Статья поступила в редакцию 14.07.15. Ред. рег. № 2287 The article has entered in publishing office 14.07.15. Ed. reg. No. 2287

УДК 577.1 doi: 10.15518/isjaee.2015.13-14.008

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ БИОМАССЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Ю.Н. Шалимов[1], А.В. Епифанов[1], В.И. Кудряш[2], В.Д. Епифанов[1], М.В. Лутовац[3], В.И. Федянин[4], Е.П. Евсеев[5], С.А. Соколов[6], П.Н. Макаров[7], Г.Я. Власов[8], Г.С. Веранян[8]

[1]АО «НКТБ «Феррит»
394066 Воронеж, Московский пр., д. 179/4
Тел.: 8-905-053-45-73, e-mail: shalimov_yn@mail.ru
[2]Воронежский институт МВД России
394065 Воронеж, пр. Патриотов, д. 53
Тел.: 8-920-400-04-06, e-mail: kudrjash_vi@mail.ru
[3]Белградский союзный университет. Белград, Сербия, e-mail: lutovac@mail.ru
[4]Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России
394052 Воронеж, ул. Краснознаменная, д. 231
e-mail: ga-kvashnina@mail.ru
[5]Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (ВГАСУ)
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84
[6]ООО «Диодосвет»
394016 Воронеж, ул. 45 Стрелковой Дивизии, д. 234, кв. 5
Тел.: +79204022211, e-mail: sergeum@mail.ru
[7]ООО Финансово-промышленная компания «КОСМОС-НЕФТЬ-ГАЗ»
394019 Воронеж, ул. 9 Января, д. 180
Тел./факс: (473)247-95-35, e-mail: makarov@kng.vrn.ru
[8]Воронежский государственный лесотехнический университет (ВГЛТУ)
394087 Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

Заключение совета рецензентов: 17.07.15 Заключение совета экспертов: 20.07.15 Принято к публикации: 23.07.15

Во введении дан критический анализ технологий, принятых в последнее время на практике при переработке отходов сельскохозяйственного и промышленного производства, а также дана оценка способам, описывающим энергосберегающие технологии. В разделе фотосинтез рассмотрены основные фотохимические процессы, протекающие в процессе развития растений. Дана количественная оценка содержания углерода в различных частях биосферы. Показано, что нарушение баланса продуктов синтеза (потребление) и утилизации может привести к необратимым экологическим последствиям. Рассмотрены процессы фотосинтеза растений и установлено, что скорость этих процессов зависит как от внешних условий, так и от техногенных воздействий на окружающую среду. В работе дан анализ обращенного уравнения фотосинтеза и дан анализ механизмов электронных превращений в растительных клетках. При рассмотрении физико-химической сущности фотосинтеза установлено, что основным источником энергии, накапливаемой растениями, является солнечное излучение, а входящие в структуру растений ферменты и системы преобразования представляют сложный механизм по превращению энергии Солнца в энергию биомассы. При анализе спектров поглощения растительной клеткой показано, что основные виды представителей флоры имеют характерные спектры поглощения, максимумы длин которых лежат в области красного излучения и фиолетового. Основная видимая часть спектра (желтый, зеленый, голубой), как правило, отражается биологическим объектом. На основании спектральных характеристик поглощения растений сделаны выводы о том, что для повышения эффективности энергосберегающих технологий необходимо использовать не традиционные применяемые источники искусственного освещения для выращивания растений (ртутные газоразрядные лампы), а сконструированные на основе светодиодов экономичные и с большим ресурсом работы светодиодные преобразователи. Дан анализ скорости процессов преобразования энергии в системах разной светочувствительности и показано, что этот процесс может быть оптимизирован применением систем, позволяющим использовать регулировку светового потока искусственных источников излучения. Рассмотрены экологические процессы, связанные с развитием растений, с точки зрения влияния температуры окружающей среды и соответствия водного режима для аккумулирования биомассы.

Ключевые слова: фотосинтез, биологические рецепторы, квантовые переходы, транспорт электронов, биологическая мембрана, диффузия, АТФ – аденозинтрифосфорная кислота, НАДФ – никотинамидадениндинуклеотидфосфат, синглетный переход, триплетный переход, спектры поглощения, хлоропласт, хлорофилл, β-каротин, фикоэритрин, фикоэритробилин, магнийпорфирин, тилакоид, центр фотосистемы, АТФ-синтаза.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

PHYSICO-CHEMICAL BASIS OF PROCESSES OF FORMATION BIOMASS AND PROSPECTS OF ITS USE IN ALTERNATIVE ENERGY

Yu.N. Shalimov[1], A.V. Epifanov[1], V.I. Kudrjash[2], V.D. Epifanov[1], M.V. Lutovac[3], V.I. Fediyanin[4], E.P. Evseev[5], S.A. Sokolov[6], P.N. Makarov[7], G.Ya. Vlasov[8], G.S. Veranjan[8]

[1]JSC "SCTB "Ferrit"
179/4 Moscow ave., Voronezh, 394066, Russia
Tel.: 8-905-053-45-73, e-mail: shalimov_yn@mail.ru
[2]Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia
53 Patriotov ave., Voronezh, 394065, Russia
Tel.: +7-920-400-04-06, e-mail: kudrjash_vi@mail.ru
[3]Belgrad Union University
Belgrad, Serbia, lutovac@mail.ru
[4]Voronezh State Fire Service Institute of Emergency Ministry
231 Krasnoznamennaya str., Voronezh, 394052, Russia
e-mail: ga-kvashnina@mail.ru
[5]Voronezh State University of Civil Engineering
84, 20th Anniversary of October str., Voronezh, 394006, Russia
[6]LTD «Diodosvet»
234/5, 45th Strelkovoi Divizii str., Voronezh, 394016, Russia
Tel.: +79204022211, e-mail: sergeum@mail.ru
[7]LTD Financial and Industrial Company "KOSMOS-NEFT-GAZ"
180, 9 January str., Voronezh, 394019, Russia
Tel./fax: (473) 247-95-35, e-mail: makarov@kng.vrn.ru
[8]Voronezh State Forestry University (VGLTU)
8 Timiryazev str. Voronezh, 394087, Russia

Referred: 17.07.15 Expertise: 20.07.15 Accepted: 23.07.15

In the introduction to a critical analysis of technologies adopted in the last time, her practice in the processing of waste agricultural and industrial production, as well as the estimation methods for describing the energy-saving technologies. In the photosynthesis of the basic photochemical processes in the development of plants. A quantitative estimation of the carbon content in different parts of the biosphere. It is shown that an imbalance of the synthesis products (consumption) and disposal can lead to irreversible environmental consequences. The processes of photosynthesis in plants and found that the rate of these processes depends on the external conditions and anthropogenic impacts on the environment. The paper analyzes the converted equation of photosynthesis and analyzes the mechanisms of electronic transitions in plant cells. When considering the physical and chemical nature of photosynthesis revealed that the main source of energy stored by plants is solar emition, and included in the structure of plant enzymes and conversion system is a complex mechanism for the conversion of solar energy into biomass. In the analysis of the absorption spectra of plant cell shows that the main types of flora have characteristic absorption spectra, the maximum length of which lie in the region, red and violet emition. The main visible part of the spectrum (yellow, green, blue), is generally reflected the biological object. Based on the spectral absorption characteristics of plants conclusions that to improve the efficiency of energy-saving technologies should be used not traditional sources of artificial light used for growing plants (mercury vapor lamps), and constructed on the basis of cost and LEDs with long service life LED transformation-verter. The analysis of the rate of energy conversion processes in B-tems with different sensitivity and shown that this process can be optimized by the use of systems, allowing use of light flux control artificial sources of emition. The ecological processes associated with the development of the plant in terms of the influence of the ambient temperature and the water regime of compliance to accumulate biomass.

Keywords: photosynthesis, biological receptors, quantum transitions, electron transport, biological membrane, diffusion, ATP – adenosine triphosphate, NADP – nicotinamide, singlet transition, triplet transition, the absorption spectra, the chloroplast, chlorophyll, β-carotene, phycoerythrin, Phycoerythrobilin, magniyporfirin, thylakoids, the center of photosystem, ATP synthase.

Юрий Николаевич Шалимов
Yuri N. Shalimov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры электромеханических систем и электроснабжения ВГТУ. Руководит лабораторией экспериментальных технологий энерго-ресурсосбережения.
Основной круг интересов: электрохимические процессы в водородной энергетике.
Публикации: более 500, 2 монографии.

Information about the author: Doctor of Technical Sciences, Professor of electromechanical systems and electricity VSTU. Directs the laboratory of experimental energy saving technologies.
Research area: electrochemical processes in hydrogen energy.
Publications: more than 500, 2 books.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Александр Вениаминович Епифанов
Alexander V. Epifanov

Сведения об авторе: начальник сектора метрологии ОАО НКТБ «Феррит», зам. начальника отдела надежности, испытаний и метрологии.
Область научных интересов: биологические и биохимические процессы, микробиология, метрологические процессы, энергетика, электрохимия.
Публикации: 5.

Information about the author: chief metrology sector at JSC "SCTB "Ferrit", a deputy head of the department of reliability, testing and metrology. The department is engaged metrology software, testing and calculating the reliability of the products produced by the enterprise. The main directions of the wastewater treatment system without the use of reactive substances using electrochemical techniques of neutralization of the water.
Research area: biological and biochemical processes, microbiology, metrology processes, energy, participation in international conferences on applied and theoretical issues of electrochemistry.
Publications: 5.

Владлен Иванович Кудряш
Vladlen I. Kudrjash

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Радиотехника и электроника» Воронежского института МВД России.
Образование: Воронежский государственный университет (1963).
Область научных интересов: исследование изменения физических свойств ферроиков, связанных с фазовыми переходами, материалы для водородной энергетики.
Публикации: 70.

Information about the author: candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the chair of radio engineering and electronics Voronezh Institute of the Interior of Russia.
Education: Voronezh State University (1963).
Research area: ferroics, phase transitions, hydrogen energy.
Publications: 70.

Вениамин Дмитриевич Епифанов
Venjamin D. Epifanov

Сведения об авторе: главный метролог – начальник отдела надежности, испытаний и метрологии НКТБ «Феррит».
Область научных интересов: метрологическое обеспечение наукоемких технологий.
Публикации: 3.

Information about the author: chief of metrology – head of reliability, testing and metrology JSC "SCTB "Ferrit". The department is engaged metrology software, testing and calculating the reliability of the products produced by the enterprise.
Research area: metrological support of high technologies.
Publications: 3.

Митар В. Лутовац
Mitar V. Lutovac

Сведения об авторе: академик, профессор, доцент Факультета бизнеса и промышленного менеджмента Белградского союзного университета.
Образование: магистратура Технического факультета Чакчак (2008).
Область научных интересов: информационные технологии.
Публикации: более 35.

Information about the author: acad., professor, docent, Faculty of Business and Industrial Management, University Union Belgrade.
Education: magistrature Faculty Cakcak (2008).
Research area: information technology.
Publications: more than 35.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Виталий Иванович Федянин
Vitaly I. Fediyanin

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, профессор по кафедре системного анализа и управления в медицинских и педагогических системах, акад. Международной Академии наук Экологии, Безопасности человека и природы, акад. Национальной Академии Наук Пожарной безопасности.

Область научных интересов: экология, системный анализ, обработка информации.

Публикации: более 700, 2 монографии.

Information about the author: doctor of technical sciences, professor.

Research area: ecology, system analysis, data processing.

Publications: more than 700 papers, 2 books.

Евгений Павлович Евсеев
Evgeny P. Evseev

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Гидравлика, водоснабжение и водоотведение» Воронежского гос. архитектурно-строительного университета.

Образование: МИФИ (1979).

Основной круг интересов: процессы переноса заряда, массы, энергии, гидравлика, энергосберегающие технологии, экология.

Публикации: 12.

Information about the author: candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of "Hydraulics, water supply and sanitation", Voronezh State University of Architecture and Construction.

Education: Moscow Engineering Physics Institute (1979).

Research area: charge transfer processes, mass, energy, hydraulics, energy-saving technology, ecology.

Publications: 12.

Сергей Александрович Соколов
Sergei A. Sokolov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, директор ООО «Диодосвет». Специальность – тепловые двигатели летательных аппаратов.

Основной круг интересов: энергетика тепловых машин, энергосберегающая светотехника.

Публикации: около 50.

Information about the author: candidate of technical sciences, LTD "Diodosvet", director. Specialty – heat engines of aircraft.

Research area: energy thermal machines, energy-saving lighting fixtures.

Publications: about 50.

Павел Николаевич Макаров
Pavel N. Makarov

Сведения об авторе: соискатель ученой степени кандидата технических наук по специальности «Разработка систем автоматического управления и регулирования технологических процессов».

Область научных интересов: математическое моделирование технологических процессов и их аналитическое решение.

Information about the author: applicant degree of candidate of technical sciences on spec-majoring "Development of automatic control and regulation of technological processes".

Research area: mathematical modeling of technological processes and their analytical solution.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Геннадий Яковлевич Власов
Gennadiy Ya. Vlasov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор.
Основной круг интересов: системы очистных сооружений на базе критических технологий.
Публикации: более 80.

Information about the author: Ph.D., Professor.
Research area: System sewage treatment plants on the basis of critical technologies.
Publications: more than 80.

Грантик Седракович Веранян
Grantik S. Veranjan

Сведения об авторе: инженер-технолог.
Основной круг интересов: технологии переработки отходов древесины.
Публикации: 2.

Information about the author: process engineer.
Research area: technology for processing wood waste.
Publications: 2.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Введение

Главной причиной, побудившей авторов к публикации материала этой статьи, стало появление в открытой печати материалов о так называемых «перспективных» направлениях развития современной науки и техники. Глобализация производства в любой отрасли таит в себе опасную перспективу уничтожения природных ресурсов нашей планеты, если при этом не предусмотрены меры по исключению последствий его воздействия на экологическую обстановку. Создание сверхмощных сельскохозяйственных комплексов по производству свинины на ограниченных территориях без проверенной технологии переработки отходов производства – пример такой ситуации.

Принятый на «вооружение» лагунный способ переработки стоков свиноферм – не обеспечивает ни по каким параметрам экологических условий технологии. Предложенные зарубежными производителями биогазовые установки не обеспечивают замкнутый цикл переработки отходов и при этом себестоимость выработанной энергии на биогазовых станциях значительно выше стоимости электроэнергии энергосбытовых компаний.

Достаточно опасной является идея обеспечения энергетической потребности человечества почти даровым сланцевым газом, за ней кроется возможная экологическая катастрофа. Закачка далеко не безопасных реагентов в поверхностные слои грунтов может нарушить сложную природную систему циркуляции водных горизонтов и лишить человека родниковых источников воды. А что кроется за идеей перевести сельскохозяйственные машины на «дешевое» рапсовое топливо? Самые элементарные экономические расчеты показывают, что примерно 10 га черноземной почвы дадут урожай, переработав который, можно обеспечить круглогодичную работу трактора с мощностью двигателя 50 л.с. Вывод из рационального сельхозоборота такого количества земли можно отнести лишь к непродуманным решениям. Ведь получить гораздо большее количество такого синтетического топлива можно другим, менее затратным способом и с большим экономическим эффектом.

Для решения проблемы переработки твердых бытовых отходов в Московском регионе за рубежом были приобретены установки прямого их сжигания при высоких температурах (800-1200 °С). По предлагаемой технологии продукты сгорания (золы) должны захораниваться в карьерах. Но оказалось, что продукты захоронения начинают выделять газы. Анализ показал в их составе наличие бензольных колец. Заключение – технология не доработана до завершения.

И, наконец, одной из актуальных задач современной России является реформирование системы ЖКХ. В общем составе системы раздел водоподготовки и водоотведения занимает одно из главных мест.

В основу технологического процесса заложена биологическая схема очистки, разработанная еще в начале XX века. Биологическая очистка с помощью илов эксплуатировалась практически около 100 лет. За это время на картах хранения отработанных илов скопились запасы органических отходов в сотни тысяч тонн для каждого региона.

Предлагаемые на местах способы утилизации не отличаются оригинальностью: в одних регионах предлагается прессовать и упаковывать илы с последующим захоронением в карьерах, в других – использовать отработанные илы для удобрений в примыкающих к региону лесополосах. Очевидно, авторы этих «инноваций» забывают о том, что в отработанных илах могут находиться соединения хрома, ртути, кадмия и другие компоненты, попадание которых в водные горизонты нанесет непоправимый урон природе.

Одной из проблем индустриализации сельскохозяйственного производства является повышение концентрации поголовья скота и птиц на единицу производственной площади. В связи с этим в производственных помещениях возрастает концентрация продуктов жизнедеятельности животных. Для устранения запахов нами разработана газоразрядная установка непрерывного действия, позволяющая регенерировать атмосферу в неветилируемом помещении. В случае применения приточно-вытяжной вентиляции на выходе из помещения можно использовать ионизатор воздуха любой конструкции и в этом случае чистота атмосферы будет обеспечена.

Авторы ставят перед собой задачу на основе уже известных достижений биологии и физиологии строения клетки, а также результатов собственных экспериментов предложить новые технологии завершенного цикла переработки отходов, исключающие процессы захоронения продуктов переработки.

Итак, необходимыми требованиями к технологиям утилизации отходов производства должны быть следующие:

1. Технология не должна иметь незавершенных циклов (отсутствие непереработанных продуктов).

2. Должна быть энергетически малозатратна и обеспечивать энергоресурс за счет процесса переработки.

3. Не ухудшать экологии среды.

4. Экономически целесообразна.

Фотосинтез

В современной физиологии растений под фотосинтезом подразумевается комплекс процессов поглощения, превращения и использования энергии квантов света для различных реакций, таких как фотолиз воды и восстановление углекислого газа до органических веществ.

В основе фотосинтеза лежат окислительно-восстановительные реакции, в которых электроны переносятся от донора (напр., H_2O, H_2S) к акцептору (CO_2) с образованием восстановленных соединений (углеводов) и выделением O_2 (если донор электронов H_2O) и S (если донор электронов H_2S).

Фотосинтез является основным источником биологической энергии, фотосинтезирующие автотрофы используют ее для синтеза органических веществ из неорганических, гетеротрофы существуют за счет энергии, запасенной автотрофами в виде химических связей, высвобождая ее в процессах дыхания и брожения.

Фотосинтез делает энергию и углерод доступными для живых организмов и обеспечивает выделение кислорода в атмосферу, что необходимо для всех аэробных форм жизни. А человечество зависит от фотосинтеза еще и потому, что оно использует ископаемое энергетическое топливо (уголь, нефть, природный газ, торф), которое образовалось за многие миллионы лет.

По оценкам, на начало 80-х годов XX века годовая фиксация углерода в процессе фотосинтеза составляет $75 \cdot 10^{12}$ кг.

В океане (в основном в составе фитопланктона): $40 \cdot 10^{12}$ кг углерода в год фиксируется в виде CO_2. Большая часть его затем высвобождается при дыхании.

На суше:

– $35 \cdot 10^{12}$ кг углерода в год фиксируется в виде CO_2;

– $10 \cdot 10^{12}$ кг углерода в год выделяется при дыхании растений и животных;

– $25 \cdot 10^{12}$ кг углерода в год выделяется при дыхании редуцентов;

– $5 \cdot 10^{12}$ кг углерода в год высвобождается при сжигании ископаемого топлива; этого количества вполне достаточно для постепенного увеличения концентрации CO_2 в атмосфере и в океанах [1].

Превращения энергии и эффективность фотосинтеза

Солнечная энергия, достигающая в течение года атмосферы Земли, составляет примерно $56 \cdot 10^{23}$ Дж. Около половины этой энергии отражается облаками и газами в верхних слоях атмосферы и не попадает на Землю. Из той энергии, которая достигает поверхности Земли, лишь 50% приходится на спектральный диапазон, соответствующий видимому излучению, которое способно вызвать фотосинтез, а другая половина – это инфракрасное излучение. Таким образом, годовое поступление энергии в виде фотосинтетически активной радиации, т.е. в виде света от фиолетового до красного, составляет в мас-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

штабах всей Земли около $15 \cdot 10^{23}$ Дж. Однако примерно 40% этой энергии отражается поверхностью океанов, попадает в пустыни и т.п., и лишь оставшаяся доля может быть поглощена наземными и водными растениями. Согласно приведенным в последнее время данным, автотрофные растения производят за год примерно $2 \cdot 10^{11}$ тонн биомассы, что эквивалентно энергии $3 \cdot 10^{21}$ Дж. Около 40% этого органического материала синтезируется фитопланктоном, мельчайшими растениями, обитающими вблизи поверхности океанов. Ежегодное потребление продуктов питания всем населением Земли (если считать численность населения равной 4,3 млрд человек) составляет около 800 млн тонн, или $13 \cdot 10^{18}$ Дж. Таким образом, получается, что средний коэффициент использования фотосинтетически активной радиации всей флорой нашей планеты составляет всего лишь 0,2% ($3 \cdot 10^{21}/15 \cdot 10^{23}$), но и из той энергии, которая была поглощена в процессе фотосинтеза, человечество потребляет в виде энергии питательных веществ менее 0,5% ($13 \cdot 10^{18}/3 \cdot 10^{21}$). Интересно отметить, что в 1976 г. потребление энергии в мировом масштабе составило 10^{20} Дж, или одну десятую долю энергии, запасенной за год благодаря фотосинтезу! По сути дела, энергия, содержащаяся в биомассе, имеющейся на сегодняшний день на поверхности Земли (90% этой биомассы составляют деревья), эквивалентна всем нашим разведанным запасам ископаемого топлива, т.е. угля, нефти и газа; а эти запасы по запасенной в них энергии приблизительно соответствуют чистой продукции фотосинтеза всего лишь за 100 лет [2]. Согласно приведенным в источнике [2] данным можно сделать весьма важный вывод о новых перспективных направлениях развития альтернативной энергетики.

Принимая во внимание, что вся воспроизводимая на Земле биомасса не может быть употреблена в пищу человеком и животными, то значительная ее часть может быть использована для утилизации, в результате которой может быть произведена тепловая и электрическая энергия. Кроме того, продукты жизнедеятельности человека и животных могут быть использованы для получения альтернативного топлива с высокой теплотворной способностью. Так, по данным воронежского предприятия «Водоканал», на картах хранения иловых полей сосредоточено около 700000 тонн отходов, из которых, по нашим подсчетам, можно было бы получить около 900 ГВт·ч электрической и вдвое больше тепловой возобновляемой энергии. А по данным управления сельского хозяйства Белгородского региона, ежедневное количество отходов жизнедеятельности животных составляют 4400 тонн. Конечно, значительная часть их может быть использована для производства органических удобрений, а остальное – для генерации энергии. Решение этой проблемы позволит в значительной степени улучшить экологическую обстановку в этих регионах.

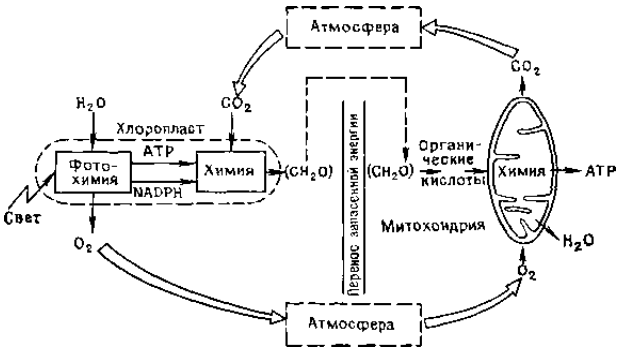

Рис. 1. Циклы CO_2 и O_2 в атмосфере и в клетке
Fig. 1. Cycles CO_2 and O_2 in the atmosphere and in the cell

Возникновение на Земле около 2,8 млрд лет назад механизма окисления воды с образованием O_2 представляет собой важнейшее событие в биологической эволюции, сделавшее свет Солнца главным источником энергии биосферы, а воду – практически неограниченным источником водорода для синтеза веществ в живых организмах. В результате образовалась атмосфера современного состава, O_2 стал доступным для окисления пищи (процесс дыхания), а это обусловило возникновение высокоорганизованных гетеротрофных организмов, которые применяют в качестве источника углерода готовые органические вещества (рис. 1).

Наряду с фотосинтезом высших растений и водорослей, сопровождаемым выделением O_2, в природе осуществляется бактериальный фотосинтез, в котором окисляемым субстратом является не вода, а другие соединения, например H_2S. Кислород при бактериальном фотосинтезе не выделяется:

$$2H_2S + CO_2 + h\nu \rightarrow H_2O + (CH_2O) + S_2. \qquad (1)$$

Фотосинтезирующие бактерии способны использовать не только видимое, но и ближнее ИК излучение (до 1000 нм) в соответствии со спектрами поглощения преобладающих в них пигментов – бактериохлорофиллов. Бактериальный фотосинтез не имеет существенного значения в глобальном запасании солнечной энергии, но важен для понимания общих механизмов фотосинтеза. Кроме того, локально бескислородный фотосинтез может вносить существенный вклад в суммарную продуктивность планктона. Так, в Черном море количество хлорофилла и бактериохлорофилла в столбе воды в ряде мест приблизительно одинаково.

Учитывая данные о фотосинтезе высших растений, водорослей и фотосинтезирующих бактерий, обобщенное уравнение фотосинтеза можно записать в виде

$$2H_2A + CO_2 + h\nu \rightarrow H_2O + (CH_2O) + A_2, \qquad (2)$$

где A – кислород в случае высших растений и водорослей, S либо др. элементы – в бактериальном фотосинтезе.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Солнечная энергия при участии зеленых растений и фотосинтезирующих бактерий преобразуется в свободную энергию органических соединений. Для осуществления этого уникального процесса в ходе эволюции был создан фотосинтетический аппарат, содержащий:

1) набор фотоактивных пигментов, способных поглощать электромагнитное излучение определенных областей спектра и запасать эту энергию в виде энергии электронного возбуждения;

2) специальный аппарат преобразования энергии электронного возбуждения в разные формы химической энергии.

Прежде всего это редокс-энергия, связанная с образованием высоковосстановленных соединений, энергия электрохимического потенциала, обусловленная образованием электрических и протонных градиентов на сопрягающей мембране, энергия фосфатных связей АТФ и других макроэргических соединений, которая затем преобразуется в свободную энергию органических молекул.

Все эти виды химической энергии могут быть использованы в процессе жизнедеятельности для поглощения и трансмембранного переноса ионов и в большинстве реакций метаболизма, т.е. в конструктивном обмене.

Способность использовать солнечную энергию и вводить ее в биосферные процессы и определяет «космическую» роль зеленых растений, о которой так много и горячо говорил и писал великий русский физиолог К.А. Тимирязев.

Процесс фотосинтеза представляет собой очень сложную систему по пространственной и временной организации. Использование высокоскоростных методов импульсного анализа позволило установить, что процесс фотосинтеза включает различные по скорости реакции с характерными временами – от 10^{-15} с (в фемтосекундном интервале времени протекают процессы поглощения и миграции энергии) до 10^{4} с (образование продуктов фотосинтеза).

В современной схеме фотосинтеза можно выделить четыре стадии, которые различаются по природе и скорости реакций, а также по значению и сущности процессов, происходящих на каждой стадии:

$$\begin{array}{cccc} \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} \\ & & & \text{н н н} \\ h\nu \rightarrow \Pi \rightarrow \Pi^{*} \rightarrow \Pi^{A^-}_{(РЦ)Д^+} & & \rightarrow E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow \ldots \rightarrow E_n & \rightarrow \text{-C–C–C-} \\ & & & \text{OH OH OH} \\ \text{(ССК)} & \text{(РЦ)} & \text{(ЭТЦ)} & \text{(углеродный цикл)} \end{array} \quad (3)$$

1 стадия – физическая. Включает фотофизические по природе реакции поглощения энергии пигментами (П), запасания ее в виде энергии электронного возбуждения ($П^*$) и миграции в реакционный центр (РЦ). Все реакции чрезвычайно быстрые и протекают за времена 10^{-15}-10^{-9} с. Первичные реакции поглощения энергии локализованы в светособирающих антенных комплексах (ССК).

2 стадия – фотохимическая. Реакции локализованы в реакционных центрах и протекают за время 10^{-9} с. На этой стадии фотосинтеза энергия электронного возбуждения пигмента реакционного центра $П^*_{(РЦ)}$ используется для разделения зарядов. При этом электрон с высоким энергетическим потенциалом передается на первичный акцептор (A^-), и образующаяся система с разделенными зарядами содержит определенное количество энергии уже в химической форме. Окисленный пигмент восстанавливает свою структуру за счет окисления донора ($Д^+$).

Происходящее в реакционном центре преобразование одного вида энергии в другой представляет собой центральное событие процесса фотосинтеза, требующее жестких условий структурной организации системы.

Образующиеся на фотохимической стадии первичные продукты очень лабильны, и электрон может вернуться к окисленному пигменту (процесс рекомбинации) с бесполезной потерей энергии. Поэтому необходима быстрая дальнейшая стабилизация образованных восстановленных продуктов с высоким энергетическим потенциалом, что осуществляется на следующей стадии фотосинтеза.

3 стадия – реакции транспорта электронов. Ряд переносчиков (Е) с различной величиной окислительно-восстановительного потенциала образует так называемую электрон-транспортную цепь (ЭТЦ). Редокс-компоненты ЭТЦ организованы в хлоропластах в виде трех основных функциональных комплексов – фотосистемы I (ФС1), фотосистемы II (ФС2), цитохром b_6f-комплекса, что обеспечивает высокую скорость электронного потока и возможность его регуляции. В результате работы ЭТЦ образуются высоковосстановленные продукты: восстановленный ферредоксин и НАДФН, а также богатые энергией молекулы АТФ, которые используются в «темновых» реакциях восстановления CO_2, составляющих 4 стадию фотосинтеза.

4 стадия – «темновые» реакции поглощения и восстановления углекислоты. Реакции проходят с образованием углеводов, конечных продуктов фотосинтеза, в форме которых запасается солнечная энергия, поглощенная и преобразованная в «световых» реакциях фотосинтеза. Времена протекания «темновых» энзиматических реакций – 10^{-2}-10^{4} с.

Физико-химическая сущность процесса фотосинтеза

Фотосинтез можно определить как процесс преобразования электромагнитной энергии в энергию химических связей, сопровождающийся увеличением энергетического потенциала системы.

Все живые системы представляют собой термодинамически открытые системы, осуществляющие непрерывный обмен веществом и энергией с внешней средой. Для высших растений, водорослей и не-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

которых бактерий источником энергии является энергия солнечного излучения, при поглощении которой возрастают уровни свободной энергии (ΔF) и общей энергии (ΔU) (в последней значительную часть составляет электронная энергия) и снижается энтропия системы ($T\Delta S$):

$$\Delta F = \Delta U - T\Delta S. \quad (4)$$

Накопление энергии при фотосинтезе сопряжено с химической и электронной перестройкой участвующих в процессе компонентов.

В химическом отношении накопление энергии в процессе фотосинтеза связано с перестройкой химических связей. В соответствии с общим уравнением при фотосинтезе происходит разрыв связей в молекулах CO_2 (O=C=O) и H_2O (H-O-H) и возникает иной тип химических связей (C-C, C-H, CH_2O):

$$6CO_2 + 6H_2O = C_6H_{12}O_6 + 6O_2. \quad (5)$$

Разрыв связей в молекулах CO_2 и H_2O требует затраты энергии +2510,4 кДж/моль (+600 ккал/моль) в расчете на CH_2O. При образовании связей (в CH_2O) энергия освобождается –2037,6 кДж/моль (–487 ккал/моль) и накапливается в продуктах реакции. Следовательно, необходимо ввести дополнительные ΔE = 472,8 кДж/моль, чтобы из прочных, но бедных энергией CO_2 и H_2O образовался CH_2O, или 2871,5 кДж/моль для синтеза молекулы углевода $C_6H_{12}O_6$ – менее стабильного, но богатого энергией соединения. Источником дополнительной энергии служит солнечная энергия, которая и накапливается в конечных продуктах фотосинтеза.

Физический смысл фотосинтеза состоит в том, что в этом процессе происходит электронная перестройка молекул. В целом фотосинтез – окислительно-восстановительный процесс, в ходе которого электроны от воды (редокс-потенциал H_2O/O_2 $E_м$ = = +0,81 В) переносятся к пиридин нуклеотидам (редокс-потенциал НАДФ$^+$/НАДФН $E_м$ = –0,32 В), где электроны находятся на более высоком энергетическом уровне. Перенос электрона идет против термодинамического потенциала и требует энергии. Разность окислительно-восстановительных потенциалов окисления воды и восстановления НАДФ$^+$ равна 1,2 В. Следовательно, для переноса одного электрона против термодинамического потенциала необходимо затратить 1,2 эВ энергии. В итоге электронной перестройки компонентов и образования восстановленных соединений (НАДФН) накапливаются электроны с высоким энергетическим потенциалом. Таким образом, в световых реакциях фотосинтеза при поглощении энергии фотонов создается мощный восходящий поток электронов против градиента термодинамического потенциала. В результате создается большой фонд богатых энергией электронов с запасом энергии 1,5-2 эВ. Эта редокс-энергия в процессах фотосинтетического и окислительного фосфорилирования преобразуется в другие виды химической энергии (электрохимический потенциал, энергия фосфатных связей АТФ). Соединения, образующиеся в результате работы ЭТЦ, имеют высокий восстановительный потенциал (–0,43 В, –0,6 В). Создание мощного восстановительного потенциала в фотосинтезе имеет решающее значение для осуществления важнейших метаболических процессов и, прежде всего, для восстановления CO_2.

Таким образом, главное значение фотосинтеза состоит в генерации электронов с высоким энергетическим и восстановительным потенциалом.

Поэтому в процессе реакции фотосинтеза в растениях происходит аккумулирование энергии в биомассе. Запасенная в биомассе энергия может быть преобразована в тепловую, механическую и электрическую. При этом наиболее эффективным способом преобразования следует считать газогенераторный (газификация твердого топлива с получением горючих газов: смеси окиси углерода, метан, водород). При этом способе КПД генератора обращенного действия составляет около 40%.

По результатам испытаний опытно-промышленного образца газогенератора обращенного типа нами предложена новая система обратной связи, оптимизирующая режимы работы теплового и электрического генераторов. В качестве звена обратной связи использован электрохимический преобразователь. Элементом нагрузки используется система электродов, на которых протекают реакции:

катод:

$$2H^+ + 2e \rightarrow 2H^0 \rightarrow H_2; \quad (6)$$

$$nH^+ + mMe^0 \rightarrow Me_mH_n, \quad (7)$$

анод:

$$2H_2O - 4e \rightarrow 4H^+ + O_2. \quad (8)$$

(6) – процесс выделения газообразного водорода;

(7) – процесс образования гидрида металла;

(8) – реакция выделения кислорода.

В качестве электрода (катода) накопителя топлива могут быть использованы металлы с высокой концентрацией дефектов в структуре.

С целью повышения концентрации водорода в смеси генерируемых газов предусмотрено использование катализаторов на основе оксидов никеля и железа. Катализаторы размещены в восстановительной зоне газогенератора. Следует отметить, что восстановление двуокиси углерода (CO_2) в восстановительной зоне протекает по достаточно простой схеме:

$$CO_2 + C \xrightarrow{t^\circ} 2CO. \quad (9)$$

Восстановление идет с образованием горючего газа.

Конструктивное исполнение вариантов газогенератора представлено на рис. 2 и 3.

На рис. 2 – упрощенный вариант конструкции, а на рис. 3 представлена более сложная система газогенерации, включающая в себя фильтры грубой и

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

тонкой очистки газов, а также системы регулирования температуры. При этом в системе (рис. 3) предусмотрен вариант, включающий в себя элемент гидрирования топлива с целью повышения его теплотворной способности.

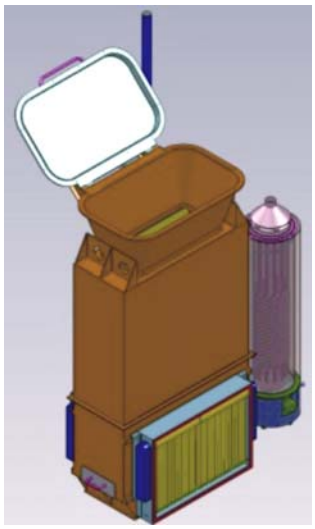

Рис. 2. Газогенератор с рабочей камерой прямоугольного сечения
Fig. 2. The gas generator to the working chamber of rectangular cross section

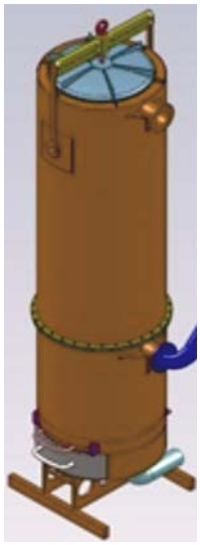

Рис. 3. Газогенератор цилиндрического типа прямого действия, включает в себя: корпус, фланец выхода горючего газа, загрузочный люк и узел выгрузки отработанного топлива
Fig. 3. The gas generator of the cylindrical type of direct action include: housing, output flange fuel gas charging port and unloading of spent fuel assembly

При переработке отходов жизнедеятельности человека и животных часто предпочитают использовать биогазовые реакторы. Как было отмечено во введении, для эффективной работы бактерий в биогазовый реактор, как правило, загружают весьма ценные продукты (силосную массу или свекольный жом). По этой причине себестоимость электроэнергии значительно увеличивается.

На рис. 4 представлен общий вид устройств очистки технологических стоков, верхний слой которых насыщен продуктами очистки. В качестве флотирующего реагента используется электролитический водород.

Результаты проверки работы флотатора показали, что на 1 м^3 воды для ее очистки этим способом необходимо затратить 70-80 Вт·ч электрической энергии.

Рис. 4. Общий вид флотатора
Fig. 4. General view of the skimmer

Использование бактериального способа переработки отходов пока нельзя считать завершенным технологическим процессом, поскольку остающиеся после выработки загруженной в начале процесса биомассы (полужидкая фракция, переработанная микробами) подлежит захоронению. Такие незавершенные циклы несут прямую угрозу экологической обстановке в регионе.

Поэтому для завершения цикла такие установки должны включать в себя, например, систему окончательной переработки остатков биомассы, содержащую обращенный газогенератор или анаэробную пиролизную печь, обеспечивающие стерилизацию отходов. Выбор системы окончательной переработки будет определяться химическим составом сброженной биомассы. В этом случае технологический цикл можно считать завершенным, так как отсутствует стадия захоронения отходов.

Из сказанного выше следует, что для создания эффективных циклов безотходной переработки биологических материалов требуется детальная информация о стадиях и законах функционирования биосистем как на различных этапах развития и роста, так и на этапах их деструкции с постоянным контролем результатов переработки.

Теперь необходимо хотя бы вкратце описать те органы, структуры, органеллы и молекулы, которые принимают непосредственное участие в процессе фотосинтеза.

Лист как орган растения, приспособленный к фотосинтезу, сформировался в результате длительного эволюционного процесса. Он представляет собой эффективную систему для поглощения и преобразования энергии света в ходе фотосинтеза. Структура листа обеспечивает наиболее полное поглощение квантов света, поступление углекислого газа из атмосферы к хлоропластам, а также возможность оттока ассимилятов из автотрофных клеток.

Лист представляет собой уникальную оптическую систему – ловушку для света. Лист поглощает значительную часть излучения в видимой области спектра (400-700 нм). Большую часть синего и красного света поглощают пигменты хлоропластов первых слоев клеток хлоренхимы. Свет, не поглощенный в верхних слоях листа, обогащен лучами зеленой области спектра. Его многократное отражение от

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

стенок клеток в толще листа значительно увеличивает оптический путь и повышает вероятность поглощения лучей этой области спектра, несмотря на то что коэффициент поглощения хлорофилла в зеленой области значительно меньше, чем в синей и красной.

Структура листа (рис. 5) обеспечивает поступление углекислого газа из воздуха для реакций фотосинтетической ассимиляции углерода. Газообмен клеток листа с окружающим воздухом осуществляется через устьица. Количество устьиц, величина устьичной щели являются важными факторами регуляции фотосинтеза. Значительный объем подустьичного пространства, а также достаточно рыхлое расположение клеток в листе и существование больших межклетников позволяют создать большие воздушные запасы в толще листа для непрерывного снабжения углекислым газом углеродных циклов фотосинтеза.

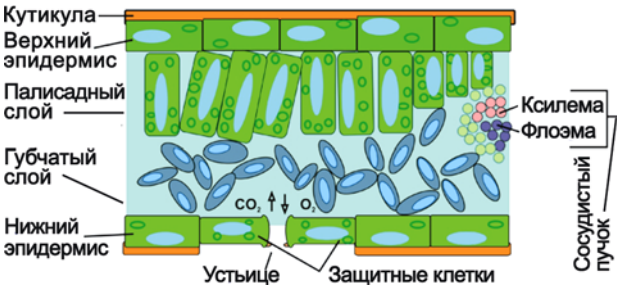

Рис. 5. Внутреннее строение листа
Fig. 5. The internal structure of the leaf

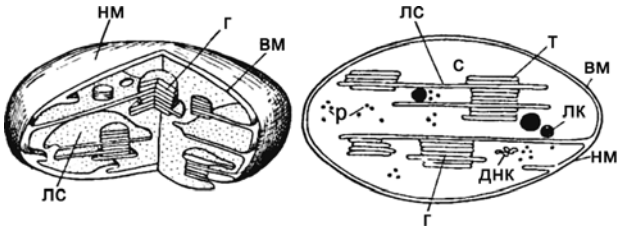

Рис. 6. Строение хлоропласта (Васильев и др., 1978): ЛС – ламелла стромы; Г – грана; ЛК – липидная капля; НМ – наружная мембрана; ВМ – внутренняя мембрана; С – строма; Р – рибосомы; Т – тилакоид
Fig. 6. The structure of the chloroplast (Vasiliev et al., 1978): ЛС – stroma lamella; Г – grain; ЛК – lipid droplets; НМ – outer membrane; ВМ – the inner membrane; С – stroma; P – the ribosome; T – thylakoids

Основными фотосинтезирующими элементами клеток растений являются хлоропласты (рис. 6). В дополнение к внешней и внутренней мембранам оболочки эти органеллы имеют еще и третью систему мембран – тилакоиды. Белки и пигменты (хлорофиллы и каротиноиды), принимающие участие в фотохимических процессах фотосинтеза, сгруппированы в определенных участках именно тилакоидной мембраны.

Растительные организмы содержат несколько видов пигментов, каждый из которых выполняет определенные функции. Обычно в пластидах высших растений и водорослей встречаются пигменты трех основных классов – хлорофиллы (рис. 7), каротиноиды (рис. 8) и фикобилины (рис. 9). Пигменты пластид связаны с белками. Фикобилины связаны с белками ковалентно и образуют фикобилипротеины. Хлорофиллы и каротиноиды ассоциированы с соответствующими белками с помощью ионных, гидрофобных и координационных связей. Молекула хлорофилла состоит из порфириновой «головки» и фитольного «хвоста». При этом порфириновая часть молекулы находится на поверхности мембраны тилакоида и связана с белками, а жирорастворимая фитольная цепь погружена в липидный слой. Пигмент-белковые комплексы обеспечивают упорядоченную ориентацию хромофорных групп и повышают эффективность их функционирования [2].

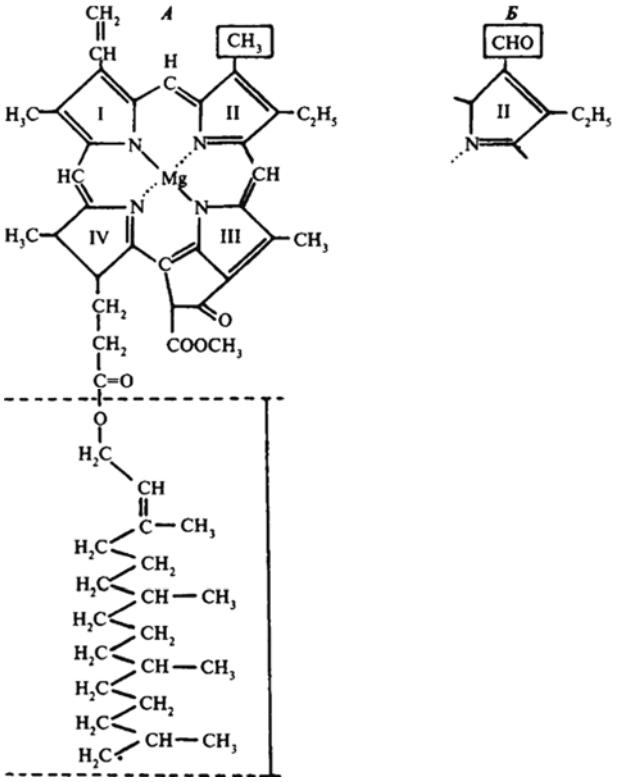

Рис. 7. Строение хлорофилла *a* (*A*) и хлорофилла *b* (*B*)
Fig. 7. The structure of chlorophyll *a* (*A*) and chlorophyll *b* (*B*)

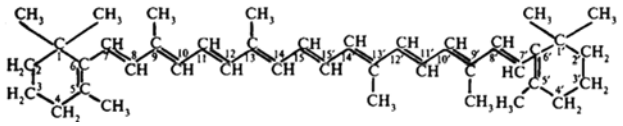

Рис. 8. Структура β-каротина
Fig. 8. Structure of β-carotene

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

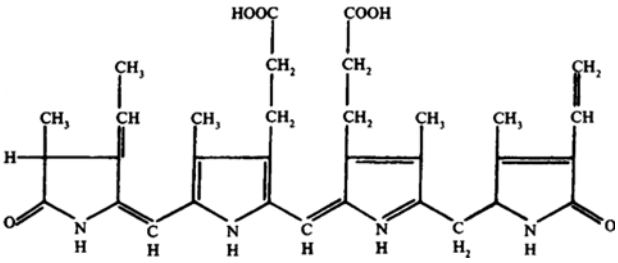

Рис. 9. Хромофорная группа фикоэритринов (фикоэритробилин)
Fig. 9. Chromophore groups phycoerythrin (Phycoerythrobilin)

Хлорофиллы имеют два максимума поглощения света – в синей (430-460 нм) и красной (650-700 нм) областях спектра (рис. 10). Сине-фиолетовый максимум поглощения хлорофиллов обеспечивается резонансной структурой порфиринового кольца. Поглощение света в красной области спектра связано с наличием магния и гидрированием двойной связи в положении C_7-C_8 IV-пиррольного ядра [2].

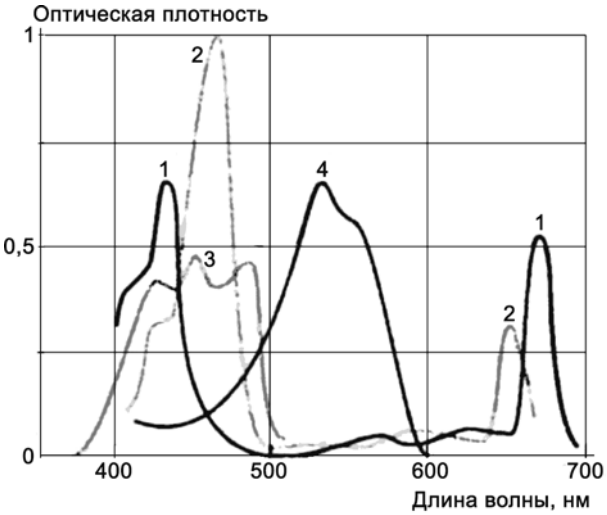

Рис. 10. Спектры поглощения некоторых фотосинтезирующих пигментов (Avers, 1985): 1 – хлорофилл *a*; 2 – хлорофилл *b*; 3 – β-каротин; 4 – фикоэритробилин
Fig. 10. The absorption spectra of some photosynthetic pigments (Avers, 1985): 1 – chlorophyll *a*; 2 – chlorophyll *b*; 3 – β-carotene; 4 – phycoerythrobilin

Анализируя характер спектров поглощения фотосинтетических пигментов различной природы (рис. 10), можно установить, что в видимой части спектра у некоторых видов пигментов (фикоэритробилин) диапазон поглощаемых длин волн расширяется. Фикоэритробилин – открытый тетрапиррольный хромофор, входящий в состав фикоэритрина, дополнительного красного фотосинтетического пигмента, который обнаружен у цианобактерий и красных водорослей. Максимум поглощения в видимой части спектра – примерно 495 и 546/566 нм и зависит от конкретного организма. Фикоэритрин поглощает зелено-голубой свет. Такой спектр поглощения определяется особенностью среды обитания водорослей в толще воды, куда не проникает излучение других длин волн.

Спектральные диапазоны света имеют следующие физиологические значения:

– 280-320 нм: оказывает вредное воздействие;

– 320-400 нм: регуляторная роль, необходимо несколько процентов;

– 400-500 нм («синий»): необходим для фотосинтеза и регуляции;

– 500-600 нм («зеленый»): полезен для фотосинтеза оптически плотных листьев, листьев нижних ярусов, густых посевов растений благодаря высокой проникающей способности;

– 600-700 нм («красный»): ярко выраженное действие на фотосинтез, развитие и регуляцию процессов;

– 700-750 нм («дальний красный»): ярко выраженное регуляторное действие, достаточно несколько процентов в общем спектре.

– 1200-1600 нм: поглощается внутри- и межклеточной водой, увеличивает скорость тепловых биохимических реакций

На основании анализа влияния спектральных диапазонов на физиологию растений можно сделать весьма важные выводы:

– При выборе типа светильников для искусственного освещения и досвечивания теплиц следует учитывать специфические особенности спектров их излучения.

– Практика использования для этих целей традиционных ламп, по-видимому, не может быть оправдана, т.к. в спектре их излучения присутствуют длины волн, которые не соответствуют физиологическим потребностям развития растений.

– Максимально полно этим потребностям соответствуют спектры, формируемые специальными светодиодными светильниками. Светодиодные светильники агротехнического назначения способны сформировать пики излучения в областях максимального поглощения с возможностью раздельного регулирования интенсивности излучения в этих областях (рис. 11).

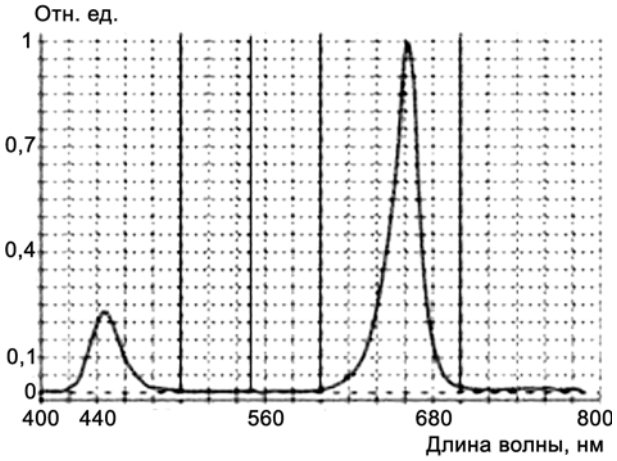

Рис. 11. Спектр светодиодной агротехнической лампы, разработанной ООО «Диодосвет», г. Воронеж
Fig.11. The range o fthe discharge LED agrolamp, «Diodosvet», Voronezh

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Физические механизмы процессов поглощения, запасания и миграции энергии молекулами хлорофилла достаточно хорошо изучены.

Поглощение фотона ($h\nu$) обусловлено переходом системы в различные энергетические состояния. В молекуле в отличие от атома возможны электронные, колебательные и вращательные движения, и общая энергия молекулы равна сумме этих видов энергий. Основной показатель поглощающей системы – уровень ее электронной энергии – определяется энергией внешних электронов на орбите. Поглощение энергии света сопровождается переходом одного из электронов на более высокую орбиту с запасанием поглощенной энергии в виде энергии электронного возбуждения. Важнейшая характеристика поглощающих систем – избирательность поглощения, определяемая электронной конфигурацией молекулы. В сложной органической молекуле есть определенный набор свободных орбит, на которые возможен переход электрона при поглощении квантов света. Согласно «правилу частот» Бора, частота поглощаемого или испускаемого излучения ν должна строго соответствовать разности энергий между уровнями:

$$\nu = (E_2 - E_1)/h, \qquad (10)$$

где h – постоянная Планка, равная $6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж/с.

Каждый электронный переход соответствует определенной полосе поглощения. Таким образом, электронная структура молекулы определяет характер электронно-колебательных спектров.

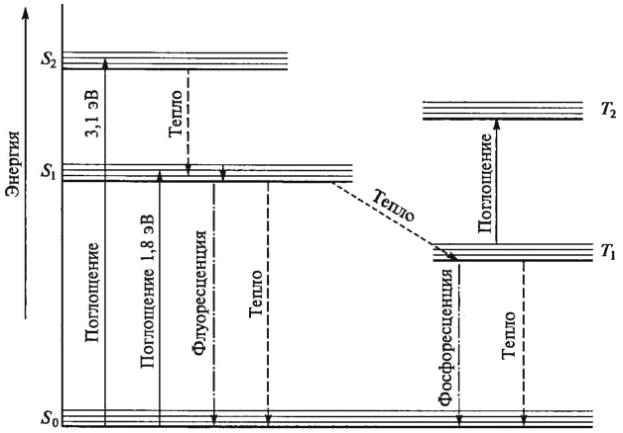

Рис. 12. Схема электронных переходов для магний-порфиринов в полярном растворителе: S_0 – основное состояние; S_1, S_2 – первое и второе синглетные возбужденные состояния; T_1, T_2 – первое и второе триплетные возбужденные состояния

Fig. 12. The scheme of electronic transitions in polar solutions magnesium porphyrins-TV: S_0 – the ground state; S_1, S_2 – first and second singlet excited state; T_1, T_2 – the first and second excited triplet state

Запасание поглощенной энергии связано с возникновением электронно-возбужденных состояний пигментов. Физические закономерности возбужденных состояний Mg-порфиринов могут быть рассмотрены на основе анализа схемы электронных переходов этих пигментов (рис. 12). Известно два основных типа возбужденных состояний – синглетные и триплетные. Они отличаются по энергии и состоянию спина электрона. В синглетном возбужденном состоянии спины электронов на основном и возбужденном уровнях остаются антипараллельными, при переходе в триплетное состояние происходит поворот спина возбужденного электрона с образованием бирадикальной системы. При поглощении фотона молекула хлорофилла переходит из основного (S_0) в одно из возбужденных синглетных состояний – S_1 или S_2, что сопровождается переходом электрона на возбужденный уровень с более высокой энергией. Возбужденное состояние S_2 очень нестабильно. Электрон быстро (в течение 10^{-12} с) теряет часть энергии в виде тепла и опускается на нижний колебательный уровень, где может находиться в течение 10^{-9} с. В состоянии S_1 может произойти обращение спина электрона и переход в триплетное состояние T_1, энергия которого ниже S_1.

Возможно несколько путей дезактивации возбужденных состояний:

– превращение энергии возбуждения в тепло (термальная диссипация энергии);

– излучение фотона с переходом системы в основное состояние (флуоресценция или фосфоресценция);

– перенос энергии на другую молекулу;

– использование энергии возбуждения в фотохимической реакции.

Миграция энергии между молекулами пигментов может осуществляться по следующим механизмам.

Индуктивно-резонансный механизм (механизм Ферстера) возможен при условии, когда переход электрона оптически разрешен и обмен энергией осуществляется по экситонному механизму. Понятие «экситон» означает электронно-возбужденное состояние молекулы, где возбужденный электрон остается связанным с молекулой пигмента и разделения зарядов не происходит. Перенос энергии от возбужденной молекулы пигмента к другой молекуле осуществляется путем безызлучательного переноса энергии возбуждения. Электрон в возбужденном состоянии представляет собой осциллирующий диполь. Образующееся при этом переменное электрическое поле может вызвать аналогичные колебания электрона в другой молекуле пигмента при выполнении условий резонанса (равенство энергии между основным и возбужденным уровнями) и условий индукции, определяющих достаточно сильное взаимодействие между молекулами (расстояние не более 10 нм).

Обменно-резонансный механизм миграции энергии Теренина – Декстера имеет место в том случае, когда переход оптически запрещен и диполь при возбуждении пигмента не образуется. Для его осуществления необходим тесный контакт молекул (около 1 нм) с перекрыванием внешних орбиталей. В

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

этих условиях возможен обмен электронами, находящимися как на синглетных, так и на триплетных уровнях [4].

Состав, строение и функции фотосистем I и II, комплекса цитохромов b_6/f и АТФ-синтазного комплекса

Образование НАДФН, АТФ и O_2 в ламеллах хлоропластов происходит при переносе электронов по цепи переносчиков. Для переноса электронов необходимо, чтобы каждый переносчик поочередно восстанавливался и окислялся, обеспечивая таким образом перенос энергии электронов по цепи. Восстановление означает присоединение электрона к молекуле переносчика, а окисление – потерю электрона молекулой. Любой этап переноса электрона сопровождается высвобождением или поглощением энергии. На некоторых участках электрон-транспортной цепи перенос электрона сопровождается переносом протона (рис. 13).

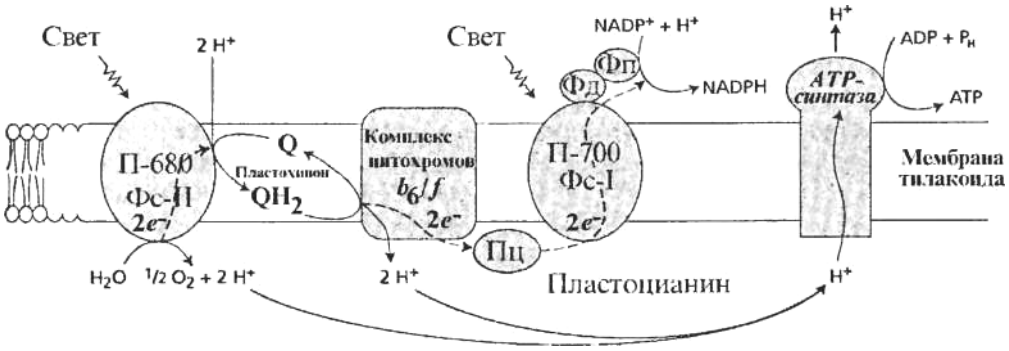

Рис. 13. Транспорт электронов и протонов в мембране тилакоидов (Taiz, Zeiger, Blankenship, 1998)
Fig. 13. Transport of electrons and protons in the membrane thylakoids (Taiz, Zeiger, Blankenship, 1998)

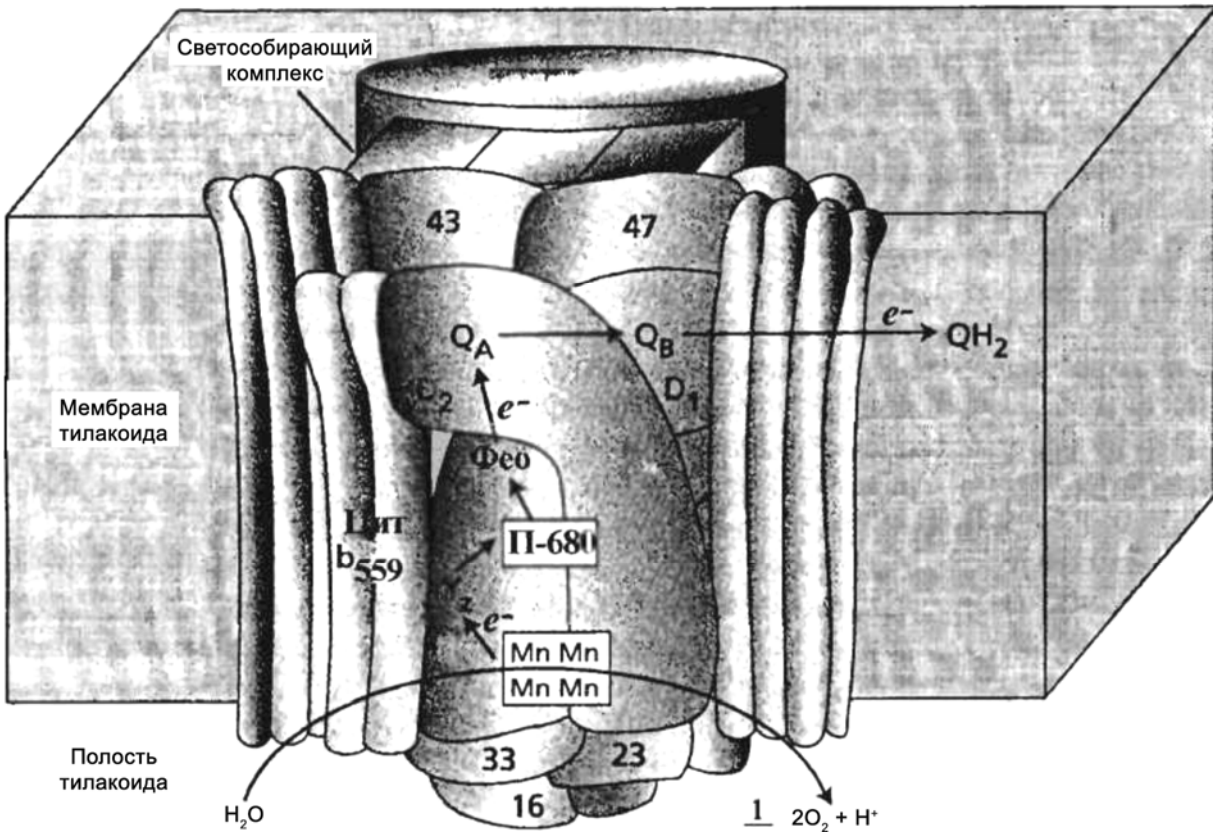

Рис. 14. Строение кислородовыделяющего центра фотосистемы II (Hankamerea, 1997)
Fig. 14. Structure oxygen released center of photosystem II (Hankamerea, 1997)

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Реакционный центр фотосистемы II включает кислородовыделяющий комплекс; первичный донор электронов – хлорофилл *a* с максимумом поглощения 680 нм (П-680); первичный акцептор электронов феофитин *a* (Фео) – производное хлорофилла, в котором атом Mg замещен протонами; вторичные акцепторы – молекулы менахинона (Q*a* и Q*b*). Ядро реакционного центра фотосистемы II составляют два мембранных белка с молекулярной массой 32 и 34 кДа, известных как D_1 и D_2 соответственно (рис. 14). Оба этих белка имеют по пять трансмембранных петель и служат основой для связывания большинства простетических групп, выполняющих функции переносчиков электронов. Другие белки фотосистемы II обслуживают светособирающий комплекс (43 и 47 кДа) или участвуют в выделении кислорода при фотоокислении воды (33, 23 и 16 кДа). Функции остальных белков, например цитохрома b_{559} и некоторых других с небольшой молекулярной массой, пока еще не выявлены. В кислородовыделяющий центр входят Mn-содержащий кластер и как кофакторы – кальций и хлор. Посредником между кислородовыделяющим центром и хлорофиллом П-680 является остаток аминокислоты тирозина (Yz) белка D_1.

Комплекс цитохромов b_6/f состоит из цитохрома b_6 (цит b_6), цитохрома f (цит f), железо-серного *белка Риске* $(F_2S_2)_R$ и субъединицы IV. Цитохром b_6 и субъединица IV являются наиболее гидрофобными элементами комплекса. Основная часть молекулы цитохрома f расположена в полости тилакоида, в то время как ее С-концевой участок находится на его поверхности. Простетическая группа цитохрома f представлена гемом с-типа. Простетическую группу цитохрома b_6 составляют два гема b-типа, ковалентно связанные с остатками гистидина. Эти два гема называют низкопотенциальным (*L*) и высокопотенциальным (*H*), соответственно, от англ. low и high potential. От комплекса цитохромов b_6/f электроны передаются на пластоцианин (Пц) – водорастворимый белок, содержащий два атома меди, который восстанавливает окисленную форму хлорофилла П-700.

Строение и функционирование АТФ-синтазного комплекса. Синтез АТФ при фосфорилировании осуществляет *АТФ-синтаза* (АТФаза или сопрягающий фактор) (рис. 15). Этот фермент с молекулярной массой около 400 кДа состоит из 2 крупных частей: гидрофобной, расположенной в тилакоидной мембране (CF_0), и гидрофильной, находящейся в строме (CF_1). Протоны проходят через канал, формируемый белками, входящими в состав CF_0, попадают в комплекс белков CF_1, где процесс транспорта ионов H^+ сопрягается с процессом фосфорилирования АДФ и образования АТФ. В CF_1-комплекс входит 5 типов полипептидов: α (три), β (три), γ (один), δ (один) и ε (один). Каталитический центр располагается на β-субъединицах. Другие пептиды выполняют обслуживающие функции. В CF_0-комплекс входит 4 типа пептидов (a, b, b' и c_{12}).

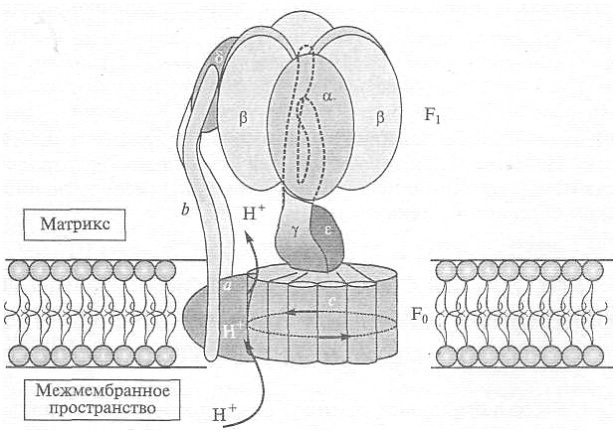

Рис. 15. Строение АТФ-синтазы хлоропластов
Fig. 15. The structure of the ATP synthase of chloroplasts

АТФ-синтаза играет ключевую роль в процессах трансформации световой энергии в хлоропластах и запасания ее в форме макроэргических связей. Для объяснения механизма функционирования этого комплекса лучше всего подходит гипотеза, предложенная Полем Бойером (P.D. Boyer, 1993 г.). Наиболее принципиальным моментом этой гипотезы является энергозависимое высвобождение АТФ от фермента. Предполагается, что в ходе катализа γ-субъединица работает как стержень-эксцентрик, который попеременно вращается то против β-, то против α-субъединиц. Энергия конформационных изменений трансформируется в энергию фосфатной связи АТФ.

Процесс синтеза АТФ условно разделяют на три этапа. На первом этапе происходит присоединение АДФ и $Ф_н$ (неорганического фосфата) к активному центру фермента без затраты энергии. На втором этапе ионы H^+, перемещаясь по протонному каналу по градиенту электрохимического потенциала, вызывают конформационные изменения фермента, в результате чего из АДФ и $Ф_н$ синтезируется АТФ. В течение третьего этапа за счет энергии, выделяющейся при транспорте протонов, происходит высвобождение АТФ и возврат АТФ-синтазного комплекса в исходное состояние [2].

Исследования кинетических закономерностей работы ЭТЦ показывают, что скорость транспорта электронов на отдельных участках ЭТЦ хлоропластов варьируется в широких временных пределах. Наиболее быстрые процессы проходят в реакционных центрах, где первичное разделение зарядов достигается за 1-3 пс. Перенос электронов на других участках ЭТЦ идет значительно медленнее, чем в РЦ (за время порядка нано-, микро- и миллисекунд). Наиболее медленная стадия переноса электронов (5 мс) находится на участке ЭТЦ между двумя фотосистемами, она связана с окислением пластохинолов цитохромным комплексом. На втором участке цепи, где скорость переноса электронов также оценивается в миллисекундном интервале, происходит перенос электронов от восстановленного ферредоксина к

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

НАДФ$^+$. В связи с этим общая скорость переноса электронов в ЭТЦ хлоропластов, очевидно, будет определяться скоростью потока электронов именно на этих двух участках ЭТЦ – между двумя фотосистемами и на акцепторной стороне ФС1.

Различия в скорости транспорта электронов на отдельных участках связаны с реализацией разных физических механизмов переноса электронов. В мультипептидных комплексах наиболее вероятен резонансный механизм, когда перенос электрона от донора к акцептору предполагает резонансные взаимодействия редокс-центров с белковой молекулой, при которых возникает эффект туннелирования электрона через энергетический барьер. Скорость переноса электронов при этом определяется физическим контактом компонентов. Особое значение в этом случае приобретают электронно-конформационные взаимодействия в комплексах, создание особого конформационного состояния белка в ходе окислительно-восстановительных реакций. Перенос электронов между комплексами предполагает миграцию подвижных низкомолекулярных переносчиков в мембране или по ее поверхности и осуществляется по диффузионному механизму. Диффузионные процессы – более медленные, чем резонансные, поэтому именно они являются скорость-лимитирующими в ЭТЦ [4]. Общий энергетический выход потока электронов при этом составляет 1 молекулу АТФ и 1 молекулу НАДФН на 2 электрона. Путем сравнения энергии этих соединений с энергией света, обеспечивающего их синтез, было вычислено, что в процессе фотосинтеза запасается примерно 1/3 энергии поглощенного света.

Темновые реакции (стадия синтеза)

Синтез органических соединений путем восстановления CO_2 (а также нитрата и сульфата) тоже происходит в хлоропластах. АТФ и НАДФН$_2$, поставляемые световой реакцией, протекающей на тилакоидных мембранах, служат для реакций синтеза источником энергии и электронов. Восстановление CO_2 есть результат переноса электронов на CO_2. В ходе этого переноса некоторые из связей С-О заменяются на связи С-Н, С-С и О-Н. Процесс состоит из ряда этапов, часть которых (15 или более) образует цикл. Этот цикл был открыт в 1953 химиком М. Калвином и его сотрудниками [4]. В цикле Калвина участвуют соединения с числом атомов углерода в молекулах от трех до семи. Все компоненты цикла, за исключением одного, представляют собой сахарофосфаты, т.е. сахара, у которых одна или две ОН-группы заменены на фосфатную группу (-ОРО$_3$Н-). Исключение составляет 3-фосфоглицериновая кислота (ФГК; 3-фосфоглицерат), представляющая собой фосфат сахарной кислоты. Цикл начинается с рибулозомонофосфата, содержащего пять атомов углерода (C_5). Образующийся в световой стадии АТФ реагирует с рибулозомонофосфатом, превращая его в рибулозобисфосфат. Вторая фосфатная группа придает рибулозобисфосфату дополнительную энергию, поскольку несет в себе часть энергии, запасенной в молекуле АТФ. Поэтому тенденция реагировать с другими соединениями и образовывать новые связи выражена у рибулозобисфосфата сильнее. Именно этот C_5-сахар присоединяет CO_2 с образованием шестиуглеродного соединения. Последнее очень неустойчиво и под действием воды распадается на два фрагмента – две молекулы ФГК. Следующий этап состоит в том, что две молекулы ФГК, образовавшиеся в реакции карбоксилирования, восстанавливаются каждая за счет одной молекулы НАДФН$_2$ до трехуглеродного сахарофосфата (триозофосфата).

Весь описанный выше процесс может быть представлен следующими уравнениями:

$$\text{Рибулозомонофосфат+АТФ}\rightarrow\text{Рибулозобисфосфат+АДФ}; \quad (11)$$

$$\text{Рибулозобисфосфат} + CO_2 \rightarrow \text{нестойкое } C_6\text{-соединение}; \quad (12)$$

$$\text{Нестойкое } C_6\text{-соединение} + H_2O \rightarrow 2\ \text{ФГК}; \quad (13)$$

$$\text{ФГК+АТФ+НАДФН}_2\rightarrow\text{АДФ+НРО}_4^{2-}\text{+Триозофосфат}(C_3). \quad (14)$$

Конечным результатом реакций (11)-(14) оказывается образование из рибулозомонофосфата и CO_2 двух молекул триозофосфата (C_3) с затратой двух молекул НАДФН$_2$ и трех молекул АТФ. Именно в этой серии реакций представлен весь вклад световой стадии – в форме АТФ и НАДФН$_2$ – в цикл восстановления углерода.

Значение последующих этапов цикла сводится к тому, что они приводят к регенерации пятиуглеродного соединения, рибулозомонофосфата, необходимого для возобновления цикла.

Таким образом, в результате одного оборота цикла одна молекула диоксида углерода включается в состав трехуглеродного органического соединения; три оборота цикла суммарно дают новую молекулу последнего, а для синтеза молекулы шестиуглеродного сахара (глюкозы или фруктозы) необходимы две трехуглеродные молекулы и, соответственно, 6 оборотов цикла.

Экология фотосинтеза

В интактном листе три главных метаболических элемента определяют оптимальные параметры процесса фотосинтеза: активность РУБИСКО (фермент, катализирующий фиксацию CO_2), регенерация рибулозобисфосфата (РуБФ) и метаболизм триозофосфатов. Первые два элемента в значительной степени зависят от внешних условий, и в первую очередь от концентрации CO_2 и освещенности. На продуктивность фотосинтеза также влияют температура, обеспеченность растения водой и минеральными элементами.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Свет

Лист высших растений поглощает свет в красной и синей областях спектра, а отражает зеленые лучи. Большая часть (60%) попадающего на лист солнечного излучения не может участвовать в фотохимических процессах, поскольку имеет длину волны, которая не поглощается пигментами листа. Из оставшихся 40% фотосинтетически активных лучей солнечного спектра длиной волны 400-700 нм, часто называемых *фотосинтетически активной радиацией* (ФАР), 8% отражается поверхностью и проходит через лист; 8% рассеивается в виде тепла, 19% тратится (как тепловая энергия) на процессы, непосредственно не связанные с фотосинтезом, и только 5% попадающей на лист солнечной энергии превращается в энергию химических связей углеводов.

Анализ зависимости интенсивности фиксации CO_2 от мощности светового потока может дать очень полезную информацию о фотосинтетических свойствах листа.

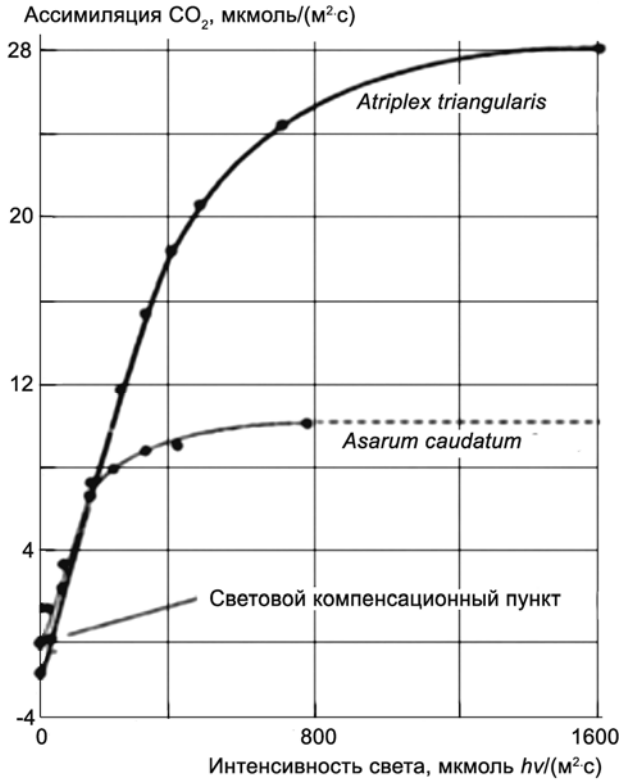

Рис. 16. Зависимость фотосинтеза от интенсивности света у лебеды *Atriplex triangularis* (светолюбивое растение) и у копытня *Asarum caudatum* (теневыносливое растение) (Harvey, 1979)

Fig. 16. The dependence of photosynthesis on light intensity in quinoa *Atriplex triangularis* (photophilous plant) and ungulates *Asarum caudatum* (shade tolerance) (Harvey, 1979)

При низкой освещенности на световой кривой можно выделить точку, когда количества углекислоты, поглощаемой при фотосинтезе и выделяемой в результате дыхания, равны. Эта точка называется *световым компенсационным пунктом* (рис. 16). Увеличение освещенности выше светового компенсационного пункта вызывает постепенное возрастание интенсивности фотосинтеза. На этом участке интенсивность фиксации CO_2 лимитируется только мощностью светового потока. При дальнейшем увеличении интенсивности света кривая выходит на плато, что свидетельствует о насыщении процесса связывания углекислоты. В этих условиях процесс фотосинтеза уже лимитируется только содержанием CO_2.

У светолюбивых видов растений насыщение происходит при более высокой освещенности (10-40 тыс. лк), чем у теневыносливых (1000 лк). Если же светолюбивое растение, например *Atriplex triangularis,* вырастить при низкой освещенности (рис. 17), то насыщение будет происходить гораздо раньше.

Активность фотосинтеза в области насыщающей интенсивности света лимитируется концентрацией CO_2 и зависит от мощности системы поглощения и восстановления углекислоты. Чем выше способность растения к восстановлению CO_2, тем выше проходит световая кривая фотосинтеза. Поэтому у растений с C_3-путем фиксации CO_2 насыщение происходит при более низкой освещенности, чем у C_4-растений, которые имеют более эффективную систему связывания углекислоты.

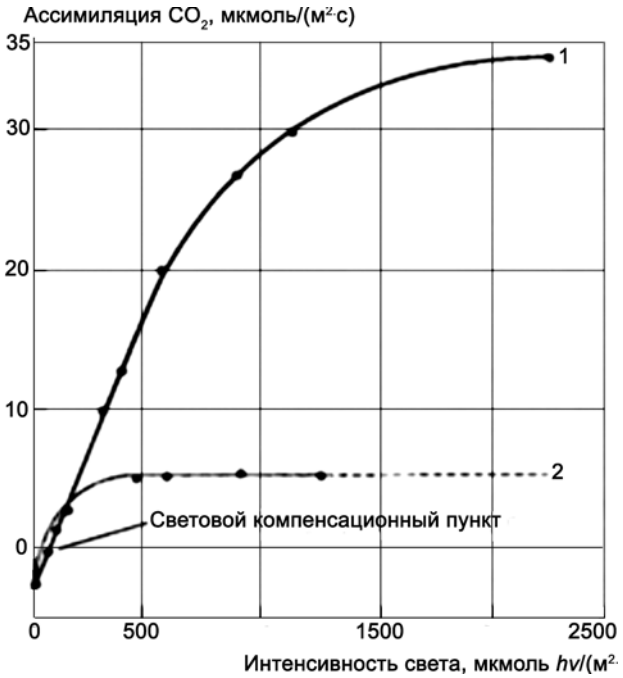

Рис. 17. Изменение интенсивности фотосинтеза листьев у лебеды *Atriplex triangularis,* выращенной при различной освещенности (Bjorkman, 1981):
1 – растения выращены при освещении 920 мкмоль *hv*/(м^2·с);
2 – при освещении 92 мкмоль *hv*/(м^2·с)

Fig. 17. Changes in the rate of photosynthesis in leaves saltbush *Atriplex triangularis* grown under different illumination (Bjorkman, 1981):
1 – the plants are grown at 920 micromole light *hv*/(m^2·s);
2 – 92 mol illuminated *hv*/(m^2·s)

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

При фотохимических процессах важен спектральный состав падающего света. Для фотосинтеза наиболее эффективны красные и синие лучи, поскольку именно они соответствуют максимуму поглощения хлорофилла. Энергия квантов красного света составляет 41 ккал/моль, а энергия квантов синего света – 57 ккал/моль. Достигаемые же ими фотохимические эффекты одинаковы.

Углекислота

Содержание CO_2 в атмосфере составляет 0,036%, или 360 ppm (part per million – частей на миллион). Содержание водяных паров в атмосферном воздухе обычно около 2%, а O_2 – 21%. Основной же объем атмосферного воздуха (около 80%) приходится на азот.

Следует отметить, что многие биологические процессы, в которых участвуют газы (например, функционирование РУБИСКО), определяются не концентрацией, а парциальным давлением газа (CO_2 или O_2). В таких случаях необходимо знать не концентрацию, а парциальное давление, которое вычисляется умножением молярного содержания газа на общее атмосферное давление. Например, на уровне моря, где атмосферное давление составляет 0,1 МПа, парциальное давление CO_2 составит 36 Па (0,036% от 0,1 МПа).

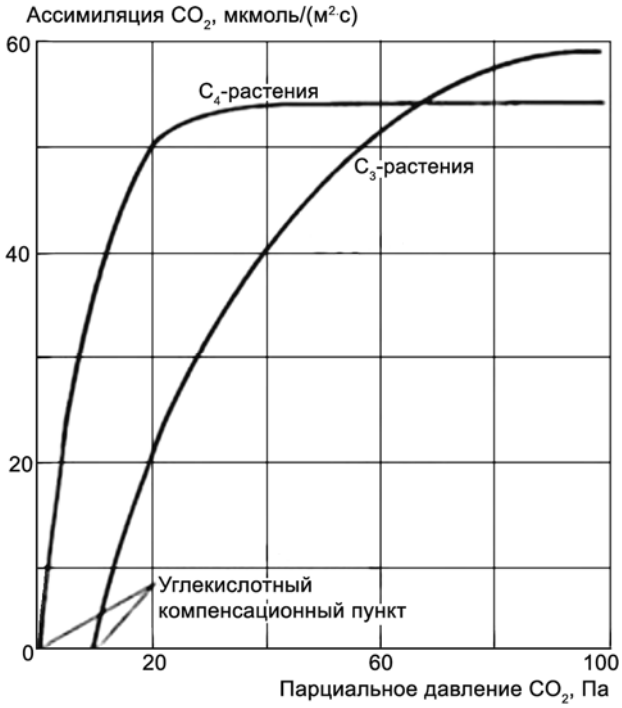

Рис. 18. Зависимость интенсивности фотосинтеза от парциального давления CO_2 у C_4-растения таволги аризонской, *Tidestromia oblongifolia*, и C_3-растения креозотового куста, *Larrea divaricata* (Berry, Downton, 1982)
Fig. 18. The dependence of the rate of photosynthesis on the partial pressure of CO_2 in C_4-plants meadowsweet Arizona, *Tidestromia oblongifolia*, and C_3-plant creosote bush, *Larrea divaricata* (Berry, Downton, 1982)

На рис. 18 показана зависимость интенсивности фотосинтеза от содержания (парциального давления) CO_2 в атмосфере. При низких концентрациях углекислоты у C_3-растений количество CO_2, фиксированное при фотосинтезе, меньше, чем количество CO_2, выделяемое при дыхании. При повышении содержания CO_2 в воздухе можно зафиксировать точку, в которой суммарное поглощение углекислоты в фотосинтезе (соответственно, и выделение при дыхании) равно 0. Эта концентрация CO_2 называется *углекислотным компенсационным пунктом.* Этот параметр характеризует соотношение между процессами фотосинтеза и дыхания в зависимости от содержания CO_2 в атмосфере. У C_3-растений, например *Larrea divaricata,* возрастание концентрации CO_2 выше углекислотного компенсационного пункта вызывает пропорциональную активацию фотосинтеза. У C_4-растения *Tidestromia oblongifolia* насыщение фотосинтетической активности наступает при более низкой концентрации (около 0,02%), чем среднее содержание CO_2 в атмосфере.

Температура

Зависимость интенсивности фотосинтеза от температуры имеет вид параболы с максимумом от 25 до 35 °С (рис. 19). Однако если концентрация CO_2 в воздухе будет выше, то температурный оптимум сместится до 35-38 °С. Именно при этих температурах хорошо идут многие ферментативные реакции.

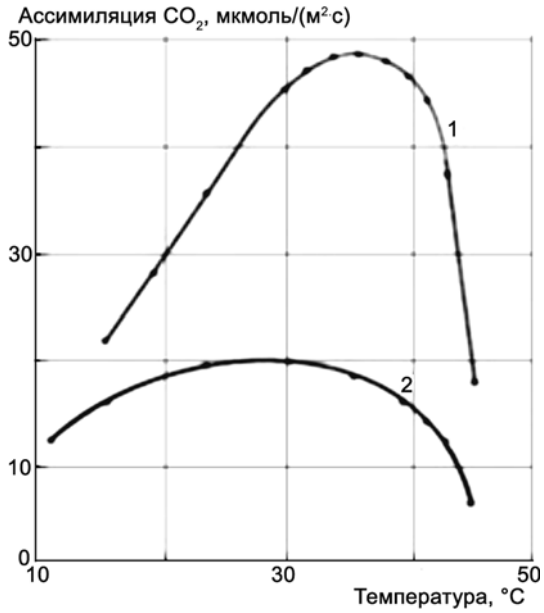

Рис. 19. Зависимость интенсивности фотосинтеза от температуры (Berry, Bjorkman, 1980):
1 – при концентрации CO_2, насыщающей процесс фотосинтеза;
2 – при содержании CO_2 в воздухе 0,036%
Fig. 19. The dependence of the rate of photosynthesis on temperature (Berry, Bjorkman, 1980):
1 – when the CO_2 concentration, saturating the process of photosynthesis;
2 – with the content of CO_2 in the air 0.036%

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

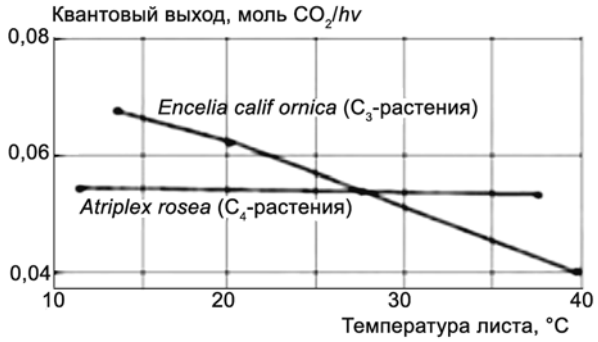

Рис. 20. Квантовый выход фотосинтеза у C_3-растения *Encelia calif ornica* и C_4-растения лебеды *Atriplex rosea* в зависимости от температуры (Ehleringer, Bjorkman, 1977)
Fig. 20. The quantum yield of photosynthesis in plants C_3 *Encelia calif ornica* and C_4 plants saltbush *Atriplex rosea* depending on the temperature (Ehleringer, Bjorkman, 1977)

Квантовый выход фотосинтеза у C_4-растений не меняется в диапазоне температур от 12 до 40 °C (рис. 20). Совсем другая зависимость наблюдается у C_3-растений, у которых с повышением температуры квантовый выход фотосинтеза снижается. Это снижение является результатом активации фотодыхания у C_3-растений при повышенных температурах. Поэтому продуктивность C_4-растений выше в южных регионах, а C_3-растений – в северных.

Оптимальные температурные условия для процесса фотосинтеза определяются прежде всего генотипом и условиями обитания растения. Растения, обитающие в условиях низких температур, как правило, имеют более высокие скорости реакций, чем растения, произрастающие в условиях высоких температур.

Высокая солнечная радиация опасна не только для животных, но и для растительных организмов. В полуденные часы (12-14 ч) температура листьев может становиться на 5-10 °C выше температуры воздуха. В этот период, который иногда называют *полуденной депрессией фотосинтеза,* клетки переполняются крахмалом, нарушается отток ассимилятов, активизируются процессы, приводящие к накоплению свободных радикалов. У растений имеется несколько уровней защиты от повреждения солнечной радиацией. Первый уровень защиты связан с рассеиванием в виде тепла энергии света, поглощенной листом. На втором уровне начинает функционировать система утилизации образующихся токсических продуктов (активных форм кислорода, перекисей, свободных радикалов), которая включает каротиноиды, аскорбиновую кислоту и различные формы супероксиддисмутаз. Если же второй уровень защиты не справляется, токсические продукты вызывают повреждение в первую очередь тех молекул, которые особенно чувствительны к свету, например белка D1, входящего в состав фотосистемы II [2, 5].

Водный режим

Значение водного режима для фотосинтеза определяется в первую очередь действием воды на состояние устьиц листа: до тех пор, пока устьица остаются оптимально открытыми, интенсивность фотосинтеза не изменяется под влиянием колебаний водного баланса. Частичное или полное закрывание устьиц, вызванное дефицитом воды в растении, приводит к нарушению газообмена и снижению поступления углекислого газа к карбоксилирующим системам листа. Вместе с тем при водном дефиците снижается активность ферментов цикла Кальвина, обеспечивающих регенерацию рибулозобисфосфата, и в значительной степени ингибируется фотофосфорилирование. В результате в условиях водного дефицита наблюдается ингибирование фотосинтетической активности растений. При длительном дефиците воды возможно снижение общей фотосинтетической продуктивности растений, в том числе и за счет уменьшения величины листьев, а сильное обезвоживание может в итоге вызвать нарушение структуры хлоропластов и полную потерю их фотосинтетической активности [4].

В заключение хотелось бы отметить тот факт, что использование в качестве биотоплива возобновляемых биологических ресурсов позволяет не только поднять общую энергоэффективность получения энергии, но и напрямую улучшить экологическое состояние окружающей среды, что, в свою очередь, обеспечит условия для интенсивного воспроизводства биоресурсов.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Список литературы

1. Грин Н., Стаут У., Тейлор Д. Биология: В 3-х т. Т. 1 / Пер. с англ. / под ред. Р. Сопера. М.: Мир, 1990.
2. Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: СПбГУ, 2004.
3. http://toptropicals.com/html/aqua/lamps/hidlamps. htm «Газоразрядные лампы высокой интенсивности».
4. Физиология растений / под ред. проф. Ермакова И.П. М.: Академия, 2005.
5. Эдвардс Дж., Уокер Д. Фотосинтез C_3- и C_4-растений: механизмы и регуляция. М., 1986.
6. Фотосинтез: В 2-х т. Т. 1 / Пер. с англ. / под ред. Говинджи. М.: Мир, 1987.
7. Холл Д., Рао К. Фотосинтез / Пер. с англ. М.: Мир, 1983.

References

1. Grin N., Staut U., Tejlor D. Biologiâ: V 3-h t. T. 1 / Per. s angl. / pod red. R. Sopera. M.: Mir, 1990.
2. Medvedev S.S. Fiziologiâ rastenij. SPb.: SPbGU, 2004.
3. http://toptropicals.com/html/aqua/lamps/hidlamps. htm «Gazorazrâdnye lampy vysokoj intensivnosti».
4. Fiziologiâ rastenij / pod red. prof. Ermakova I.P. M.: Akademiâ, 2005.
5. Èdvards Dž., Uoker D. Fotosintez C_3- i C_4-rastenij: mehanizmy i regulâciâ. M., 1986.
6. Fotosintez: V 2-h t. T. 1 / Per. s angl. / pod red. Govindži. M.: Mir, 1987.
7. Holl D., Rao K. Fotosintez / Per. s angl. M.: Mir, 1983.

Транслитерация по ISO 9:1995