

# На пути к энергетике будущего



Победителем Премии «Глобальная энергия» в 2021 году стал выдающийся российский учёный, заведующий лабораторией управляемого фотосинтеза Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН Сулейман АЛЛАХВЕРДИЕВ. Престижная награда в области энергетики ему присуждена «За выдающийся вклад в развитие альтернативной энергетики, научные достижения в области проектирования систем искусственного фотосинтеза, цикл научных работ в области биоэнергетики и водородной энергетики». Сегодня лауреат отвечает на вопросы журнала «Вести в электроэнергетике».



— Сулейман Ифханович, за время существования Премии «Глобальная энергия» впервые лауреатом стал биолог, что говорит о значительном влиянии фундаментальной биологической науки на формирование энергетики будущего. Какой, по-вашему, будет энергетика будущего? Какие источники будет использовать, на какие принципы опираться?

— На самом деле я физик и биофизик (к.ф.-м.н., д.б.н.). Но работаю на стыке физико-химической биологии. Энергетика будущего активно развивается в разных направлениях, некоторые из них находятся на стадии лабораторных испытаний, другие применяются на практике. В настоящее время наиболее перспективной представляется солнечная энергетика, поскольку энергия Солнца неисчерпаема. Энергия солнечного света, падающая на нашу планету за один час, эквивалентна всей энергии, которую использует человечество в течение одного года. Наиболее привлекательными объектами для исследований и разработок в области солнечной энергии являются недорогие, стабильные, эффективные, экологичные, искусственные или полусинтетические системы, основанные на естественном фотосинтезе, для производства водорода

из воды. Такие системы будут основаны на природоподобных принципах, частично или полностью имитируя те процессы, структуры и механизмы, которые природа уже многократно опробовала, идеально отточила, максимально усовершенствовала в течение бесконечного количества времени в широчайшем спектре всевозможных благоприятных и крайне стрессовых для существования всего живого на планете условиях, создав таким образом фантастически идеальный прототип промышленных устройств преобразования и сохранения солнечной энергии.

— Почему вы стали заниматься фотосинтезом? Чем он вас заинтересовал и как сильно продвинулась отечественная и мировая наука в его изучении?

— Ценность и уникальность фотосинтеза можно описать одной фразой: это единственный процесс, благодаря которому существуют ВСЕ и ВСЁ на планете. Сама по себе биомасса — это источник биоэнергии (пища) и энергии (ископаемые виды топлива). Кислород, также образующийся в процессе фотосинтеза, — идеальный окислитель этой биомассы (топлива в топках электростанций) и окислитель

в клетках живых существ, позволяющий наиболее эффективным образом извлекать запасённую в поглощаемой организмами биомассе энергию, окисляя её в конечном итоге до воды и двуокиси углерода. Основополагающей в данной области знаний для меня была идея исследования механизмов функционирования фотосинтеза для возможности воспроизведения его в искусственных системах, имитирующих этот природный процесс, с целью получения необходимой для существования и развития человечества энергии.

В мире очень много лабораторий работало и работает сейчас в области природного фотосинтеза. Ещё в 80-е годы прошлого века, являясь аспирантом (моим научным руководителем был академик А.А. Красновский), я имел честь наблюдать за развитием науки в данной области: в Москве и Пущино активно занимались изучением фотосинтеза очень сильные лаборатории под руководством академиков Александра Абрамовича Красновского и Владимира Анатольевича Шувалова. На тот период отечественные учёные безусловно лидировали в этой области. Академик В.А. Шувалов с сотрудниками предсказали структуру бактериального реакционного центра. Позже это было подтверждено немецкими учёными, сумевшими получить кристаллы бактериального реакционного центра, за что им была присуждена Нобелевская премия. К сожалению, после ухода из жизни А.А. Красновского, а также в связи с проблемами со здоровьем у В.А. Шувалова отечественные исследователи фотосинтеза лишились колоссальной поддержки, настоящей команды лидеров, которые возглавляли направление, отстаивали на мировой арене перспективы (в том числе экономические) изучения данной области. Пользуясь случаем, хочу искренне пожелать Владимиру Анатольевичу скорейшего выздоровления и восстановления сил.

Ещё в то время нами были получены принципиально новые сведения о молекулярном механизме преобразования света в фотосистеме 2 (ФС2) растений и цианобактерий, о её энергетических и кинетических характеристиках, а также о механизме действия повреждающих факторов. Мы обнаружили что, феофитин «а» (Pheo) функционирует в реакционных центрах ФС2 в качестве промежуточного акцептора электрона между первичным донором, хлорофиллом P680 и первичным акцептором электрона, пластохиноном QA. Величины окислительно-восстановительного потенциала Pheo составляют  $-536$  мВ, P680 —  $+1,18$  В. Показана способность ФС2 к фотовосстановлению акцепторов электронов, типичных для фотосистемы 1, — метилвиологена и НАДФ+. Была разработана мето-

дика поэтапного удаления ионов эндогенного Mn из водоокисляющего комплекса (ВОК) ФС2 и последующей реконструкции ВОК с помощью  $MnCl_2$  или искусственных Mn-органических комплексов. Определено количество ионов эндогенного Mn, функционирующего на донорной стороне ФС2. Показано, что после полного (более чем 95%) удаления эндогенного Mn из ВОК ФС2 транспорт электронов через ФС2, а также функция фотосинтетического выделения кислорода могут быть восстановлены путем добавления четырех  $Mn^{2+}$  на один реакционный центр (два из которых могут быть заменены ионами  $Mg^{2+}$  или ионами других двухвалентных металлов) и последующей фотоактивации системы. Перенос электрона через ФС2, истощённую по эндогенному Mn, а также в изолированных комплексах D1/D2/цитохром b559 реакционных центров ФС2 может быть реконструирован с помощью синтетических двух- и трёхъядерных Mn-органических комплексов на основе триподных лигандов. Реконструированная ФС2 с высокой эффективностью окисляет воду с образованием пероксида водорода и т.д. Результаты этих исследований стали достоянием мировой биологической науки, и они вошли во все учебники по фотосинтезу в мире.

Мы с коллегами продолжаем активно отстаивать значимость и актуальность направления. На сегодняшний момент наши усилия направлены на создание и исследование преобразователей солнечной энергии на основе компонентов фотосинтетических систем, которые дают возможность получения экологически чистой энергии. Для создания таких солнечных ячеек необходимо было выяснить механизмы преобразования солнечной энергии в энергию химических связей, разработать и синтезировать эффективные катализаторы окисления воды и создать систему эффективного запасаения полученной энергии.

Нами впервые была сконструирована оригинальная установка, которая позволяет исследовать функционирование солнечных ячеек на основе фотосинтетических систем в широком диапазоне температур и интенсивностей света. С помощью этой установки было изучено функционирование солнечных ячеек с компонентами фотосинтетического аппарата растений, способных генерировать фототок. Кроме того, нами был проведён анализ процессов генерации фототока в различных условиях в солнечных ячейках на основе тилакоидных мембран хлоропластов, иммобилизованных на поверхности  $TiO_2$ . Особое внимание при этом уделялось поиску эффективных катализаторов окисления воды, поскольку такие катализаторы являются ключевыми

компонентами солнечных ячеек, производящих на свету молекулярный водород из воды.

В ходе уникальных научных экспериментов было установлено, что самым эффективным катализатором окисления воды в условиях искусственного фотосинтеза является марганецсодержащий комплекс. Мы синтезировали искусственные Mn-, а также Co-, Ni-, Ru-содержащие комплексы (более 50), биомиметики ФС2, способные выделять молекулярный кислород из воды. Эти комплексы могут быть использованы для конструирования фотоячеек. Полученные нами результаты и состояние данной проблемы обобщены в нашем обзоре в 2016 г. в *Chemical Reviews* (IF=61).

Также нами получены результаты исследований нескольких штаммов цианобактерий, с целью выявления организмов, характеризующихся высокой способностью к генерации молекулярного водорода в темноте и при освещении. Впервые экспериментально показана способность клеток цианобактерий дикого типа *Desertifilum sp.* IPPASB-1220 в определённых условиях производить молекулярный водород с достаточно высокой эффективностью в течение относительно продолжительного времени. Найдены условия, способствующие повышению эффективности генерации водорода клетками этой цианобактерии в 1,5 раза.

— **Много ли загадок ещё таит фотосинтез?**

— Несомненно, процесс природного фотосинтеза изучен достаточно хорошо, но при этом существует масса неисследованных аспектов, представляющих интерес для мировой науки. Что касается искусственного фотосинтеза, то для разработки, проектирования и построения устройств по производству водорода необходимы ещё более углублённые знания оптимальных условий эффективного выделения водорода. При создании таких преобразователей возникают определённые проблемы, касающиеся, прежде всего, иммобилизации фотосинтетических комплексов на подложке, их стабильности и удельной эффективности функционирования.

— **Насколько важна тема фотосинтеза для энергетики? Какую роль играет фотосинтез в формировании топливно-энергетического потенциала Земли и производстве «чистой» энергии?**

— В современном топливно-энергетическом потенциале планеты фотосинтез играет ключевую роль, опосредованную накопленными в течение многих веков продуктами фотосинтеза (нефть, газ, уголь, сланцы и т.д.). Поскольку большая часть современной энергетики планеты всё ещё базируется

на использовании ископаемых видов топлива, современный топливно-энергетический потенциал планеты создан фотосинтезом (именно топливно-энергетический, за исключением, наверное, атомной энергетики). Конечно, надо понять, что если будет сохранён текущий уровень потребления запасов ископаемого топлива, то: нефти осталось на 50–60 лет, природного газа — на 40–55 лет. Более достоверные оценки свидетельствуют о том, что запасы каменного угля полностью истощатся через 150–175 лет.

— **Какое значение имеет фотосинтез для обеспечения энергетической безопасности человечества?**

— Именно благодаря фотосинтезу обеспечена энергетическая безопасность человечества: созданы запасы ископаемых видов топлива. Человечеству в настоящее время следует интенсифицировать работы по созданию новых систем в энергетике, исходя из понимания, что существующих, но, к сожалению, очень быстро истощаемых запасов, должно хватить до того момента, как будут разработаны и созданы природоподобные экологичные системы искусственного фотосинтеза, генерирующие молекулярный водород из неисчерпаемого источника протонов и электронов, воды, за счёт энергии от неисчерпаемого источника солнца.

— **Говоря о безопасности, нельзя обойти тему изменения климата. Действительно ли главной причиной является антропогенное воздействие на природу?**

— По данному вопросу существует много спорных, часто противоположных мнений, объяснений, указаний причин происходящих изменений, большая часть которых всегда и всесторонне объективно, убедительно и научно обоснована. Я не возьму на себя ответственность выделить какое-то одно из названных объяснений как основное. Несомненным является тот факт, что антропогенное воздействие на природу самым катастрофическим образом изменяет окружающую среду, люди совершенно бездумно, безответственно, безобразно загрязняют планету. Как ни печально это осознавать, но, по сути, наши действия порой схожи с первобытными, дикими временами, и нет оснований надеяться, что когда-нибудь будет по-другому. Факт, что современные промышленные предприятия энергетики ежегодно выбрасывают на поверхность Земли около 1 млрд тонн отходов.

В настоящее время продолжает увеличиваться количество крупных промышленных производств, и гигантских энергостанций, использующих тради-

ционные виды топлива в качестве источника энергии, растёт число газо- и нефтепроводов, протяжённость которых лишь в европейской части России превысила уже 300000 км. Для каждой нитки нефтепровода необходимо выделять существенные территории для так называемых охранных зон, а также земельные участки, предназначенные для размещения наземных объектов системы нефтепроводов, нарушая биологическое равновесие природных комплексов (биогеоценозов). Если говорить о негативном воздействии на окружающую среду потребляемого ископаемого топлива, то вклад нефти в нарушение экологии составляет 44 %, угля — 40 % и газа — 20 %. Из-за этого ежегодные потери в мире, связанные с затратами на экологию, составляют 7,5–8 триллионов долларов. Думаю, что всё понятно.

— **Должны ли мы поспешно отказываться от традиционной энергетики в пользу возобновляемой, или эти направления должны развиваться параллельно?**

— Поспешность никогда не оправдана. Все возможные перспективные научные направления разумно развивать параллельно. Моё убеждение основано на том, что никогда неизвестно, какое из выбранных направлений в данный конкретный момент окажется для человечества наиболее экономически, экологически, политически выгодным и целесообразным. Проблемы, возникшие в последние годы в Европе с энергообеспечением (особенно зимой), как раз подтверждают, что поспешный отказ от хорошо проверенного способа в пользу ещё не апробированного может закончиться катастрофой.

— **Можно ли прийти к безуглеродной энергетике и когда это будет?**

— В настоящее время во всём мире технологии искусственного фотосинтеза находятся на стадии экспериментальных исследований, лишь отдельные из них — максимум на первичной стадии создания и испытания лабораторных прототипов. Ввод таких технологий в отрасль топливо-энергетического комплекса России и даже мира в настоящее время представляется маловероятным. Необходимы ещё достаточно интенсивные лабораторные исследования, создание и многосторонние испытания многочисленных экспериментальных прототипов возможных устройств искусственного фотосинтеза. Также нужны разработка технической документации, производственная оценка рентабельности промышленного использования и многое другое. Как для любого прототипа, на пути внедрения его в производство

всегда существует множество этапов, которые необходимо пройти.

— **Последние четверть века вы занимаетесь разработкой систем искусственного фотосинтеза с целью получения молекулярного водорода в качестве альтернативного источника энергии. Но энергетики считают, что водород — плохой и очень опасный энергоноситель. Почему тогда он провозглашён топливом будущего? В чём, по-вашему, ценность водорода для энергетики?**

— Мы считаем, что лучшим решением энергетической проблемы станет водородная энергетика. Молекулярный водород признан топливом будущего, поскольку он представляет собой не содержащее углерода самое экологически чистое топливо. Это позволит экономить до 7,5 триллиона долларов в год, которые планета ежегодно тратит на восстановление повреждённой экологии вследствие использования традиционных видов топлива. Молекула воды состоит из двух протонов и атома кислорода. Как один из основных компонентов в структуре молекулы воды, водород — это широко распространённый, имеющийся на нашей планете в избытке возобновляемый источник энергии, не дающий при сгорании никаких загрязнений окружающей среды, выделяющий при сжигании большое количество энергии на единицу веса и который может быть легко преобразован в электричество с помощью топливных ячеек.

Из школьного курса все знают, что кислородно-водородная смесь взрывоопасна. Поэтому уже очень давно, наверное, практически с момента открытия молекулярного водорода известны, разработаны, апробированы, внедрены и непрерывно продолжают совершенствоваться методы безопасного использования молекулярного водорода во многих отраслях экономики по всему миру.

В настоящее время учёные сосредоточивают своё внимание именно на поиске и разработке эффективных, экологичных, дешёвых методов получения водорода в любых требуемых количествах. Практически любое вещество или действие опасны, если они (вещество, действие) используются безграмотно и бездумно.

— **Контактируете ли вы непосредственно с компаниями топливо-энергетического комплекса, отраслевыми институтами? С какими вопросами к вам обращаются?**

— К сожалению, большинство производств в наши дни далеки от науки и скептически относятся к разработкам, направленным на более дли-

тельную перспективу. К тому же перестройка производств под нужды науки также требует финансовых затрат, а далеко не все представители бизнеса готовы пойти на такой риск. В этом и заключается одна из главных трудностей промышленного внедрения передовых технологий в области альтернативной энергетики. Без искренней заинтересованности таких компаний и без существенной финансовой поддержки государства учёные-биоэнергетики сталкиваются с большими трудностями, обусловленными отсутствием должного количества средств, необходимых для приобретения расходных материалов, реактивов. В России были созданы научные фонды РНФ, РФФИ, МКБ. Отдельно хочу выразить искреннюю благодарность создателям, руководителям и всему коллективу этих организаций, благодаря которым появилась возможность получать финансирование для научных разработок. Во многом благодаря именно этим фондам всё ещё существует российская наука. И чрезвычайно жаль, что некоторые из них в настоящее время уже, к сожалению, не функционируют (РФФИ и МКБ). Это большая потеря для науки страны. Ещё раз хочу подчеркнуть, что для воплощения накопленных фундаментальных знаний на практике необходимо на государственном уровне организовать и наладить продуктивный диалог между учёными, разрабатывающими проблему, и производствами, способными и готовыми эти разработки реализовать, хотя бы в виде экспериментальных прототипов.

**— В электроэнергетике одной из наиболее острых проблем является проблема преемственности, передачи знаний и опыта новому поколению. Насколько актуальна эта тема для науки? Есть ли у вас последователи? Кому вы передаёте свои знания?**

— В течение почти 45 лет мои научные исследования касаются природного фотосинтеза и возможности использования принципов искусственного фотосинтеза при создании устройств, имитирующих природный процесс. С 2004 года я являюсь организатором международных конференций, посвящённых именно этой области (Photosynthesis and Hydrogen Energy Research for Sustainability). Следующая наша конференция по этому вопросу состоится в Болгарии в следующем году. В цикле данных конференций участвуют самые известные в мире учёные, исследующие как проблемы природного, так и искусственного фотосинтеза. Мы, учёные, занимающиеся данной проблематикой, достаточно хорошо знаем научные интересы друг друга,

следим за достижениями коллег. Отдельно хочу выделить сильные научные коллективы Швеции, Японии, Германии, Америки. Фотосинтез — это сложный, многостадийный, комплексный процесс. Среди исследователей, разрабатывающих системы искусственного фотосинтеза, есть учёные, которые работают над фотолизом воды, а также специализирующиеся на утилизации двуокиси углерода. Сейчас многие исследователи мира работают над моделированием более частных реакций природного фотосинтеза, пытаются имитировать природоподобные технологии, так как зачастую они (природные реакции) обладают максимально возможной эффективностью конкретного процесса, разработанного и проверенного самой природой в течение многолетнего естественного отбора.

Я являюсь руководителем лаборатории института, входящего в структуру Российской академии наук, руковожу исследованиями аспирантов, магистрантов, студентов, веду обучающие курсы, читаю лекции, в разных высших научно-образовательных учреждениях в России (МГУ, МФТИ), Японии, Китае, Индии, Турции, Казахстане, Азербайджане.

**— Вы достигли больших вершин в науке, имете много наград и высоких оценок. Что для вас значит Премия «Глобальная энергия»?**

— Я глубоко признателен за высокую оценку моих исследований, особенно за обоснованное признание чрезвычайной актуальности и важности для будущего человечества этого направления — поиск таких источников энергии, которые, я уверен, уже в ближайшем будущем избавят нас от стремительно возрастающей проблемы энергетического голода и необходимости неэффективно тратить исчезающие ископаемые источники энергии, загрязняя окружающую среду и угрожая планете экологическим коллапсом. Я всей душой надеялся на то, что люди поймут: единственным решением энергетической проблемы будет создание природоподобных искусственных систем, генерирующих молекулярный водород как уникальный источник энергии из компонентов, составляющих воду за счёт энергии солнечного излучения. И теперь я чувствую искреннее удовлетворение решением, принятым Ассоциацией «Глобальная энергия», и глубокую ответственность, обоснованную уверенность и непоколебимую решимость довести до реального широкого промышленного воплощения мои исследования в данной области.

**— Спасибо!**

*Беседовала Людмила ЮДИНА*