

# ЗЕЛЕНАЯ, ЗЕЛЕНАЯ ТРАВА...

Кандидат биологических наук  
И. Э. ЛАЛАЯНЦ,  
кандидат биологических наук  
Л. С. МИЛОВАНОВА

Так поется в популярной песне известной рок-группы. И вряд ли при этом кто-нибудь задумывается: а почему, действительно, трава зеленая? А если задать этот вопрос?

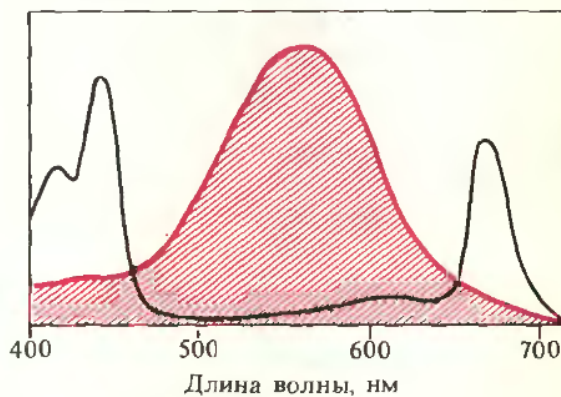
Стандартный ответ можно предугадать: трава зеленая потому, что в ней содержится хлорофилл. А почему он зеленый? Известно, что в процессе фотосинтеза хлорофилл поглощает световую энергию и превращает ее в энергию химическую — энергию связей органических веществ. При этом поглощает он избирательно — в синей области спектра (длина волны около 450 нм) и в оранжевой (примерно 670 нм). А зеленые, желтые и красные лучи пропускает, практически не поглощая. На зеленую область спектра солнечного света приходится максимум энергии. И глаз наиболее чувствителен к зеленому свету... Вот, пожалуй, и ответ. Но из него возникает «чисто практический» вопрос: как же так получилось, что эволюция лишила высшие растения большого «куска» энергии? Почему центральная, наиболее энергоемкая, часть солнечного спектра используется так неэффективно? Для того чтобы разобраться в этом вопросе, необходимо заглянуть в глубь веков — на три-три с половиной миллиарда лет назад.

До этого времени жизненная энергия черпалась из накопленных природой органических источников. Но эти запасы были небесконечны, и наступило время, когда для дальнейшего развития жизни стали необходимы новые источники энергии. Единственный такой источник для биосферы — Солнце. Но чтобы воспользоваться этой энергией, необходимы были, прежде всего, светоулавливающие устройства. И природа создала их в виде молекул так называемого бактериородопсина.

Бактериородопсин (БР) представляет собой белок, соединенный с ретиналом — молекулой, «реагирующей» на свет: она может поднимать и опускать хвост. Когда света нет — хвост «опущен», когда же на молекулу ретиналя падает квант света (фотон) — хвост «поднимается» и запускает каскад реакций в мембране бактериальной клетки.

Мембрана представляет собой двойной слой жирных молекул. Это оболочка клетки, отгораживающая ее от внешней среды. Жизнь тем и отличается от неживой природы, что может отгородиться от своего окружения. Но не совсем, не абсолютно. Она «общается» с внешней средой через мембрану — ведь клетка должна питаться, получать энергию, выбрасывать наружу «отходы» своей жизнедеятельности и т. д. Делается это все с помощью мембранных белков-«переносчиков», одним из которых и является БР. Бактериородопсин был открыт у солелюбивых бактерий, или галобактерий (от греческого «галос» — соль), живущих в «рассолах» с концентрацией соли до 20 %.

С самого начала клетки нуждались в активном удалении из них ионов



Спектры поглощения бактериородопсина и хлорофилла (черная кривая).



водорода — протонов ( $p^+$ ), которые постоянно рождаются в процессе обмена веществ. Но снаружи концентрация протонов была примерно в сто раз выше, и для выталкивания их из клетки необходима была энергия. Вот эту-то энергию и начал улавливать БР. При поглощении фотона солнечного света хвост ретиналя выпрямляется и «выбивает» протон из клетки. Но поскольку «свято место не пустует», вместо  $p^+$  в клетку поступает молекула питательного вещества. Молекулу БР можно сравнить с качелями, на одном конце которых «сидит» протон, а на другом — питательная молекула. Работают эти молекулярные качели за счет энергии солнца.

Но резкое уменьшение внутриклеточной концентрации  $p^+$  привело к тому, что, по законам диффузии, наружные протоны еще активнее устремились внутрь клетки. И это стремление клетка приспособила себе на пользу: энергия проходящих сквозь мембрану протонов стала использоваться для образования АТФ.

АТФ расшифровывается довольно «просто»: АденозинТриФосфорная кислота. Это — «ее энергетическое высочество» клетки, аккумулятор внутриклеточной энергии. Все процессы жизнедеятельности в живой природе идут за счет энергии АТФ. При распаде молекулы АТФ выделяется огромная (по масштабам клетки) энергия, которая идет на различные нужды клетки. Таким образом, галобактерии, эти живые «ископаемые» на Земле, которые возникли порядка трех-четырех миллиардов лет назад, сумели успешно «запрячь» фотон в энергетическую колесницу.

Однако расцвет микроорганизмов, содержащих в своей мембране БР, предопределил и их «закат» — они сошли со сцены эволюции. Ведь для того, чтобы построить новую клетку, необходим углерод — все в нашем живом мире состоит из цепочек атомов этого элемента. Но галобактерии «выедали» все органические соединения, состоящие из цепочек углерода. В качестве остававшегося неиспользованным был только углекислый газ



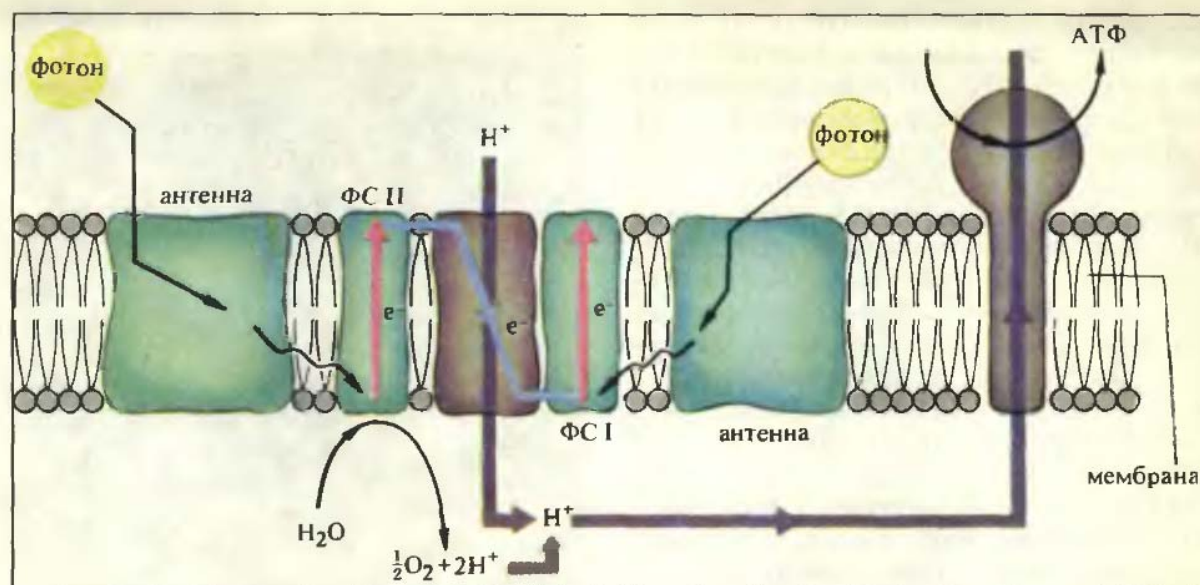
Поперечный срез зеленого листа (снимок сделан с помощью электронного микроскопа). Хорошо видны поверхностные слои клеток, защищающие лист сверху и снизу. В середине листа — клетки, в которых находятся многочисленные хлоропласты (они видны как зернистая структура внутри срезаемых клеток). В этих зеленых пластидах и происходит фотосинтез.



Фотография хлоропласта, полученная с помощью электронного микроскопа. Хлоропласты представляют собой чечевицеобразные зеленые зерна, построенные из мембран (тонкие полоски на снимке), в которых располагаются белковые комплексы, несущие хлорофилл (темные участки мембран). Именно в этих участках происходит фотосинтез.

$CO_2$ , который постоянно выделялся из вулканов и накапливался в атмосфере. Но как усвоить, или, как говорят ученые, зафиксировать атмосферный  $CO_2$ ? Ведь чтобы перевести его в органическую форму, нужно его химически восстановить. А для этого необходима энергия.





Мембрана, в которой располагаются фотосинтезирующие системы (ФС), представляет собой двойной слой молекул жирных кислот, обращенных «хвостами» друг к другу (тонкие двойные искривленные линии), с которыми соединены остатки фосфорной кислоты (темные кружочки сверху и снизу). Толщина мембраны 4—4,5 нм. Фотоны солнечного света, падающие на мембрану, улавливаются антеннами и направляются на хлорофилл реакционных центров фотосистем. За счет кинетической энергии выбитого из хлорофилла электрона ФСII расщепляет молекулу воды; при этом в атмосферу высвобождается кислород, а в хлоропласте остается ион водорода. ФСI «накачивает» водород извне, и оба потока протонов направляются на АТФ-азный комплекс, который синтезирует АТФ.

Галобактерии не стали решать задачу фиксации атмосферного  $\text{CO}_2$  и «вышли из игры», законсервировавшись на миллиарды лет в «одноклеточном состоянии». На сцену вышли новые участники эволюции — обладатели хлорофилла. Конструктивное решение, придуманное природой, было очень четким. Мы уже говорили, что все процессы в клетке идут за счет АТФ. Следовательно, для того, чтобы восстановить  $\text{CO}_2$ , нужна дополнительная АТФ. Значит, нужны дополнительные протоны. Протоны можно взять из воды — там их неограниченное количество. Надо только расщепить эту воду, для чего... нужна новая энергия.

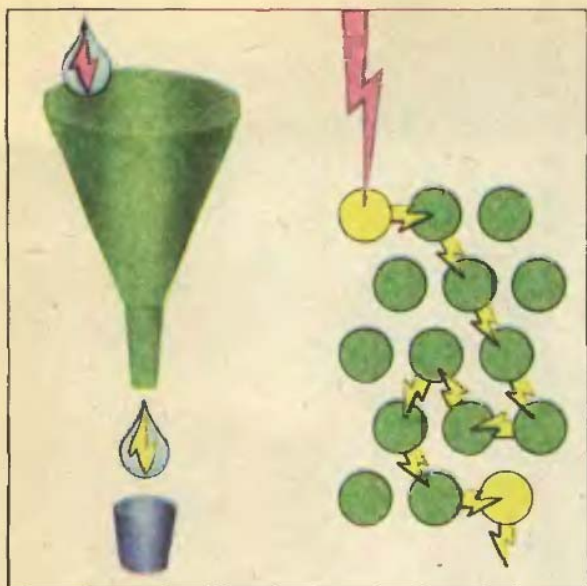
Но большую часть энергии Солнца уже улавливал БР галобактерий, и неиспользованными оставались только крайние области спектра солнечного света. Пустить эту энергию на нужды растительной клетки и призван был хлорофилл. Процесс синтеза органических веществ за счет световой энергии мы и называем фотосинтезом.

Для осуществления фотосинтеза природа сконструировала замечатель-

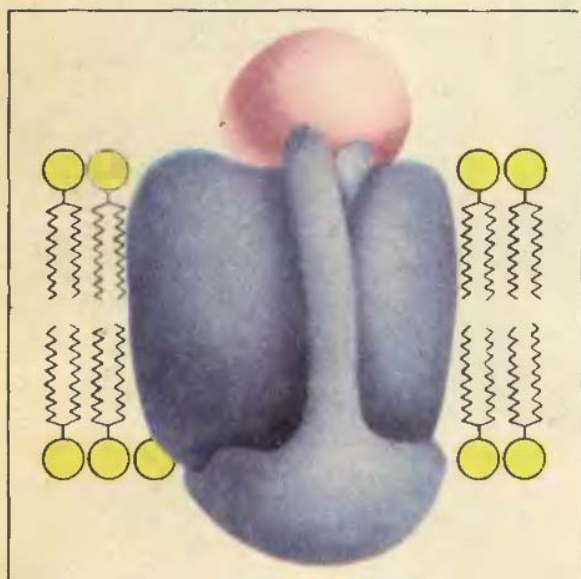
ное устройство. Улавливание фотонов происходит в гигантских комплексах, которые объединяют до 300—400 молекул хлорофилла. Эти световославливающие антенны находятся в мембране хлоропласта. Энергия уловленных отдельными молекулами фотонов передается на хлорофилл реакционного центра (РЦ). За счет этой энергии в РЦ из молекулы хлорофилла выбивается электрон, который улавливается системой молекул, способных передать его кинетическую энергию на фермент, расщепляющий воду. Освобождающийся кислород, который для растительной клетки является ядом, выделяется в атмосферу. А ионы водорода ( $\text{H}^+$ ) поступают в АТФ-азный комплекс, синтезирующий дополнительную АТФ.

Систему, осуществляющую эту деятельность — от улавливания фотонов до высвобождения протонов из воды, называют фотосистемой II. Называют так потому, что есть еще фотосистема I, более «старая» в эволюционном отношении. Она была создана тогда, когда кислорода в атмосфере еще не было, и зеленые водоросли жили в во-





Светоулавливающая антенна — гигантский комплекс, объединяющий до 300—400 молекул хлорофилла, — действует подобно воронке: она собирает фотоны и передает их энергию на реакционный центр, который срабатывает при поступлении на него одного-единственного фотона.



Реакционный центр построен из трех белков (на рисунке они синие), цепи которых имеют разные веса и строения. Две более мелкие цепи как бы окружают большой, имеющей длинный «хоботок», поднимающийся с нижней поверхности мембраны к верхней (молекулы жирных кислот, образующих мембрану, представлены линиями в виде «пилы», а остатки фосфорной кислоты художник изобразил желтыми кружочками). Сверху РЦ расположена молекула белка цитохрома (розовый шарик).

де, ведя борьбу с пурпурными не на жизнь, а на смерть. Именно эта система обеспечивала АТФ-азу протонами до появления фотосистемы II.

Создание фотосистем является одним из достижений эволюции. Впервые атмосфера стала обогащаться кислородом. Появление в воздухе мощнейшего окислителя резко подстегнуло эффективность энергетических процессов во всем живом мире. Появилась возможность более активного творчества природы в деле создания сложных животных форм. Пурпурные, красные, багряные и бурые водоросли проиграли битву зеленым, обладающим хлорофиллом. Только зеленые растения смогли выйти на сушу.

Наш рассказ, надеемся, кажется простым и понятным. Однако мы лишь редкими штрихами обозначили сложнейшие физические и химические процессы, которые составляют фотосинтез. И многое еще неясно в этих процессах, ответы на многие вопросы еще только предстоит найти. Но успехи в исследовании фотосинтеза огромны. За работы в этой области уже присуждены две Нобелевские премии. На этой проблеме сконцентрировались усилия физиков и химиков, биологов и математиков. Лазеры и электронные микроскопы, мощные компьютеры и рентгеновские установки — все это использует наука для раскрытия тайн фотосинтеза.

Сегодня, конечно, еще далеко до практического применения знаний, полученных в ходе этих кропотливых и дорогостоящих работ. Но в перспективе видится возможность создания совершенно новых солнечных батарей, при конструировании которых будут использованы «принципы» построения фотосинтезирующих мембран. Такие источники энергии смогут производить ее экологически «чисто» и с большим КПД. Эта чистота, можно сказать «стерильность», фотосинтеза особенно привлекает нас, живущих в загазованном и постоянно «утепляющемся» мире...

Вот такой длинный рассказ вырос из, казалось бы, простого вопроса: почему трава зеленая?