**Фотосинтез**

Растения превращают солнечный свет в запасенную химическую энергию в два этапа: сначала они улавливают энергию солнечного света, а затем используют ее для связывания углерода с образованием органических молекул.

Зеленые растения — биологи называют их автотрофами — основа жизни на планете. С растений начинаются практически все пищевые цепи. Они превращают энергию, падающую на них в форме солнечного света, в энергию, запасенную в углеводах (см. Биологические молекулы), из которых важнее всего шестиуглеродный сахар глюкоза. Этот процесс преобразования энергии называется фотосинтезом. Другие живые организмы получают доступ к этой энергии, поедая растения. Так создается пищевая цепь, поддерживающая планетарную экосистему.

Кроме того, воздух, которым мы дышим, благодаря фотосинтезу насыщается кислородом. Суммарное уравнение фотосинтеза выглядит так:

вода + углекислый газ + свет —> углеводы + кислород

Растения поглощают углекислый газ, образовавшийся при дыхании, и выделяют кислород — продукт жизнедеятельности растений (см. Гликолиз и дыхание). К тому же, фотосинтез играет важнейшую роль в круговороте углерода в природе.

Кажется удивительным, что при всей важности фотосинтеза ученые так долго не приступали к его изучению. После эксперимента Ван-Гельмонта, поставленного в XVII веке, наступило затишье, и лишь в 1905 году английский физиолог растений Фредерик Блэкман (Frederick Blackman, 1866–1947) провел исследования и установил основные процессы фотосинтеза. Он показал, что фотосинтез начинается при слабом освещении, что скорость фотосинтеза возрастает с увеличением светового потока, но, начиная с определенного уровня, дальнейшее усиление освещения уже не приводит к повышению активности фотосинтеза. Блэкман показал, что повышение температуры при слабом освещении не влияет на скорость фотосинтеза, но при одновременном повышении температуры и освещения скорость фотосинтеза возрастает значительно больше, чем при одном лишь усилении освещения.

На основании этих экспериментов Блэкман заключил, что происходят два процесса: один из них в значительной степени зависит от уровня освещения, но не от температуры, тогда как второй сильно определяется температурой независимо от уровня света. Это озарение легло в основу современных представлений о фотосинтезе. Два процесса иногда называют «световой» и «темновой» реакцией, что не вполне корректно, поскольку оказалось, что, хотя реакции «темновой» фазы идут и в отсутствии света, для них необходимы продукты «световой» фазы.

Фотосинтез начинается с того, что излучаемые солнцем фотоны попадают в особые пигментные молекулы, находящиеся в листе, — молекулы хлорофилла. Хлорофилл содержится в клетках листа, в мембранах клеточных органелл хлоропластов (именно они придают листу зеленую окраску). Процесс улавливания энергии состоит из двух этапов и осуществляется в раздельных кластерах молекул — эти кластеры принято называть Фотосистемой I и Фотосистемой II. Номера кластеров отражают порядок, в котором эти процессы были открыты, и это одна из забавных научных странностей, поскольку в листе сначала происходят реакции в Фотосистеме II, и лишь затем — в Фотосистеме I.

Когда фотон сталкивается с 250-400 молекулами Фотосистемы II, энергия скачкообразно возрастает и передается на молекулу хлорофилла. В этот момент происходят две химические реакции: молекула хлорофилла теряет два электрона (которые принимает другая молекула, называемая акцептором электронов) и расщепляется молекула воды. Электроны двух атомов водорода, входивших в молекулу воды, возмещают два потерянных хлорофиллом электрона.

После этого высокоэнергетический («быстрый») электрон перекидывают друг другу, как горячую картофелину, собранные в цепочку молекулярные переносчики. При этом часть энергии идет на образование молекулы аденозинтрифосфата (АТФ), одного из основных переносчиков энергии в клетке (см. Биологические молекулы). Тем временем немного другая молекула хлорофилла Фотосистемы I поглощает энергию фотона и отдает электрон другой молекуле-акцептору. Этот электрон замещается в хлорофилле электроном, прибывшим по цепи переносчиков из Фотосистемы II. Энергия электрона из Фотосистемы I и ионы водорода, образовавшиеся ранее при расщеплении молекулы воды, идут на образование НАДФ-Н, другой молекулы-переносчика.

В результате процесса улавливания света энергия двух фотонов запасается в молекулах, используемых клеткой для осуществления реакций, и дополнительно образуется одна молекула кислорода. (Отмечу, что в результате еще одного, значительно менее эффективного процесса с участием одной лишь Фотосистемы I, также образуются молекулы АТФ.) После того как солнечная энергия поглощена и запасена, наступает очередь образования углеводов. Основной механизм синтеза углеводов в растениях был открыт Мелвином Калвином, проделавшим в 1940-е годы серию экспериментов, ставших уже классическими. Калвин и его сотрудники выращивали водоросль в присутствии углекислого газа, содержащего радиоактивный углерод-14. Им удалось установить химические реакции темновой фазы, прерывая фотосинтез на разных стадиях.

Цикл превращения солнечной энергии в углеводы — так называемый цикл Калвина — сходен с циклом Кребса (см. Гликолиз и дыхание): он тоже состоит из серии химических реакций, которые начинаются с соединения входящей молекулы с молекулой-«помощником» с последующей инициацией других химических реакций. Эти реакции приводят к образованию конечного продукта и одновременно воспроизводят молекулу-«помощника», и цикл начинается вновь. В цикле Калвина роль такой молекулы-«помощника» выполняет пятиуглеродный сахар рибулозодифосфат (РДФ). Цикл Калвина начинается с того, что молекулы углекислого газа соединяются с РДФ. За счет энергии солнечного света, запасенной в форме АТФ и НАДФ-H, сначала происходят химические реакции связывания углерода с образованием углеводов, а затем — реакции воссоздания рибулозодифосфата. На шести витках цикла шесть атомов углерода включаются в молекулы предшественников глюкозы и других углеводов. Этот цикл химических реакций будет продолжаться до тех пор, пока поступает энергия. Благодаря этому циклу энергия солнечного света становится доступной живым организмам.

В большинстве растений осуществляется описанный выше цикл Калвина, в котором углекислый газ, непосредственно участвуя в реакциях, связывается с рибулозодифосфатом. Эти растения называются C3-растениями, поскольку комплекс «углекислый газ—рибулозодифосфат» расщепляется на две молекулы меньшего размера, каждая из которых состоит из трех атомов углерода. У некоторых растений (например, у кукурузы и сахарного тростника, а также у многих тропических трав, включая ползучий сорняк) цикл осуществляется по-другому. Дело в том, что углекислый газ в норме проникает через отверстия в поверхности листа, называемые устьицами. При высоких температурах устьица закрываются, защищая растение от чрезмерной потери влаги. В C3-растения при закрытых устьицах прекращается и поступление углекислого газа, что приводит к замедлению фотосинтеза и изменению фотосинтетических реакций. В случае же кукурузы углекислый газ присоединяется к трехуглеродной молекуле на поверхности листа, затем переносится во внутренние участки листа, где углекислый газ высвобождается и начинается цикл Калвина. Благодаря этому довольно сложному процессу фотосинтез у кукурузы осуществляется даже в очень жаркую, сухую погоду. Растения, в которых происходит такой процесс, мы называем C4-растениями, поскольку углекислый газ в начале цикла транспортируется в составе четырехуглеродной молекулы. C3-растения — это в основном растения умеренного климата , а C4-растения в основном произрастают в тропиках.

**Гипотеза Ван Ниля**

Процесс фотосинтеза описывается следующей химической реакцией:

СО2 + Н2О + свет —> углевод + О2

В начале XX века считалось, что кислород, выделяющийся в процессе фотосинтеза, образуется в результате расщепления углекислого газа. Эту точку зрения опроверг в 1930-е годы Корнелис Бернардус Ван Ниль (Van Niel, 1897–1986), в то время аспирант Стэнфордского университета в штате Калифорния. Он занимался изучением пурпурной серобактерии (на фото), которая нуждается для осуществления фотосинтеза в сероводороде (H2S) и выделяет в качестве побочного продукта жизнедеятельности атомарную серу. Для таких бактерий уравнение фотосинтеза выглядит следующим образом: СО2 + Н2S + свет —> углевод + 2S.

Исходя из сходства этих двух процессов, Ван Ниль предположил, что при обычном фотосинтезе источником кислорода является не углекислый газ, а вода, поскольку у серобактерий, в метаболизме которых вместо кислорода участвует сера, фотосинтез возвращает эту серу, являющуюся побочным продуктом реакций фотосинтеза. Современное подробное объяснение фотосинтеза подтверждает эту догадку: первой стадией процесса фотосинтеза (осуществляемой в Фотосистеме II) является расщепление молекулы воды.

Мелвин КАЛВИН

Melvin Calvin, 1911–97

Американский биолог. Родился в г. Сент-Пол, штат Миннесота, в семье выходцев из России. В 1931 году получил степень бакалавра в области химии в Мичиганском колледже горного дела и технологии, а в 1935 году — степень доктора химии в университете штата Миннесота. Двумя годами позже Калвин начал работать в Калифорнийском университете в Беркли и в 1948 году стал профессором; за год до этого был назначен директором отдела биоорганики в Радиационной лаборатории Лоренса в Беркли, где использовал технологические достижения военных исследований времен Второй мировой войны, например новые методы хроматографии, для изучения темновой фазы фотосинтеза. В 1961 году Калвин был удостоен Нобелевской премии в области химии.