

Как «устроен» фотосинтез?

Одним из главных научных прорывов 2011 г. стало раскрытие секрета ключевого звена механизма фотосинтеза – процесса, лежащего в основе «солнечной энергетики» Земли. Японские ученые методом рентгеновского анализа установили детальную структуру каталитического центра фотосинтетической системы, в котором осуществляется процесс расщепления воды с выделением кислорода с использованием солнечной энергии

Практически все знают, что кислород, которым мы дышим, выделяют растения. На вопрос «какие вещества участвуют в этом процессе?» многие, базирясь на школьных знаниях, назовут хлорофилл. Однако в действительности все обстоит не совсем так. Молекулы хлорофилла, придающие листьям зеленый цвет, как и молекулы других пигментов (каротиноидов, фикобилинов), всего лишь поглощают энергию солнечного света, являясь своего рода антеннами. Сам процесс фотосинтеза происходит в так называемых *фотосистемах* – сложных комплексах, включающих, помимо пигментных светособирающих систем, белки-ферменты и молекулы небелковой природы (кофакторы). В этих фотосистемах, встроенных в мембраны многочисленных хлоропластов – клеточных органелл, и происходит процесс расщепления воды с выделением O_2 под действием солнечного света.

У растений и фотосинтезирующих бактерий обнаружено две фотосинтезирующие системы – фотосистема I и фотосистема II, отличающие по спектральным свойствам входящих в них пигментов. Основной итог работы фотосистем – превращение энергии света в электростатическую энергию разделенных зарядов протонов и электронов, которые образуются при расщеплении воды. Поразительно, но практически весь молекулярный кислород в атмосфере Земли представляет, по сути, побочный продукт этой реакции! В дальнейшем эта энергия в ходе сложной цепи темновых реакций превращается в энергию химических связей органических веществ, образующихся в растениях. (Именно эту энергию, накопленную растениями за миллионы лет фотосинтезирующей деятельности, человечество стремительно потребляет, сжигая торф, уголь, нефть и природный газ.)

Ученые на протяжении десятилетий пытались изучить детальное устройство фотосистемы II, чтобы выяснить, как происходит фотосинтетическое расщепление воды. Уже давно было обнаружено, что эта реакция происходит в каталитическом центре системы – *кислород-выделяющим комплексе* (КВК), который содержит четыре иона марганца. Именно эти ионы позволяют сконцентрировать энергию, необходимую для разрыва прочных химических связей в молекулах воды.

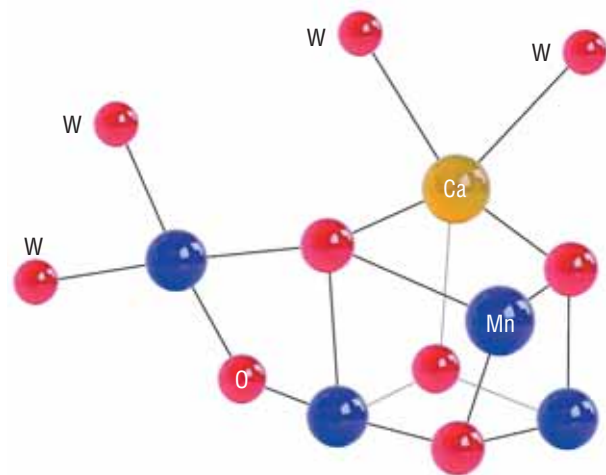
Однако и строение КВК, и механизм его работы до последнего времени оставались неизвестными. Дело в том, что рентгеноструктурный анализ – традиционный метод определения структуры ферментов – требует, чтобы их молекулы были упакованы в правильную кристаллическую решетку. А чрезвычайно сложно устроенная фотосистема II «упаковывается» очень неохотно.



КУЛИК Леонид Викторович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии и физики свободных радикалов Института химической кинетики и горения СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 45 научных публикаций

Ключевые слова: фотосинтез, фотосистема II, расщепление воды, рентгеноструктурный анализ, спектроскопия.

Key words: photosynthesis, Photosystem II, water splitting, X-ray structure, spectroscopy

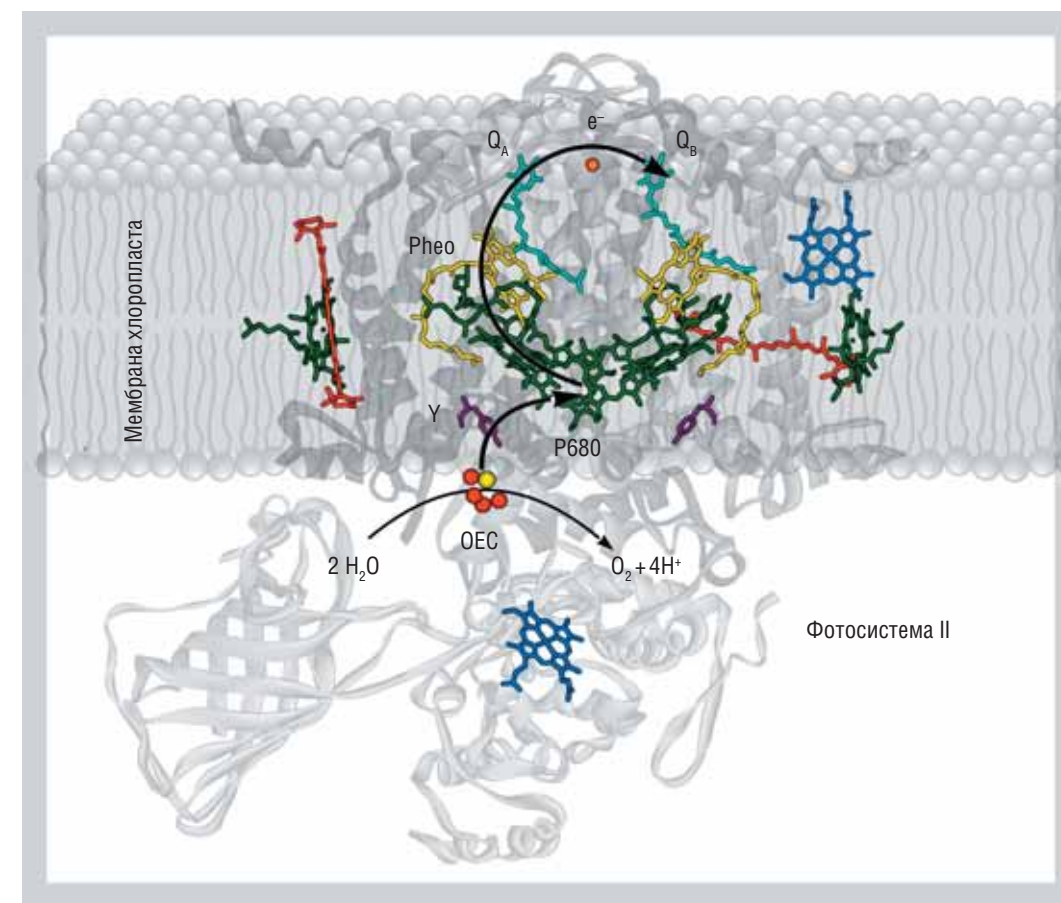


Строение кислород-выделяющего комплекса «фотосистемы II» удалось установить по данным рентгеноструктурного анализа кристалла. Символом W обозначены присоединенные атомы кислорода молекул воды. По: (Umena et al., 2011)

Основное достижение японских ученых как раз и состоит в том, что в 2011 г. они сумели приготовить достаточно совершенные кристаллы из фотосистемы II, что позволило уточнить детали ее структуры и «увидеть» устройство КВК. Впрочем, слово «увидеть» тут не совсем уместно. Рентгеноструктурный анализ – сложный метод, в котором для получения результатов требуется основательная математическая обработка регистрируемых сигналов. Поэтому изображение структуры, получаемое таким способом – вовсе не фотография, а, скорее, красиво оформленное предположение о строении исследуемого объекта.

При этом исследователи в буквальном смысле оказываются в положении людей из знаменитой «платоновской пещеры», которые наблюдают за тенями вещей, проносимых перед ее входом. И чтобы установление структуры кислород-выделяющего комплекса фотосистемы II этим способом было признано надежным, его было необходимо подтвердить с помощью других методов, в частности ядерного магнитного резонанса.

«Сад камней», созданный в 2010 г. около Института бионеорганической химии общества им. Макса Планка изображает модель кислород-выделяющего комплекса «фотосистемы II», разработанную в институте по результатам ЯМР. Фото Б. Декерс



На этом схематическом изображении молекулярной структуры фотосистемы II цветом выделены кофакторы, участвующие в фотосинтетическом переносе электрона и расщеплении молекулы воды.

OEC – кислород-выделяющий комплекс фермента;
P680 – димер молекул хлорофилла, первичный донор электрона при фотосинтетическом разделении зарядов;
Pheo – феофитин; Q_A и Q_B – молекулы пластохинона;
Y – аминокислота тирозин. По: (Kulik et al., 2007)

В последнее внесли свой вклад и российские ученые, работающие в составе многонационального коллектива в германском Институте бионеорганической химии (г. Мюльхайм-на-Руре, Германия). На основе результатов исследования структуры кислород-выделяющего комплекса методом импульсного двойного электрон-ядерного резонанса на ядрах марганца была предложена структура КВК, которая оказалась весьма близка к той, что была получена рентгеновскими методами японскими специалистами.

Несмотря на то, что механизм действия КВК еще не вполне установлен, он является вдохновляющим примером для поиска искусственных катализаторов, расщепляющих воду на кислород и водород под действием света. Осуществление такого «искусственного фотосинтеза» открыло бы широкие перспективы для экологически чистой водородной энергетики. Однако, это дело будущего, а пока продолжается поиск катализаторов расщепления воды, обладающих достаточной эффективностью, и уточнение устройства и механизма работы фотосистемы II.

Литература

Umena Y., Kawakami K., Shen J.-R., Kamiya N. Crystal structure of oxygen-evolving photosystem II at a resolution of 1.9 angstrom // *Nature*, 2011. 473. P. 55–60.

Yano J., Kern J., Sauer K., et al. Where water is oxidized to dioxygen: Structure of the photosynthetic Mn₄Ca cluster // *Science*, 2006. Vol. 314. P. 821–825.

Zein S., Kulik L. V., Yano J., et al. Focussing the view on Nature's water-splitting catalyst // *Phil. Trans. Royal Soc. B*, 2008. Vol. 363. P. 1167–1177.