

В настоящее время все больше усугубляются экологические проблемы, возникающие при использовании традиционных ископаемых видов топлива. Происходит повышение средней температуры атмосферы Земли. Кроме того, происходит загрязнение почв и вод нефтью и продуктами ее сгорания. Таким образом становится очевидной необходимость перехода цивилизации с ископаемых на альтернативные экологически чистые источники энергии. В этом отношении молекулярный водород является перспективным экологически чистым топливом. В современной промышленности водород получают в основном из ископаемых видов топлива, но также активно во всем мире проводятся исследования, направленные на изучение механизмов преобразования солнечной энергии в водород как искусственными полупроводниковыми, так и разными биологическими системами. Принципиальными проблемами, требующими решения для практической реализации фотобиологических систем, являются эффективность преобразования энергии света и/или органических соединений в водород и удельная скорость процесса. Преобразование энергии света возможно как биологическими системами на основе консорциума микроорганизмов, так и на основе монокультур, или на основе отдельных белковых комплексов и молекул (как самих по себе, так и встроенных в биотехнологические устройства, например, электроды топливных элементов).

При этом для перехода на водородную энергетику необходимо не только получать водород экологически чистым путем. Необходимо разработать системы эффективной трансформации энергии, запасенной в водороде, в электричество и наоборот, запастись произведенное электричество в виде водорода. Для преобразования полученного водорода в электрический ток используются топливные элементы с твердым электролитом, в которых в качестве катализатора используется платина, что не позволяет широко использовать такие топливные элементы. Вместе с тем в качестве заменителей платины возможно использование ферментов, осуществляющих перенос электронов на электрод при поглощении водорода.

В лаборатории биотехнологии и физиологии фототрофных организмов проводятся исследования «горячих точек» на разных уровнях организации биологических систем, способных к преобразованию световой энергии.

В качестве объектов исследований используются естественные и трансформированные микроорганизмы, относящиеся к различным систематическим группам: одноклеточным водорослям (*Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella pyrenoidosa* и др.), пурпурным серным бактериям (*Thiocapsa roseopersicina*), пурпурным несерным бактериям (*Rba. capsulatus*, *Rba. sphaeroides*, *Rhodospseudomonas palustris* и др.), цианобактериям (*Anabaena* sp. и др.) и др. Помимо изучения физиологии перечисленных организмов и проведения работ по повышению эффективности образования ими водорода, в лаборатории проводятся исследования по получению из биомассы микроорганизмов ценных соединений.

Основные направления исследований.



Цыганков Анатолий Анатольевич, д.б.н., зав. лабораторией
1. Изучение гидрогеназ.



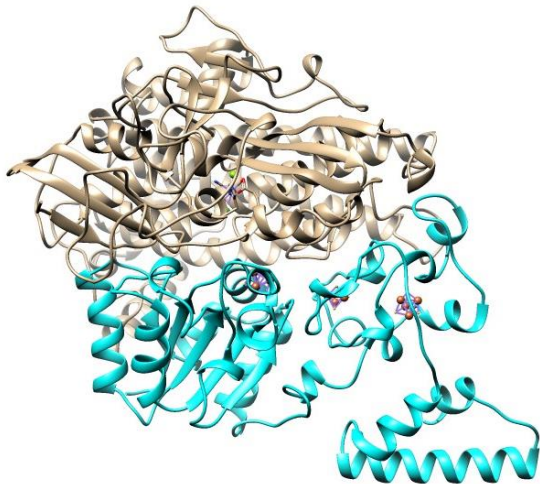
В.н.с., к.б.н. Н.А. Зорин, с.н.с., к.б.н. О.П. Сердюк, с.н.с., к.б.н. Е.П. Петушкова, асп. м.н.с. М.Х. Хасимов, н.с., к.б.н. А.Н. Хуснутдинова, н.с., к.б.н. Батырова Х.А., вед. инж. В.А. Морозова

Гидрогеназы - это ферменты, катализирующие активацию молекулярного водорода. В зависимости от структуры гидрогеназы, синтезируемой микроорганизмом, ее локализации, а также природного донора/акцептора электрона, она может участвовать в поглощении или выделении водорода микроорганизмами.

Из пурпурной серной бактерии *Thiocapsa roseopersicina* уже полвека назад выделена термостабильная гидрогеназа HydSL, которая изучается в лаборатории БФФО как с точки зрения механизма функционирования, так и в целях практического применения. Этот фермент обладает высокой стабильностью: имеет температурный оптимум около 80 °С, способен к активации молекулы H_2 в присутствии O_2 . Данные характеристики фермента, наряду с его способностью к переносу электронов на электрод при поглощении/выделении водорода, делают его перспективным для создания водородных электродов.

Полученные результаты

- Показано, что гидрогеназный электрод способен функционировать в условиях водород-выделяющего био-реактора с кластридиальным консорциумом и тем самым осуществлять прямую конверсию биоводорода в электрический ток с одновременной очисткой среды от органики.
- Проведены исследования воздействия широкого спектра ферментативных ингибиторов на HydSL гидрогеназу *Thiocapsa roseopersicina*. Показано, что газообразные ингибиторы (CO , O_2 , C_2H_2) обратимо взаимодействуют с активным центром гидрогеназы без воздействия на структуру фермента. Ионы тяжелых металлов (Hg^{2+} , Ag^{2+}) и цианид необратимо ингибируют гидрогеназу и оказывают значительное воздействие на её структуру. Токсическое действие ионов тяжелых металлов приводит также к разрушению активного центра фермента. Определены константы бимолекулярного взаимодействия ионов ртути ($3,95 M^{-1} \cdot мин^{-1}$) и серебра ($57,3 M^{-1} \cdot мин^{-1}$) с гидрогеназой при 20оС. Установлена степень снижения стабильности гидрогеназы в широком диапазоне температуры (20 -70 оС) в присутствии ионов этих металлов. Взаимодействие цианида с гидрогеназой приводит к разрушению железосерных кластеров, но не влияет на активный центр. При этом подобраны условия реактивации гидрогеназы за счет восстановления железосерных кластеров.



Обнаружено, что реакция, в которой участвует HydSL гидрогеназа внутри клеток – это восстановление молекулярной серы до сероводорода в присутствии молекулярного водорода. С помощью гомологичного моделирования получена трёхмерная структура гидрогеназы HydSL, а также родственной ей гидрогеназы из *Alteromonas macleodii*. Проведен докинг гидрогеназы с потенциальными партнерами (Isp1 и Isp2) и показано, что С-концевой домен малой субъединицы HydS участвует в заякоривании димера в мембране, взаимодействуя в альфа спиралями Isp1. В настоящее время проводятся работы по выделению комплекса HydSL гидрогеназы с его природными партнерами, способного к восстановлению серы до сероводорода в присутствии водорода.

2. Исследование водородного метаболизма фототрофных организмов и перспектив его промышленного применения.

Изучение водородного метаболизма и возможностей его модификации актуально в переходе на альтернативный источник энергии – биоводород. Существует несколько способов получения водорода биологическим путём с использованием микроорганизмов:

1. Биофототоллиз воды (прямой и непрямой). С помощью микроводорослей или цианобактерий. Образование молекулярного водорода при прямом биофототоллизе воды осуществляется с участием гидрогеназы, чувствительной к кислороду. При непрямом биофототоллизе за образование водорода ответственна нитрогеназа и/или гидрогеназа.
2. Фото-ферментация – это светозависимое образование водорода с участием нитрогеназы в условиях дефицита источника азота при фотоброжении глюкозы и окисления простых жирных кислот в цикле трикарбоновых кислот у бактерий, осуществляющих аноксигенный фотосинтез. Наиболее перспективными продуцентами водорода данным способом являются пурпурные несерные бактерии, продемонстрировавшие наибольшую эффективность преобразования энергии и способность использовать большое разнообразие углеродных субстратов.
3. Образование водорода в процессе темновой ферментации органических веществ, осуществляемой облигатными и факультативными анаэробами. Помимо водорода продуктами данного процесса являются углекислота и такие метаболиты, как ацетат, лактат, этанол и др.
4. Гибридные системы, содержащие разные виды микроорганизмов. Например, одновременное использование культур, осуществляющих биосинтез водорода при темновой ферментации (кlostридиальный консорциум) и фото-ферментации органических соединений (пурпурные несерные бактерии) позволяет повысить эффективность процесса и уменьшить количество метаболитов, содержащихся в растворе. Последний факт делает процесс выгодным не только с точки зрения получения биоводорода, но и очистки сточных вод от органических загрязнителей.

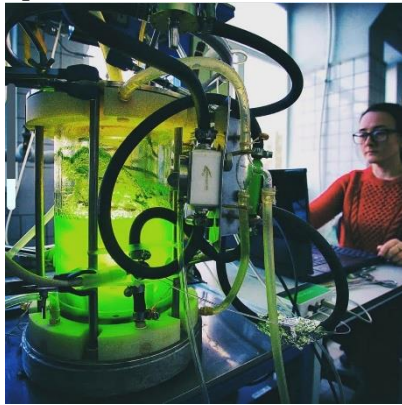
2.1. Изучение биофототоллиза воды микроводорослями и циано-бактериями.



В.н.с., к.б.н. Т.В.Лауринавичене, н.с., к.б.н. А.И. Романова, м.н.с. В.И. Гречаник, вед. инж. Ю.В. Сенина

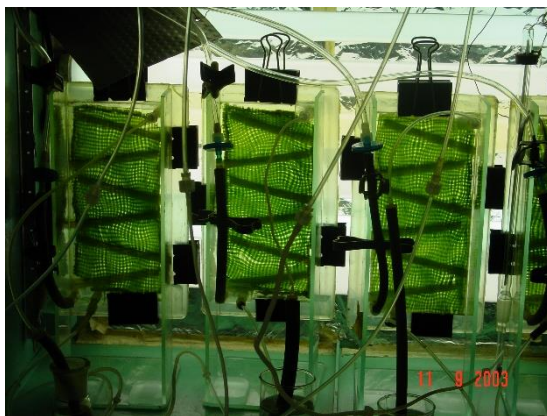
Полученные результаты:

- Впервые детально изучены стадии адаптации микроводорослей к серному голоданию с одновременным выделением водорода
- Впервые показано, что в процессе выделения водорода при недостатке серы происходит как прямой так и непрямой биофотоллиз воды, причем соотношение этих процессов зависит от стадии адаптации микроводорослей к серному голоданию



- Впервые показано, что выделение водорода при недостатке серы возможно и в фотоавтотрофных условиях, то есть процесс способен запасать энергию света
- Впервые показано, что выделение водорода возможно и при недостатке фосфора
- Впервые показано, что выделение водорода возможно и в морской воде
- Впервые показано, что в регуляции фотосистемы 2 при недостатке элементов питания могут быть задействованы различные механизмы, (уровень восстановленности пула пластохинонов, разобщение фотосистемы 2 и водоокисляющего комплекса за счет вовлечения аскорбата в донирование электронов, градиент протонов на мембране, нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла и др),

фотосистемы 2 и водоокисляющего комплекса за счет вовлечения аскорбата в донирование электронов, градиент протонов на мембране, нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла и др),



- Впервые показано, что иммобилизация микроводорослей на прозрачном носителе (пористое стекло, стеклоткань) при недостатке серы приводит к увеличению скорости выделения водорода, его стабильности и длительности (4 работы, обобщено в Tsygankov, Kosourov, 2014)

• Для выполнения эти работ впервые произведено сопряжение автоматизированного фотобиореактора и ПАМ флуориметра

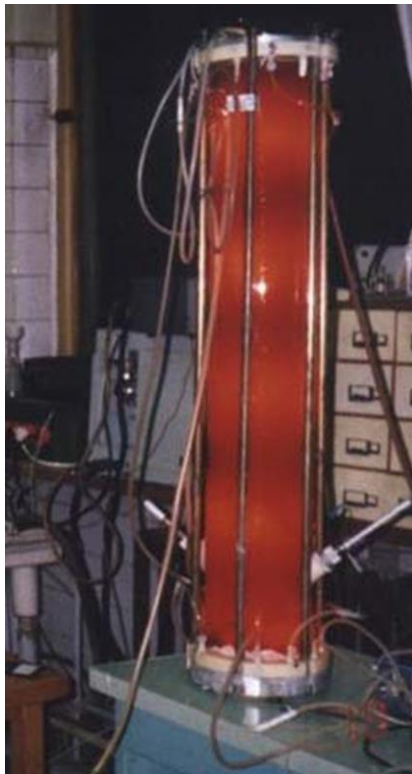
- Впервые для получения культур голодающих в недостатке элементов питания разработан и применен метод «разведения» культур.
- Также в лаборатории исследуется выделение водорода цианобактериями, которое осуществляется в гетероцистах. Исследованы мутанты цианобактерий по водород-поглощающей гидрогеназе, которые показали выделение водорода в условиях культивирования в закрытых фотобиореакторах, расположенных непосредственно в условиях внешней среды.

2.2. Изучение выделения водорода пурпурными несерными бактериями.

В.н.с., к.б.н. Т.В.Лауринавичене, зав. лаб. А.А. Цыганков

Пурпурные несерные бактерии осуществляют выделение водорода в фотогетеротрофных условиях роста с использованием преимущественно органических кислот. В лаборатории исследуются разные системы генерации водорода с участием этих бактерий:

Полученные результаты:



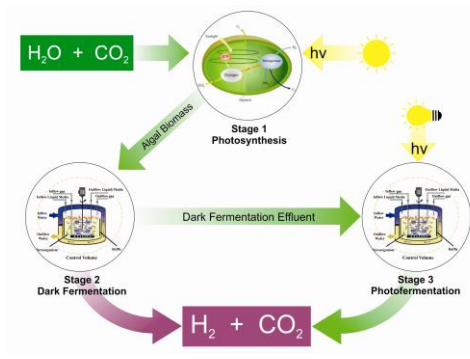
- Разработаны фотобиореакторы для культивирования аноксигенных фототрофных микроорганизмов в темноте
- Впервые произведено сопряжение автоматизированного фотобиореактора и ПАМ флуориметра
- Показано, что наибольшей скоростью выделения водорода обладают непрерывные культуры пурпурных бактерий в режиме хемостата с лимитированием источником азота
- - С использованием монокультур пурпурных бактерий – исследовано выделение водорода штаммами *Rhodobacter sphaeroides* с редуцированным фотосинтетическим аппаратом. Показано, что способность этих штаммов выделять водород при высоких интенсивностях света превышает таковую для родительского штамма, что говорит о перспективности их исследования в дальнейшем. Используя автоматизированные системы культивирования, исследована способность пурпурных несерных бактерий к выделению водорода в условиях недостатка азота при различном

содержании биомассы в культуральной суспензии.



- Разработан метод иммобилизации пурпурных бактерий на пористом стекле и показано, что скорость выделения водорода в фотобиореакторе с пористым стеклом достигала $3,8 \text{ мл H}_2 \text{ мл}^{-1} \text{ культуры ч}^{-1}$.
- - С использованием двухстадийных систем, включающих на первой стадии темновую ферментацию сложных субстратов (крахмал, картофельный гомогенат, послеспиртовая барда) кластридиальным консорциумом и на второй стадии фотоферментацию полученных органических кислот пурпурными бактериями. Это позволяет увеличить выход водорода и добиться более полной очистки стоков.

Исследовано влияние различных ингибиторов (кислот, спиртов, ацетона, металлов) на выделение водорода пурпурными серными бактериями. Выходы водорода составили до 12 литров на 1 литр послеспиртовой барды.

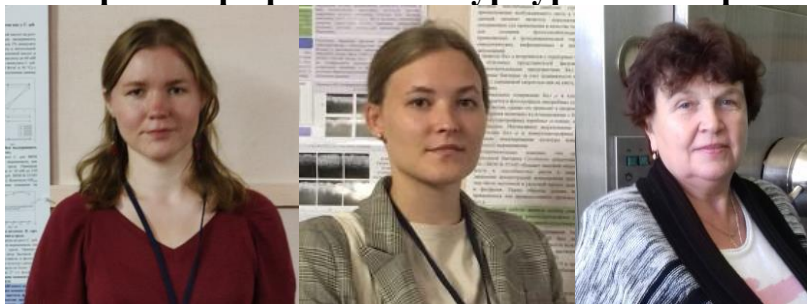


- С использованием многостадийных систем, направленных на использование биомассы водорослей для конверсии солнечной энергии в водород использовали систему включающую: культивирование микроводорослей в фотолитоавтотрофных условиях; химический гидролиз биомассы; темновое брожение гидролизата кластридиальным консорциумом; фотовыделение водорода пурпурными

несерными бактериями.

- С использованием смешанных культур кластридий и пурпурных бактерий проведено исследование выделения водорода при ферментации крахмала. Показано, что эффективность выделения водорода в смешанных культурах повышается, причем рост кластридий подавлен.

3. Разработка технологии промышленного получения бактериохлорофилла *a* из пурпурных несерных бактерий.



М.н.с. О.О. Чудакова, асп., м.н.с. П.А. Старыгина, вед. инженер З.В. Соболева



Бактериохлорофилл *a*, основной пигмент фотосинтетических реакционных центров пурпурных несерных бактерий, является ценным сырьём для медицинской химии. На его основе синтезируют фотосенсибилизаторы – вещества, токсичные для клеток при освещении, которые используются в фотодинамической терапии онкологических заболеваний. В лаборатории разрабатывается технология интенсивного выращивания пурпурных несерных бактерий разных родов и видов. Также ведутся исследования регуляции биосинтеза бактериохлорофилла для повышения его выхода. Разработан лабораторный метод хемогетеротрофного культивирования пурпурных несерных бактерий разных родов, позволяющий получать до 60 г сухой биомассы в литре с содержанием бактериохлорофилла *a* до 11 мг/г сухой биомассы.

4. Исследование углеродного метаболизма пурпурных несерных бактерий.



С.н.с., к.б.н. Е.П. Петушкова, н.с., к.б.н. А.И. Романова, асп. м.н.с. Е.В. Майорова

Поскольку пурпурные бактерии являются ценными организмами для получения практически значимых химических соединений, весьма важным является изучение фундаментальных основ их жизнедеятельности, и в частности, углеродного метаболизма. В лаборатории исследуется возможность существования различных путей восполнения пула щавелевоуксусной кислоты (ЩУК) в цикле трикарбоновых кислот (ЦТК), у пурпурных несерных бактерий.

Проанализирован известный в настоящее время набор ферментативных реакций, в которых участвуют предшественники метаболитов ЦТК. Это позволило обнаружить цепочки ранее не установленных метаболических путей. Создана универсальная метаболическая схема путей восполнения пула ЩУК в ЦТК у прокариот. Ее анализ показал, что пути восполнения пула ЩУК имеют как общие, так и вариабельные участки. Учитывая обнаруженные закономерности, впервые осуществлена классификация данных путей по образуемому в них метаболиту, через который происходит восполнение пула ЩУК и предшественников ЩУК в ЦТК.

Полученные результаты

Собранная и систематизированная информация была успешно использована для изучения особенностей фотоассимиляции ацетата у пурпурной несерной бактерии *Rhodobacter capsulatus*.

5. Оценка возможности использования HydSL гидрогеназы в топливных элементах в качестве заменителя платины.



Зав. лаб., д.б.н. А.А. Цыганков, в.н.с., к.б.н. Н.А. Зорин, асп., м.н.с. М.Х. Хасимов

Водород является энергоносителем, удовлетворяющим всем требованиям зеленой энергетики. Он может быть произведен из воды, и продуктом его окисления также является вода. С использованием топливных элементов (ТЭ) энергия, запасенная в водороде, может быть преобразована в электричество с высокой эффективностью. При электролизе воды электрическая энергия может быть запасена в водороде также с высокой эффективностью. В распределенной энергетике, когда производство энергии приближено к конечному потребителю, запасаемый водород может использоваться в периоды, когда альтернативные источники энергии не производят энергии (например, ночью при использовании солнечных элементов). Для такой энергетики необходимы топливные элементы, причем из разных типов ТЭ предпочтительны ТЭ с твердым электролитом. Однако такие ТЭ имеют ряд недостатков, основным из которых является необходимость использования в качестве катализаторов благородных металлов. Возможной альтернативой благородных металлов являются ферменты.

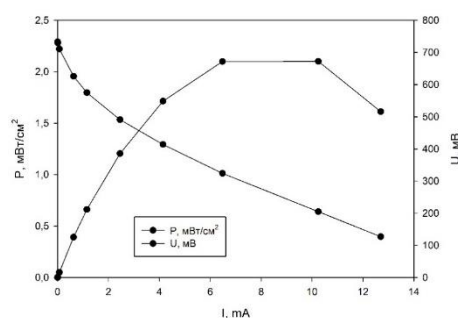
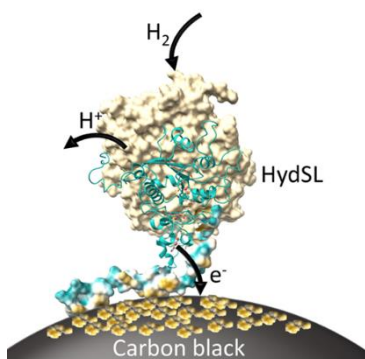
Гидрогеназа – фермент, катализирующий активацию молекулярного водорода. К настоящему времени описано более 1.5 тысяч различных структурных генов гидрогеназ. На основе содержания

в гидрогеназах металлов эти ферменты разделяются на NiFe, FeFe и Fe гидрогеназы. Впервые способность гидрогеназ к прямому переносу электронов на электрод была обнаружена почти 40 лет назад, и долгое время максимальные плотности тока при окислении водорода гидрогеназными электродами не превышали 1 mA cm^{-2} . При этом все исследования проводили, когда водородный электрод был погружен в буферный раствор. В 2014 г японские ученые показали, что возможен прямой перенос электронов с гидрогеназного электрода, который находится в атмосфере водорода без раствора, причем фермент из *Cytrobacter S7* по своей каталитической активности превосходит платину. После обнаружения этого факта следующим важным фактором, определяющим электрохимическую активность фермента, стало электрическое сопряжение гидрогеназ с электродом. Гидрогеназы, как и другие электроактивные ферменты, могут быть иммобилизованы на поверхности электрода физической адсорбцией, ковалентным связыванием, заключением в токопроводящую (часто электроактивную) матрицу и поперечной сшивкой. Физическая адсорбция основана на электростатическом или гидрофобном взаимодействии молекулы и поверхности электрода. При этом, поскольку молекула фермента анизотропна, для ориентированной иммобилизации необходимо учитывать свойства локального окружения центра внутри фермента, взаимодействующего с окружающей средой.

HydSL гидрогеназа *Thiocapsa bogorovii* относится к желозоникелевым гидрогеназам и отнесена к подгруппе 1e. Путем гомологичного моделирования и докинга со своим редокс партнером Isp1 показано, что C-домен ее малой субъединицы HydS представляет гидрофобную альфа спираль, погруженную в мембрану совместно с трансмембранным белком Isp1, причем в такой конфигурации ее дистальный FeS кластер располагается вблизи гема Isp1. Кажется естественным ориентированно иммобилизовать HydSL гидрогеназу путем сопряжения гидрофобного C-домена с поверхностью угольного электрода, который также является гидрофобным. В этом случае дистальный FeS кластер будет находиться вблизи поверхности электрода.

Полученные результаты

- Разработан метод ориентированной иммобилизации HydSL гидрогеназы на поверхности угольных электродов. Он основан на гидрофобном взаимодействии C-домена HydS с поверхностью электрода. Показано, что такой электрод, установленный в топливный элемент, развивает мощность более 2 mW cm^{-2} и токи при этой мощности более 6 mA cm^{-2} .



Вольтамперная характеристика ТЭ с гидрогеназным электродом

Гранты и договоры лаборатории с 2017 г

- РФФ: № 15-14-30007 «Природный и искусственный фотосинтез для получения энергоносителей», (РФФ), 2015-2017;
- РФФ №19-14-00255 «Разработка подходов к получению энергии биологическим путем» 2019-2021 с продолжением 2022-2023.
- Договор №081-2/64/2020/2 от 01.03.2021 г. с ФГУП «НЦ «Сигнал» на выполнение СЧ НИР

- Договор №129 от 23.12.2021 с ООО "Смартгигиена" «Оптимизация технологии выращивания и лиофилизации *Rhodospseudomonas palustris* для применения в консорциумах, предназначенных для биофильтров УЗВ»

Преподавательская деятельность.

За последние 10 лет в лаборатории подготовлено 8 кандидатских диссертаций, 11 магистерских и 12 бакалаврских диссертаций.

Участие в работе журналов

Цыганков А.А. являлся приглашенным редактором спецвыпусков ж. «Биохимия» (2015), *Biophysical Reviews* (2022, 2023)

Сотрудники лаборатории регулярно пишут рецензии на поданные рукописи в ряд журналов, прежде всего зарубежных

Публикации, способствующие популяризации науки:

1. Borisova-Mubarakshina M.M., Tsygankov A.A., Tomo T., Allakhverdiev S.I., Eaton-Rye J.J., Govindjee G. The 10th international conference on “Photosynthesis and Hydrogen Energy Research for sustainability”: A pictorial report in honor of Tingyun Kuang, Anthony Larkum, Cesare Marchetti and Kimiyuki Satoh. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 59, 29 November 2019, Pages 30927-30934
2. Borisova-Mubarakshina M.M., Tsygankov A.A., Tomo T., Allakhverdiev S.I., Eaton-Rye J.J., Govindjee G. International conference on “Photosynthesis and Hydrogen Energy Research for Sustainability-2019”: in honor of Tingyun Kuang, Anthony Larkum, Cesare Marchetti, and Kimiyuki Satoh. *Photosynthesis Research* <https://doi.org/10.1007/s11120-019-00687-w>
3. Tsygankov A.A., Solovchenko A. Microalgae as converters of light energy into biofuels and high-value products. *Biophysical Reviews*, 14, pp. 761-763 (2022). doi.org/10.1007/s12551-022-00975-1 (IF =3,33, Q1 по БД Scopus).
4. Tsygankov A. A., Riznichenko G., Rubin A., Solovchenko A., Tuchin V. Editorial for the special issue of biophysical reviews on the 9th Congress of the Russian society for photobiology held in Shepsi, Krasnodar region, Russia, on September 12–19, 2021. *Biophysical Reviews*, 14, pp. 743-749 (2022). doi.org/10.1007/s12551-022-00975-1 (IF = 3,33, Q1 по БД Scopus).
5. Tsygankov A. A., Tuchin V. Commentary to “Biophotonics of molecules and nanoparticles”: a session of the Russian Photobiology Society 9th Congress Shepsi, Krasnodar region, Russia; September 12–19, 2021. *Biophysical Reviews*, 14, pp. 759-760 (2022). doi.org/10.1007/s12551-022-00975-1 (IF = 3,33, Q1 по БД Scopus).

Научные публикации:

2017 г:

1. Nikolay A. Zorin, Alexey A. Zabelin, Anatoly Ya. Shkuropatov, Anatoly A. Tsygankov. Interaction of HydSL hydrogenase from *Thiocapsa roseopersicina* with cyanide leads to destruction of iron-sulfur clusters. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2017, 177, 190-197.
2. Петушкова Е.П., Цыганков А.А. / Метаболизм ацетата пурпурной несерной бактерии *Rhodobacter capsulatus* // *БИОХИМИЯ*, 2017, том 82, вып. 5, с. 786 – 807.
3. Laurinavichene T., Kitashima M., Nagashima K.V.P., Sato T., Sakurai H., Inoue K., Tsygankov A. Effect of growth conditions on advantages of hup⁻ strains for H₂ photoproduction by *Rubrivivax gelatinosus*. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2017, 42, 8497
4. Laurinavichene T., Laurinavichius K., Shastik E., Tsygankov A. Long-term hydrogen photoproduction from starch by co-culture of *Clostridium butyricum* and *Rhodobacter sphaeroides* in a repeated batch process. *Biotechnology Letters*, 2017, DOI: 10.1007/s10529-017-2486-z

2018

1. Абдуллатыпов А.В. Моделирование трёхмерной структуры Нох-гидрогеназ пурпурной серной бактерии *Thiocapsa roseopersicina* BBS // Вестник ВГУ, Серия: Химия, Биология, Фармация. — 2018. — №3. — С. 37–45.
2. Петушкова Е.П., Цыганков А.А. Возможности восполнения пула цикла трикарбоновых кислот у *Rhodobacter capsulatus* // Вестник ВГУ, Серия: Химия, Биология, Фармация. — 2018. — №3. — С. 136–145.
3. Сердюк О. П., Смольгина Л.Д., Христин М.С. Мембранносвязанный бактериофитохром-подобный комплекс фототрофной пурпурной несерной бактерии *Rhodospseudomonas palustris* // Доклады Академии Наук. — 2018. – Т. 482. № 6. doi: 10.1134/S1607672918050149
4. Laurinavichene T., Tekucheva D., Laurinavichius K., Tsygankov A. Utilization of distillery wastewater for hydrogen production in one-stage and two-stage processes involving photofermentation // *Enzyme Microbiol. Technology*. 2018. V. 110. p. 1-7. doi.org/10.1016/j.enzmictec.2017.11.009
5. Laurinavichene T., Tsygankov A. Inoculum density and buffer capacity are crucial for H₂ photoproduction from acetate by purple bacteria. *Int. J. Hydrogen Energy* 2018 V. 43. p. 18873-18882 doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.095
6. Petushkova E., Iuzhakov S., Tsygankov A. Differences in possible TCA cycle replenishing pathways in purple non-sulfur bacteria possessing glyoxylate pathway. *Photosynthesis Research*. 2018 DOI: 10.1007/s11120-018-0581-1

2019

1. Shastik E., Romanova A., Laurinavichene T., Petushkova E., Sakurai H., Tsygankov A. Plastic bags as simple photobioreactors for cyanobacterial hydrogen production outdoors in Moscow region. *International Journal of Energy and Environmental Engineering (IJEE)* published online 16 November 2019 DOI: 10.1007/s40095-019-00325-0
2. Timchenko M., Abdullatypov A., Kihara H., Timchenko A. Effect of Single Amino Acid Substitutions by Asn and Gln on Aggregation Properties of Bence-Jones Protein BIF. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019 Oct 20;20(20). pii: E5197. doi: 10.3390/ijms20205197.
3. Fedorchuk T.P., Khusnutdinova A.N., Flick R. , Yakunin A.F.. Site-directed mutagenesis and stability of the carboxylic acid reductase MAB4714 from *Mycobacterium abscessus*. *Journal of Biotechnology* 303 (2019) 72–79
4. Shastik E., Li L., Liu J.. New methods for hydrogen production by marine microalga *Chlorella pyrenoidosa* in natural seawater. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 29, (2019), Pages 14707-14714

2020

1. Романова А.И., Лауринавичене Т.В., Цыганков А.А. Особенности мутантов *Anabaena PCC 7120*ΔHUP с аминокислотными заменами в нитрогеназе. *Физиология растений*, 67, 214-224 (2020). Q2.
2. Сердюк О.П., Смольгина Л.Д., Ашихмин А.А. Новый тип светособирающего комплекса обнаружен при выращивании *Rhodospseudomonas palustris* в условиях низкой

интенсивности света. Доклады Российской Академии Наук. Науки о жизни. 491, 208–211 (2020). Doi:10.31857/S2686738920020237

3. Зорин Н.А., Стародубов А.С., Цыганков А.А. Действие Hg²⁺ на HydSL гидрогеназу пурпурной серной бактерии *Thiocapsa roseopersicina*. Прикладная биохимия и микробиология. 56(2), 135-140 (2020).
4. Abdullatypov A.V. Hup-Type Hydrogenases of Purple Bacteria: Homology Modeling and Computational Assessment of Biotechnological Potential. Int. J. Mol. Sci., 21(1), 366 (2020). doi:10.3390/ijms21010366. Q1.
5. Evgeny Shastik, Anastasiya Romanova, Tatyana Laurinavichene, Ekaterina Petushkova, Hidehiro Sakurai, Anatoly Tsygankov. Plastic bags as simple photobioreactors for cyanobacterial hydrogen. International Journal of Energy and Environmental Engineering 11,1–8 (2020). Doi: 10.1007/s40095-019-00325-0. Q2.
6. Evgeny Shastik; Ling Li; Litao Zhang; Ruiyang Qin; Wenjie Yu; Jianguo Liu. Some molecular aspects of hydrogen production by marine *Chlorella pyrenoidosa* under nitrogen deprivation condition in natural seawater. International Journal of Hydrogen Energy. 45, 13876-13883 (2020). doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.097 . Q1.
7. Vera Grechanik, Anastasiya Romanova, Ilya Naydov, Anatoly Tsygankov Photoautotrophic cultures of *Chlamydomonas reinhardtii*: sulfur deficiency, anoxia, and hydrogen production Photosynthesis Research. 143, 275–286 (2020).doi: 10.1007/s11120-019-00701-1. Q1.
8. Khorcheska A. Batyrova, Anna N. Khusnutdinova, Po-Hsiang Wang, Rosa Di Leo, Robert Flick, Elizabeth Edwards, Alexei Savchenko, and Alexander F. Yakunin Biocatalytic in vitro and in vivo FMN prenylation and (de)carboxylase activation. ACS Chemical biology. 15, 1874–1882 (2020). doi: 10.1021/acscchembio.0c00136. Q1.

2021

1. Зорин Н.А., Хуснутдинова А. Н., Стародубов А. С., Проскуряков И.И., Цыганков А.А. Реконструкция HydSL гидрогеназы *Thiocapsa bogorovii* BBS после ингибирования цианидом. Прикладная биохимия и микробиология, 57 (3), 145-250 (2021) DOI; 10.31857/S0555109921030168 (Q3).
2. Хасимов М.Х., Лауринавичене Т.В., Петушкова Е.П., Цыганков А.А. Связь водородного и серного метаболизма у пурпурных серных бактерий. Микробиология, 90 (5), 515-530 (2021) DOI: 10.31857/S0026365621050104 (Q4)
3. Grechanik V., Naidov I., Bolshakov M., Tsygankov A. Photoautotrophic hydrogen production by nitrogen-deprived *Chlamydomonas reinhardtii* cultures. Int. J. Hydrogen Energy, 46, 3565-3575 (2021) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.215> (Q1)
4. Khasimov M.Kh., Petushkova E.P., Khusnutdinova A.N., Zorin N.A. Batyrova Kh.A., Yakunin A.F., Tsygankov A.A. The HydS C-terminal domain of the *Thiocapsa bogorovii* HydSL hydrogenase is involved in membrane anchoring and electron transfer. Biochim. Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics, 1862 (12), 148492 (2021). DOI: 10.1016/j.bbabi.2021.148492 (IF= 3.991, Q1)
5. Mironov A.F., Ostroverkhov P., Tikhonov, Pogorylyu, Kirin N.S., Chudakova O.O., Tsygankov A.A., Grin M.A. Amino acid derivatives of natural chlorins as a platform for the creation of targeted photosensitizers in oncology. Fine Chemical Technologies, 15 (6), 16-33 (2021). DOI: 10.32362/2410-6593-2020-15-6-16-33

6. Tsygankov A.A., Rubin A.B., Tuchin V.V., Riznichenko G. Yu., Solovchenko A.E. Call for contributions to the Special Issue on the 9th Congress of the Russian Photobiological Society held in Shepsi, Krasnodar region, Russia, on September 12–19. *Biophysical Reviews*, 12, (2021) (IF=4,43 Scopus, Q1). DOI:10.1007/s12551-021-00905-7 (Published online, Nov 2021).
7. Petushkova E.P., Mayorova E.A., Tsygankov A.A. TCA Cycle Replenishing Pathways in Photosynthetic Purple Non-Sulfur Bacteria Growing with Acetate. *Life*, 11 (7), 1-37 (2021) DOI: 10.3390/life11070711 (IF= 3.817, Q1).
8. Trubitsina L.I., Abdullatypov A.V., Larionova A.P., Trubitsin I.V., Alferov S.V., Ponamoreva O.N., Leontievsky A.A. Expression of thermophilic two-domain laccase from *Catenuloplanes japonicus* in *Escherichia coli* and its activity against triarylmethane and azo dyes. *Peer J.*, 24 (9), 11646 (2021) DOI: 10.7717/peerj.11646. (IF =2.98, Q1 Scopus, Q2 Web of Science).
9. Grechanik V.I., Tsygankov A.A. Recent Advances in Microalgal Hydrogen Production. *Advances in Photosynthesis and Respiration Including Bioenergy and Related Processes* 47, p. 589-606 (2021). DOI:10.1007/978-3-030-67407-6_22.
10. Matichenkov V., Bocharnikova E., Romanova A., Douillet P. Growth of *Bacillus amyloliquefaciens* as influence by Si nutrition. *Archives of Microbiology*, 203, 4329–4336 (2021). DOI: 10.1007/s00203-021-02421-4. (IF= 2.552, Q3)

2022

1. Цыганков А.А., Старыгина П.А., Чудакова О.О., Хуснутдинова А.Н., Лауринавичене Т.В., Грин М.А., Миронов А.Ф., Филоненко Е.В. Пурпурная несерная бактерия *Sereibacter sphaeroides* – продуцент бактериохлорофилла а. Патент РФ №RU2774962 (24.06.2022).
2. Цыганков А.А., Старыгина П.А., Чудакова О.О. Способ культивирования пурпурных несерных бактерий с высоким содержанием бактериохлорофилла а. Патент РФ №RU2774963 (24.06.2022).
3. Чудакова О.О., Старыгина П.А., Хуснутдинова А.Н., Лауринавичене Т.В., Грин М.А., Миронов А.Ф., Филоненко Е.В., Цыганков А.А. Пурпурная несерная бактерия *Sereibacter sphaeroides* – продуцент бактериохлорофилла а и ее интенсивное культивирование. *Биотехнология*, 38 (4), с. 7–15 (2022). DOI: 10.56304/S0234275822040056.
4. Алферов С.В., Абдуллатыпов А.В., Трубицина Л.И., Якимович С.В., Бабкина Е.Е., Петракова М.П., Понаморева О.Н. Биоэлектрокаталитические свойства бактериальных двухдоменных лакказ. *Известия ТулГУ. Естественные науки*, 1, с. 9-20 (2022). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bioelektrokataliticheskie-svoystva-bakterialnyh-dvuhdomennyh-lakkaz> (дата обращения: 22.04.2022). DOI: 10.24412/2071-6176-2022-1-9-20.
5. Гречаник В.И., Большаков М.А., Цыганков А.А. Выделение водорода фотоавтотрофными культурами *Clamudomonas reinhardtii* при недостатке углекислоты. *Биохимия*, 87(10), с. 1388-1399 (2022). doi: 10.31857/S0320972522100050 (IF = 2,487, Q4 по БД WOS).
6. Grechanik V.I., Tsygankov A.A. The relationship between photosystem II regulation and light-dependent hydrogen production by microalgae. *Biophysical Reviews*, 14, pp. 893-904 (2022). doi: 10.1007/s12551-022-00977-z (IF = 3,33, Q1 по БД Scopus)