной фазы роста в вариантах с внесением перекиси водорода 0,1 и 0,2 мл/л на 1 сутки, с внесением перекиси водорода 0,3 мл/л на 2 суток. Также в ответ на стрессовое воздействие отмечено уменьшение средних размеров клеток в популяции. В варианте с концентрацией перекиси водорода 0,3 мл/л происходит снижение популяционной емкости и содержания суммы каротиноидов в воздушно-сухой биомассе. В вариантах с внесением перекиси водорода 0,1 и 0,2 мл/л отмечено увеличение доли каротиноидов в пигментном комплексе по сравнению с контролем на  $18,12 \pm 0,20$  и  $18,92 \pm 0,14$  %

соответственно. Наилучшим вариантом эксперимента стало внесение 0,2 мл перекиси водорода на 1 л суспензии микроводорослей, при этом выход биомассы достоверно не отличался от контрольного варианта, содержание суммы каротиноидов возрастает на 23,1% по сравнению с контролем и достигает  $5,97 \pm 0,11$  мг/г воздушно-сухой биомассы.

## Литература

1. Головки Т.К., Силина Е.В., Лашманова Е.А., Козловская А.В. Активные формы кислорода и антиоксиданты в живых системах: интегрирующий обзор / Т.К. Головки, Е.В. Силина, Е.А. Лашманова, А.В. Козловская // Теоретическая и прикладная экология. – 2022. – № 1. – С. 17-26.
2. Мартусевич А.К. Антиоксидантная терапия: современное состояние, возможности и перспективы / А.К. Мартусевич, К.А. Карузин, А.С. Самойлов // Биорадикалы и антиоксиданты. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 5-23.
3. Патент № SU 1685992 A1 СССР. Способ культивирования микроводорослей *Chlamydomonas reinhardtii* 449: № 4701956/13: заявл. 08.06.89.: опубл. 23.10.91. / Б. Исмаилюджав, А.Р. Рахимов, Х.А. Бердыкулов; Институт ботаники АН УзССР.
4. Rodríguez-Concepción M. et al. A global perspective on carotenoids: metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health // Progress in lipid research (Ed. Elsevier), Vol. 70 (April 2018). Pp. 62-93.
5. Дымова О.В., Новаковская И.В., Патова Е.Н. и др. Влияние условий культивирования на содержание каротиноидов в клетках водоросли *Chloromonas reticulata* (Goroschankin) Gobi / О.В. Дымова, И.В. Новаковская, Е.Н. Патова и др. // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Киров, 05 декабря 2019 года. Том Книга 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2019. – С. 260-262.

## НОВЫЕ ТАКСОНЫ ЦИАНОБАКТЕРИЙ, ПОГЛОЩАЮЩИХ ДАЛЬНИЙ КРАСНЫЙ СВЕТ

### New taxa of cyanobacteria, which are capable of using far-red light

Сенатская Е.В.<sup>1\*</sup>, Аверина С.Г.<sup>1</sup>, Полякова Е.В.<sup>2</sup>, Лыхолой А.Н.<sup>1</sup>,  
Болдина О.<sup>3</sup>, Пиневи́ч А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Университет Пизы, Пиза, Италия

<sup>3</sup>Ботанический институт имени Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: [senatskaya.kate.vbg@yandex.ru](mailto:senatskaya.kate.vbg@yandex.ru), тел.: +7 969 2080961

В процессе поисков и изучения штаммов цианобактерий, поглощающих дальний красный свет (700-750 нм) и синтезирующих хлорофиллы *d* и *f*, которые ведутся уже в течение 10 лет на кафедре Микробиологии СПбГУ, нами были выделены более десятка новых штаммов. Некоторые из них были описаны в качестве новых видов и родов на основании анализа последовательности генов 16S рПНК, *rpoC1* и *rbcL*, а также последовательности и структуры 16S-23S ITS. Штамм CALU 1929 был описан в качестве нового вида *Kovacicikia brocelensis* [1], штамм CALU 1935 – в качестве нового вида *Leptolyngbya fluviusnevae* [1], а пять штаммов CALU 1711, CALU 1713, CALU 1715, CALU 1750 и CALU 1934 – в качестве нового вида *Ingrithrix praediumpetri* в составе нового рода *Ingrithrix* [2].

## Литература

1. Averina S. G., Senatskaya E. V., Polyakova E. V., Lykholay A. N., Pinevich A. V. (2026) Further acquaintance with the diversity of cyanobacteria adaptively expressing red-shifted chlorophylls: Descriptive information on twelve new cultured strains, extended with proposals of *Kovacicikia brocelensis* sp. nov. and *Leptolyngbya fluviusnevae* sp. Nov. (Leptolyngbyales, Cyanobacteriota). Nova Hedwigia, doi: 10.1127/nova\_hedwigia/1170
2. Averina S. G., Polyakova E. V., Senatskaya E. V., Boldina O., Pinevich A. V. (2026) Five clustered ‘Leptolyngbya-like’ strains underlie the proposal of *Ingrithrix praediumpetri* gen. et sp. nov. (Nodosilineaceae, Nodosilineales), a new filamentous cyanobacterium producing chlorophylls *d* and *f*. Phytotaxa 758 (2): 105–128, <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.758.2.1>

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

|                   |         |                 |                    |
|-------------------|---------|-----------------|--------------------|
| Абашева К.Р.      | 157     | Борщевский В.И. | 146, 162           |
| Аверина С.Г.      | 188     | Бочкарев Л.Н.   | 84                 |
| Аврамов П.В.      | 171     | Брагина Н.А.    | 125                |
| Александрова Е.А. | 97      | Браташов Д.Н.   | 92                 |
| Анина А.А.        | 84, 97  | Буракова Л.П.   | 160, 162, 170      |
| Антал Т.К.        | 61, 176 | Бурцева А.Д.    | 150                |
| Артемова С.А.     | 160     | Бухалович С.М.  | 102, 128, 142, 148 |
| Астафьев А.А.     | 71      | Буханов Е.Р.    | 10, 11             |
| Афанасьев А.А.    | 166     | Бухдрукер С.С.  | 102, 128, 146      |
| Ашихмин А.А.      | 20, 31  | Бучарская А.Б.  | 68, 90             |
|                   |         | Бушнев С.О.     | 155                |

### Б

|                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| Бабенко В.В.              | 178              |
| Баймухаметов Т.Н.         | 150              |
| Балашов Н.В.              | 27, 29           |
| Баранова Е.Н.             | 64, 66, 106, 108 |
| Безбородова О.А.          | 121              |
| Безручко И.О.             | 148              |
| Белозеров Ю.А.            | 33               |
| Белоусов А.С.             | 146              |
| Беляков К.М.              | 97               |
| Бизякина Д.О.             | 88               |
| Бикбаев Р.Г.              | 54               |
| Блинков А.О.              | 88               |
| Блохина И.А.              | 110              |
| Богатырев В.А.            | 68               |
| Богородский А.О.          | 102              |
| Богоутдинова Л.Р.         | 64, 66, 108      |
| Бойко К.М.                | 150              |
| Бойцова Е.                | 110              |
| Болдина О.                | 188              |
| Боржичская Е.О.           | 121              |
| Борисова-Мубаракшина М.М. | 20, 27, 31       |
| Бородачёва И.В.           | 97               |
| Бородин В.Б.              | 8                |
| Бородина Н.Н.             | 180, 182         |

### В

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| ван Беркель В.    | 171                |
| Василенко Л.М.    | 128                |
| Василов Р.Г.      | 155                |
| Васильев П.М.     | 164                |
| Васильев Ю.Л.     | 124                |
| Васильева С.Д.    | 164                |
| Велигура В.И.     | 130                |
| Ветошкина Д.В.    | 27, 29, 31, 48     |
| Викс Т.Н.         | 40                 |
| Вильянен Д.В.     | 12, 20, 46         |
| Витухновская Л.А. | 14, 22             |
| Волгушева А.А.    | 88, 176            |
| Волочаев М.Н.     | 10                 |
| Воробьев В.А.     | 33                 |
| Воронов Д.А.      | 44                 |
| Высоцкий Е.С.     | 160, 162, 170, 171 |
| Вяткина М.О.      | 170                |

### Г

|               |         |
|---------------|---------|
| Гаспарян М.   | 72      |
| Гвоздев Д.А.  | 69, 150 |
| Генин В.Д.    | 68      |
| Генина Е.А.   | 68      |
| Гладкова Н.Д. | 104     |
| Глявина А.    | 72      |

|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Говоров Н.Д.    | 121                     |
| Голубева А.В.   | 164                     |
| Горбачёва В.И.  | 52                      |
| Горпищенко В.А. | 119                     |
| Горячев С.Н.    | 50                      |
| Грин М.А.       | 113, 119, 121, 122, 124 |
| Гринберг М.А.   | 33                      |
| Грязнова У.В.   | 34                      |
| Губарькова Е.В. | 104                     |
| Гусев А.В.      | 108                     |
| Гусенков А.А.   | 71                      |
| Гуслякова О.И.  | 68, 92                  |
| Гущин И.Ю.      | 166                     |

## Д

|                |          |
|----------------|----------|
| Демина А.И.    | 121      |
| Дивашук М.Г.   | 88       |
| Долгих Д.А.    | 144      |
| Доманская И.Н. | 40       |
| Домский Н.А.   | 94       |
| Доронин И.А.   | 155      |
| Дронова Е.А.   | 128, 148 |
| Дружкова И.Н.  | 72       |
| Дурнев Д.А.    | 121      |

## Е

|                |          |
|----------------|----------|
| Егоркина К.В.  | 180, 182 |
| Ежова А.А.     | 155      |
| Елизаров Д.О.  | 132      |
| Емельянов В.В. | 36       |
| Еремеева Е.В.  | 170, 171 |

## Ж

|              |     |
|--------------|-----|
| Жданова К.А. | 125 |
| Жидков Д.Г.  | 88  |

## З

|                  |    |
|------------------|----|
| Залесский А.Д.   | 95 |
| Занишевская А.А. | 74 |

## И

|               |                    |
|---------------|--------------------|
| Иванов Б.Н.   | 29, 38, 46, 48, 52 |
| Иванова А.И.  | 162                |
| Иваньков А.И. | 148                |
| Игнатова Л.К. | 48                 |
| Исакова А.    | 72                 |

## К

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| Кабашникова Л.Ф.  | 40             |
| Кан А.С.          | 119            |
| Каневский М.В.    | 82             |
| Карабут М.М.      | 104            |
| Катышев А.Д.      | 82             |
| Ким П.Н.          | 54             |
| Кирич Н.С.        | 122            |
| Киселева Е.Б.     | 97             |
| Клименков Ю.Д.    | 59             |
| Кобяков А.В.      | 54             |
| Козлова Т.А.      | 180, 182       |
| Козулева М.А.     | 12, 20, 46, 52 |
| Коленчукова О.А.  | 115, 116, 117  |
| Комарова А.       | 72, 84         |
| Комарова А.Д.     | 84             |
| Коновалова Л.Н.   | 66             |
| Коновалова Н.В.   | 86             |
| Коновалова О.В.   | 162            |
| Конюхов И.В.      | 176, 184       |
| Коппель Л.А.      | 134            |
| Корватовский Б.Н. | 50             |
| Королёв К.П.      | 42             |
| Коротов И.А.      | 170            |
| Кособрюхов А.А.   | 152            |
| Костылев П.И.     | 36             |
| Котенко Н.А.      | 102, 128       |
| Кочетков А.Н.     | 164            |
| Кочешкова А.А.    | 88             |
| Кравчук В.Ю.      | 117            |
| Краснов Я.М.      | 82             |
| Краснова Е.Д.     | 44, 45         |
| Креславский В.Д.  | 132, 152       |
| Крицкий М.С.      | 136            |
| Крюкова Е.А.      | 144            |

|                |     |                  |               |
|----------------|-----|------------------|---------------|
| Кузнецов В.В.  | 57  | Митрофанова И.   | 64, 66, 108   |
| Кузнецов С.С.  | 104 | Митрофанова И.В. | 64, 108       |
| Кузнецова Е.А. | 166 | Михайлов А.Э.    | 102, 128, 148 |
| Кузнецова И.А. | 104 | Моргун А.        | 110           |
| Кузнецова Т.А. | 186 | Морина И.Ю.      | 130           |
| Куклин А.И.    | 148 | Мотовилова Т.М.  | 104           |
| Куклина Д.Д.   | 148 | Мургузова А.В.   | 57            |
| Куковякина Е.  | 72  | Мутовкин П.А.    | 69            |
| Купцов С.В.    | 106 |                  |               |
| Курников А.    | 72  |                  |               |

## Н

|                 |             |                |          |
|-----------------|-------------|----------------|----------|
| <b>Л</b>        |             | Наволокин Н.А. | 68       |
|                 |             | Нагаева А.С.   | 44       |
| Лабунская Е.А.  | 44, 45      | Надеева Е.М.   | 48       |
| Лазарева Е.Н.   | 90          | Надточено В.А. | 71       |
| Латушкин В.В.   | 64, 66, 106 | Натаров И.И.   | 166      |
| Лихобабина Д.А. | 119         | Наташин П.В.   | 162, 171 |
| Лобышев В.И.    | 44, 45      | Неверов К.В.   | 136      |
| Ломакина Г.Ю.   | 164, 168    | Николаев А.А.  | 31       |
| Лукашев Е.П.    | 50, 144     | Николаев А.С.  | 166      |
| Лукша В.И.      | 40          | Николаев Д.М.  | 94, 100  |
| Лыкова Т.Ю.     | 57          | Носев А.Н.     | 119      |
| Лыхолой А.Н.    | 188         | Нокс П.П.      | 50       |

## М

|                  |                    |
|------------------|--------------------|
| Майорова Е.В.    | 178                |
| Майорова О.А.    | 92                 |
| Максим Е.А.      | 182                |
| Максимов Е.Г.    | 144, 146, 150      |
| Маликова Н.П.    | 160, 162, 170, 171 |
| Мальшева Е.В.    | 180, 182           |
| Мамедов М.Д.     | 22                 |
| Манухов И.В.     | 173                |
| Маренкова Т.В.   | 31                 |
| Маркин Р.В.      | 27, 46             |
| Маркова С.В.     | 170                |
| Маторин Д.Н.     | 50                 |
| Медведев Д.Ю.    | 121                |
| Метелкина Е.М.   | 94, 100            |
| Мешалкина Д.А.   | 130                |
| Милановский Г.Е. | 14, 22             |
| Миллер Т.М.      | 69                 |
| Минаков Д.А.     | 124                |

## О

|                  |          |
|------------------|----------|
| Обухов Ю.Н.      | 136      |
| Орлова А.        | 72       |
| Осадчий И.Р.     | 100      |
| Островецких П.В. | 121, 122 |
| Осыченко А.А.    | 71, 95   |
| Охрименко И.С.   | 138, 144 |

## П

|                 |          |
|-----------------|----------|
| Павлов А.В.     | 140      |
| Павлов В.В.     | 140      |
| Павлов И.Б.     | 16, 57   |
| Пашенко В.З.    | 50       |
| Пермякова Н.В.  | 52       |
| Перфильев М.А.  | 164      |
| Петрова А.А.    | 22       |
| Петрова Е.А.    | 142      |
| Петровская Л.Е. | 144, 146 |

|                  |             |
|------------------|-------------|
| Петушкова Е.П.   | 178         |
| Пиневич А.В.     | 188         |
| Пищальников Р.Ю. | 18          |
| Плехонов А.      | 72          |
| Плотникова Е.    | 72, 121     |
| Плотникова Е.А.  | 121         |
| Плюснина Т.Ю.    | 59, 60, 61  |
| Полякова Е.В.    | 188         |
| Попов В.О.       | 150         |
| Попова А.Ю.      | 157         |
| Поспелов В.А.    | 146, 162    |
| Потапов А.       | 72, 97, 104 |
| Потапов А.Л.     | 97, 104     |
| Пузанский Р.К.   | 36          |
| Пухова А.С.      | 122         |
| Пыхова Е.С.      | 20, 155     |
| Пыхтин Д.А.      | 54          |
| Пятина С.А.      | 10          |

## Р

|                 |               |
|-----------------|---------------|
| Радченко И.Г.   | 44            |
| Ралдугина Г.Н.  | 66            |
| Ремесва А.А.    | 166           |
| Рижиков Ю.Л.    | 102, 128, 148 |
| Ризниченко Г.Ю. | 59            |
| Рогова А.В.     | 171           |
| Рубин А.Б.      | 50, 59        |
| Рудакова Н.В.   | 54            |
| Руденко Н.Н.    | 31, 48, 52    |
| Румянцева В.Д.  | 124           |
| Рязанцев М.Н.   | 94, 100       |

## С

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| Савченко Т.В.             | 34  |
| Сахаров Д.И.              | 173 |
| Свистунова Н.Ю.           | 88  |
| Семенов А.Ю.              | 22  |
| Семёнов А.Ю.              | 14  |
| Семёнов Ю.С.              | 148 |
| Семякина-Глушковская О.В. | 110 |
| Сенатская Е.В.            | 188 |

|                 |          |
|-----------------|----------|
| Сидоров Д.В.    | 102, 148 |
| Силецкий С.А.   | 24, 144  |
| Симакова В.Ю.   | 104      |
| Синетова М.А.   | 150      |
| Синецких В.А.   | 134      |
| Синюшкина С.    | 72       |
| Сироткина М.А.  | 104      |
| Скарилкина К.А. | 180, 182 |
| Слонимский Ю.Б. | 150      |
| Случанко Н.Н.   | 150      |
| Смирнов П.Д.    | 36       |
| Советский А.А.  | 104      |
| Соломатина П.В. | 122      |
| Спацанский Р.   | 72       |
| Степанова Л.В.  | 115      |
| Стрельцова О.С. | 97       |
| Строкина В.В.   | 152      |
| Субочев П.      | 72       |
| Суворов Н.В.    | 124      |
| Сударев В.В.    | 142      |
| Сухов В.С.      | 157      |

## Т

|                |         |
|----------------|---------|
| Тимофеев И.В.  | 54      |
| Ткачева Е.В.   | 64, 108 |
| Ткаченко О.Б.  | 66      |
| Тодоренко Д.А. | 50      |
| Томилин Ф.Н.   | 171     |
| Трубицина Л.И. | 20      |
| Трунькин И.Н.  | 155     |
| Турчин И.В.    | 33      |
| Тучин В.В.     | 68, 90  |
| Тучина Е.С.    | 82      |
| Тырышкина Л.Е. | 54      |
| Тютерева Е.В.  | 16, 57  |

## У

|              |          |
|--------------|----------|
| Угарова Н.Н. | 164, 168 |
| Усачев М.Н.  | 124      |

|                 |             |                   |          |
|-----------------|-------------|-------------------|----------|
| <b>Ф</b>        |             | Шишкин А.Ю.       | 128, 148 |
|                 |             | Шишова М.Ф.       | 36       |
| Федосов И.В.    | 110         | Шпилевский С.Н.   | 40       |
| Федотов Д.А.    | 140         | Шушунова Н.А.     | 68, 90   |
| Филатова Е.В.   | 130         |                   |          |
| Фирсов М.Л.     | 130         | <b>Щ</b>          |          |
| Фомин В.В.      | 173         | Щелкова В.В.      | 124      |
| Фомин С.В.      | 97          | Щеславский В.И.   | 84       |
| <b>Х</b>        |             |                   |          |
|                 |             | <b>Ю</b>          |          |
| Хилажева Е.     | 110         | Юдина Л.М.        | 157      |
| Хлебцов Б.Н.    | 68          | Юлин В.С.         | 97       |
| Хрулёв А.Е.     | 97          |                   |          |
| Хрущёв С.С.     | 59, 61      | <b>Я</b>          |          |
| Худякова А.Ю.   | 132, 152    | Яголович А.       | 72       |
| <b>Ц</b>        |             |                   |          |
| Цораев Г.В.     | 150         | <b>Т</b>          |          |
| Цыганков А.А.   | 155         |                   |          |
| <b>Ч</b>        |             | Taldaev A.K.      | 138      |
| Червицов Р.Н.   | 59, 61      | <b>Z</b>          |          |
| Черепанов Д.А.  | 150         | Zagryadskaya Y.A. | 138      |
| Черноок А.Г.    | 88          |                   |          |
| Чурилина А.А.   | 106         |                   |          |
| Чуркин М.С.     | 119         |                   |          |
| Чуфицкий С.В.   | 61          |                   |          |
| <b>Ш</b>        |             |                   |          |
| Шабанов А.В.    | 11, 54      |                   |          |
| Шагабаева М.А.  | 86, 124     |                   |          |
| Шапошников А.А. | 125         |                   |          |
| Шарабарина Т.В. | 82          |                   |          |
| Шахов А.М.      | 95          |                   |          |
| Шевцов М.Б.     | 162         |                   |          |
| Шелепова О.В.   | 64, 66, 108 |                   |          |
| Шефер А.Д.      | 10          |                   |          |
| Ширманова М.В.  | 84          |                   |          |
| Широков А.А.    | 110         |                   |          |

Российское фотобиологическое общество  
Институт фундаментальных проблем биологии РАН –  
обособленное подразделение ФИЦ «Пушкинский научный центр  
биологических исследований РАН»  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Научное издание

ХІ СЪЕЗД РОССИЙСКОГО  
ФОТОБИОЛОГИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА И  
ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФОТОБИОЛОГИИ»

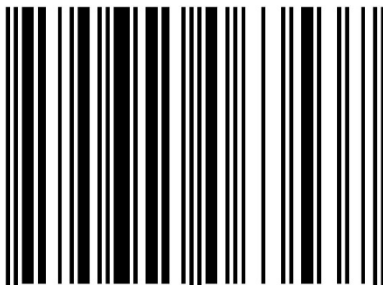
16 – 21 августа 2026 года  
Выборг

Сборник тезисов

Материалы изданы в авторской редакции

Подписано в печать 15.08.2026. Формат 60x84/16  
Усл. печ. л. 11.28

ISBN 978-5-6050635-3-7



9 785605 063537 >