

Лаборатория фотосинтетического окисления воды

Состав лаборатории:

Савченко Татьяна Викторовна, д.б.н., доцент, в.н.с., вр.и.о. заведующей лабораторией;

Аллахвердиев Сулейман Ифхан-оглы, д.б.н., профессор, г.н.с.;

Жармухамедов Сергей Куштаевич, к.б.н., доцент, в.н.с.;

Хоробрых Андрей Альфредович, к.б.н., в.н.с.;

Христин Михаил Сергеевич, к.б.н., в.н.с.;

Шутилова Надежда Ивановна, д.б.н., в.н.с.;

Застрижная Ольга Михайловна, к.б.н., с.н.с.;

Пиголев Алексей Васильевич, к.б.н., с.н.с.;

Терентьев Василий Валерьевич, к.б.н., с.н.с.;

Тихонов Константин Геннадьевич, к.б.н., с.н.с.;

Шитов Александр Васильевич, к.б.н., с.н.с.;

Яныкин Денис Валерьевич, к.б.н., с.н.с.;

Смолова Татьяна Николаевна, н.с.;

Маевская Зоя Васильевна, главный специалист;

Антропова Татьяна Михайловна, главный инженер;

Абрамова Галина Михайловна, инженер;

Шукшина Анна Константиновна, аспирант.

Возникновение кислородного фотосинтеза – одно из самых важных эволюционных событий в биосфере Земли, которое произошло около 2,5-3 млрд. лет назад, и до сих пор определяет облик планеты. Кислородный фотосинтез является практически единственным естественным источником молекулярного кислорода, необходимого для аэробной жизни планеты. Фотохимические процессы, результатом которых является окисление воды и образование кислорода, протекают в специализированном пигмент-белково-

липидном комплексе, названном фотосистемой 2 (ФС2), пронизывающем тилакоидную мембрану фотосинтезирующих организмов. Участок ФС2, в котором происходит окисление воды, называют водоокисляющим комплексом (ВОК). Исследование процесса фотосинтетического окисления воды в ВОК и изучение устойчивости ФС2 в процессе функционирования - важнейшие фундаментальные проблемы современной биологии, решением которых занимается лаборатория фотосинтетического окисления воды ИФПБ РАН. Сотрудниками лаборатории и, в первую очередь, профессором Вячеславом Васильевичем Климовым, который руководил лабораторией на протяжении 35 лет, внесен существенный вклад в понимание молекулярной организации и механизмов функционирования ФС2. В значительной степени благодаря революционным работам лаборатории, которые были признаны мировым научным сообществом, оформились современные представления о роли феофитина в процессе первичного разделения зарядов в ФС2 и механизмах образования переменной флуоресценции хлорофилла. Климов В.В. с соавторами были одними из первых, кому удалось измерить значения окислительно-восстановительных потенциалов первичных доноров и акцепторов электрона в ФС2. Благодаря исследованиям, проведенным в лаборатории, было выявлено влияние ионов бикарбоната на стабильность комплекса ФС2 и на скорость переноса электрона на донорной стороне ФС2, и показана значимость ассоциированной с ФС2 карбоангидразной активности для функционирования этого участка цепи переноса электрона.

Лаборатория хорошо известна в международном научном сообществе благодаря публикациям в ведущих российских и международных журналах и высокому уровню цитируемости работ. Коллектив лаборатории сотрудничает с всемирно известными учёными в области фотосинтеза, участвует в проектах Российского научного фонда (РНФ), Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), программы Президиума РАН «Молекулярная и клеточная биология» (МКБ). Кроме научно-исследовательской работы сотрудники лаборатории активно занимаются образовательной деятельностью, каждый год лаборатория принимает студентов из ведущих вузов страны для прохождения производственных практик, в лаборатории осуществляется выполнение бакалаврских и магистерских работ студентов, а также диссертационных работ аспирантов.

Для решения научных задач в лаборатории используется мультидисциплинарный подход с привлечением методов биофизики, биохимии, молекулярной биологии и физиологии растений. Объектами исследования служат модельные организмы и сельскохозяйственные культуры, включая цианобактерии (*Synechocystis sp. PCC 6803*, *Spirulina*

platensis), одноклеточные водоросли (*Chlamydomonas reinhardtii*) и высшие растения (арабидопсис, шпинат, горох, виноград, пшеница).

Основные направления исследований лаборатории:

I. Молекулярная организация и регуляция функциональной активности ФС2

1. Фотосборка, стабилизация и деградация водоокисляющего комплекса ФС2 (фотозависимое формирование марганцевого кластера, механизмы его стабилизации).
2. Фотообразование активных форм кислорода (АФК) в ФС2 и их дезактивация. Взаимодействие кислорода и АФК с компонентами ФС2. Роль АФК в фотоинактивации ФС2.
3. Роль внешних белков ФС2 в формировании, стабилизации и функционировании водоокисляющего комплекса оксигенных организмов. Биохимические свойства белков PsbO, PsbP и PsbQ. Исследование полифункциональности белка PsbO (Mn^{2+} оксидазная, карбоангидразная, супероксиддисмутазная, АТФ-азная, протон-транспортирующая активности, связывание ионов кальция и марганца). Исследование роли цитохрома *c* в функционировании фотосистемы 2 цианобактерий.
4. Исследование механизмов действия стрессовых факторов на структурно-функциональную организацию ФС2. Устойчивость фотосинтетического аппарата к стрессам окружающей среды (высокие и низкие температуры, свет высокой интенсивности, дегидратация и др.).
5. Изучение действия функционально-активных веществ, способных модулировать работу ФС2: синтетические металлсодержащие органические комплексы - искусственные аналоги природного водоокисляющего комплекса ФС2; ADRY-соединения (ADRY - Acceleration of Deactivation Reactions of the Water-Oxidizing Complex Y); агенты, модифицирующие перенос электрона на фотосинтетических мембранах (ингибиторы электронного транспорта, акцепторы и доноры электронов).
6. Реконструкция ФС2 (в том числе препаратов реакционного центра D1-D2-cyt/B559) с использованием природных и синтетических компонентов (химических моделей ВОК, комплексов ионов Mn с белками, включая белок PsbO).

II. Роль ионов бикарбоната и карбоангидразной активности в регуляции и функционировании фотосистемы 2

1. Исследование карбоангидразной активности компонентов ФС2 высших растений.

2. Функциональная роль карбоангидразы САНЗ в работе водоокисляющего комплекса ФС2 одноклеточной зеленой водоросли *Chlamydomonas reinhardtii*.
3. Исследование влияния ионов бикарбоната на механизм электрохимического окисления марганца в искусственных системах.
4. Поиск и разработка новых ингибиторов карбоангидразной активности. Определение констант ингибирования карбоангидразной активности для этих ингибиторов при воздействии на карбоангидразы разных классов.

III. Кортикулярный фотосинтез.

1. Структурно-функциональная организация ФС2 кортикулярного фотосинтетического аппарата.
2. Исследование структурных и функциональных особенностей кортикулярного фотосинтетического аппарата, определяющих его высокую устойчивость к низким температурам. Роль кортикулярного фотосинтеза в формировании устойчивости многолетних растений к низкотемпературным стрессам.

IV. Регуляторные функции оксипинов в формировании защитных ответов растений.

1. Изучение регуляторных функций оксипинов алленоксидсинтазной и гидропероксидлиазной ветвей в формировании защитных ответов растений в условиях абиотических стрессов.
2. Генетическая модификация растений пшеницы, направленная на изменение экспрессии генов пути биосинтеза жасмонатов, с целью повышения устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды.

Гранты:

1. Программа Президиума РАН «Молекулярная и клеточная биология» «Структурно-функциональные исследования молекулярных преобразователей световой энергии при фотосинтезе» (Руководитель Шувалов В.А.).
2. РФФИ № 14-14-00535 «Молекулярные основы взаимодействия кислорода и его активных форм с ключевыми участниками световых стадий фотосинтеза» (Руководитель Хоробрых А.А.).
3. РФФИ №17-04-01011 «Исследование роли бикарбоната в фотоформировании, функционировании и стабилизации водоокисляющего комплекса фотосистемы 2» (Руководитель Тихонов К.Г.).

4. РФФ №16-14-10155 «Изучение регуляторных функций оксипинов алленоксидсинтазной ветви в пшенице посредством сверхэкспрессии и подавления экспрессии генов ферментов биосинтетического пути» (Руководитель Савченко Т.В.).
5. РФФИ №15-04-01551 «Изучение регуляторных функций оксипинов алленоксидсинтазной и гидропероксидазной ветвей в формировании защитных ответов растений в условиях абиотических стрессов (Руководитель Савченко Т.В.).

Избранные статьи:

1. Yanykin, D.V., Khorobrykh, A.A., Terentyev, V.V., Klimov V.V. Two pathways of photoproduction of organic hydroperoxides on the donor side of photosystem 2 in subchloroplast membrane fragments. *Photosynthesis Research* 2017, 133(1-3):129-138, IF 4.122
2. Tikhonov K., Khristin M., Klimov V., Sundireva M., Kreslavski V., Sidorov V., Tsidendambayev V., Savchenko T. Structural and functional characteristics of photosynthetic apparatus of chlorophyll-containing grape vine tissue. *Russian Journal of Plant Physiology* 2017, 64 (1):73–82, IF 0.737
3. Savchenko T., Yanykin D., Khorobrykh A., Terentyev V., Klimov V., Dehesh K. The hydroperoxide lyase branch of the oxylipin pathway protects against photoinhibition of photosynthesis. *Planta* 2017, 245(6):1179-1192 IF 3.239
4. Yanykin D.V., Khorobrykh A.A., Mamedov M.D., Klimov V.V. Trehalose protects Mn-depleted photosystem 2 preparations against the donor-side photoinhibition. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 2016, 164: 236-243, IF 3.188,
5. Khorobrykh A.A., Yanykin D.V., Klimov V.V. Enhancement of photoassembly of the functionally active water-oxidizing complex in Mn-depleted photosystem II membranes upon transition to anaerobic conditions. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 2016, 163:211-5, IF 3.188
6. Yanykin D. V., Khorobrykh A. A., Mamedov M. D., Klimov V. V. Trehalose stimulation of photoinduced electron transfer and oxygen photoconsumption in Mn-depleted photosystem 2 membrane fragments. *Journal of Photochemistry and Photobiology B.* 2015, 152(Pt B):279-285, IF 3.188
7. Savchenko T., Kolla V., Wang C.Q., Nasafi Z., Hicks D., Phadungchob B., Chehab W., Brandizzi F., Froehlich J., Dehesh K. Functional convergence of oxylipin and ABA pathways controls stomatal closure in response to drought. *Plant Physiology* 2014, 164(3):1151-60 IF 6.555
8. Savchenko T.V., Zastrijnaja O.M., Klimov V.V. Oxylipins and Plant Abiotic Stress Resistance. *Biochemistry (Moscow)* 2014, 79 (4), 362-375 IF 1.149

9. Yanykin D.V., Khorobrykh A.A., Khorobrykh S.A. and Klimov V.V., Flash-induced consumption of molecular oxygen on the donor side of photosystem II in Mn-depleted subchloroplast membrane fragments: specific effects of manganese and calcium ions. *Photosynthesis Research* 2013, 117, 367-374 IF 4.122
10. Savchenko T., Pearse I., Ignatia L., Karban R., Dehesh K. Insect herbivores selectively suppress the HPL branch of the oxylipin pathway in host plants. *The Plant Journal* 2013, 73(4):653-62 IF 6.582
11. Yanykin D. V., Khorobrykh A. A., Zastrizhnaya O. M., and Klimov V. V. Interaction of Molecular Oxygen with the Donor Side of Photosystem II after Destruction of the Water_Oxidizing Complex. *Biochemistry (Moscow)* 2014, 79(3):205-212 IF 1.421
12. Khorobrykh A., Dasgupta J., Kolling D., Terentyev V., Klimov V., Dismukes G. Evolutionary origins of the water oxidation cluster in oxygenic photosystem II: bicarbonate permits Mn²⁺ photo-oxidation by anoxygenic bacterial reaction centers. *ChemBioChem* 2013, 14, 1725-1731.
13. Xiao Y., Savchenko T., Baidoo E., Chehab W., Hayden D., Tolstikov V., Corwin J., Kliebenstein D., Keasling J., Dehesh K. Retrograde signaling by the plastidial metabolite MEcPP induces selected stress responses. *Cell* 2012, 149, 1525-1535 IF 31.957
14. Shitov A. V., Zharmukhamedov S. K., Shutova T. V., Allakhverdiev S. I., Samuelsson G., Klimov V. V. A carbonic anhydrase inhibitor induces bicarbonate-reversible suppression of electron transfer in pea photosystem 2 membrane fragments. *Journal of Photochemistry and Photobiology B.*; 2011 104(1-2):366-371 IF 3.188
15. Terentyev V.V., Shkuropatov A.Y., Shkuropatova V.A., Shuvalov V.A. and Klimov V.V. Investigation of the redox interaction between Mn-bicarbonate complexes and reaction centers from *Rhodobacter sphaeroides* R-26, *Chromatium minutissimum*, and *Chloroflexus aurantiacus*. *Biochemistry (Moscow)* 2011, 76 (12), 1360-1366
16. Suleyman I. Allakhverdiev, Tatsuya Tomo, Yuichiro Shimada, Hayato Kindo, Ryo Nagao, Vyacheslav V. Klimov, and Mamoru Mimuro. Redox potential of pheophytin a in photosystem II of two cyanobacteria having the different special pair chlorophylls. *Proceeding of National Academy of Sciences USA* 2010, 107(8): 3924–3929 IF 9.661
17. Shitov A. V., Pobeguts O. V., Smolova T. N., Allakhverdiev S. I., Klimov V.V. Manganese-dependent carboanhydrase activity of photosystem II proteins. *Biochemistry (Moscow)* 2009, 74(5):509-517 IF 1.421.
18. Khorobrykh A.A., Terentyev V.V., Zharmukhamedov S.K. and Klimov V.V. Redox interaction of Mn-bicarbonate complexes with reaction centres of purple bacteria. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 2008, 363, 1245-1251.

19. Shutova T., Kenneweg H., Buchta J., Nikitina J., Terentyev V.V., Chernyshov S., Andersson B., Allakhverdiev S.I., Klimov V.V., Dau H., Junge W., Samuelsson G. The photosystem II-associated Cah3 in Chlamydomonas enhances the O₂ evolution rate by proton removal. *European Molecular Biology Organisation Journal* 2008, 27, 782-791