

Ф. Я. СИДЬКО, член-корреспондент АН СССР И. А. ТЕРСКОВ,  
Г. Ф. БЕРЕСНЕВ, Н. С. ЕРОШИН, В. А. ЗАХАРОВА

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОСИНТЕЗА  
ОДНОКЛЕТОЧНОЙ ВОДОРОСЛИ ХЛОРЕЛЛЫ

Нами проведено изучение зависимости эффективности утилизации лучистой энергии одноклеточной водорослью хлореллой от условий ее облучения.

Водоросль выращивалась в плоскопараллельных реакторах-кюветах, облучаемых с одной или с двух сторон ксеноновыми лампами ДКсТВ-6000 при стабилизации основных параметров культивирования (1). Культура интенсивно перемешивалась с помощью барботажа воздухом, содержащим до 5% углекислоты.

Продуктивность и эффективность фотосинтеза хлореллы существенно зависят от предыстории культуры, от условий облучения клеток, от со-

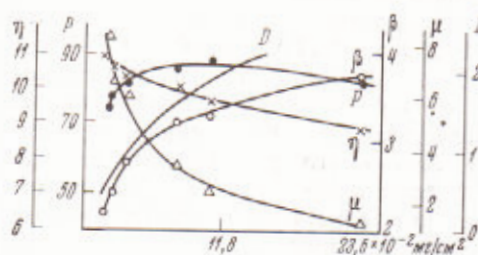


Рис. 1

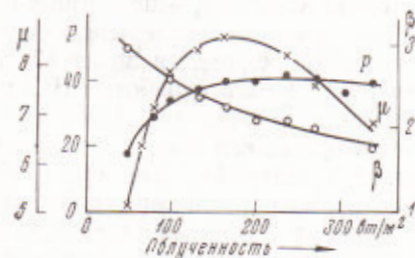


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость скорости роста  $\mu$  (сутки<sup>-1</sup>), продуктивности  $P$  (г·м<sup>-2</sup>·сутки<sup>-1</sup>, к.д. фотосинтеза  $\eta$  (%), интегральной оптической плотности  $D$ , относительного содержания хлорофилла в биомассе  $\beta$  (%) от поверхностной концентрации хлорофилла при облученности культуры хлореллы  $I_0 = 240$  Вт·м<sup>-2</sup> ф.а.р.

Рис. 2. Зависимость величины  $P$  (г·м<sup>-2</sup>·сутки<sup>-1</sup>),  $\mu$  (сутки<sup>-1</sup>),  $\beta$  (%) культуры хлореллы от облученности  $I_0$  при  $D \approx 0,3$

стояния фотосинтетического аппарата, в частности от относительного содержания пигментов, от питательной среды, pH, температуры и т. д.

На рис. 1 показана зависимость скорости роста  $\mu$ , продуктивности  $P$ , относительного содержания хлорофилла в биомассе  $\beta$ , к.д. фотосинтеза  $\eta$  и интегральной оптической плотности  $D$  от поверхностной концентрации хлорофилла при облученности культуры  $240$  Вт·м<sup>-2</sup> фотосинтетически активной радиации (ф.а.р.). Из рис. 1 видно, что максимальная продуктивность культуры с единицы облучаемой поверхности достигается при выращивании водоросли, поглощающей практически всю (до 97—98%) падающую на нее ф.а.р. Для этой культуры оптимальная интегральная оптическая плотность взвеси водорослей, определяемая равенством

$$D = -\lg T, \quad (1)$$

равна

$$D = \lg \frac{I_0}{I_{\text{комп}}}, \quad (2)$$

где  $T$  — коэффициент пропускания ф.а.р. культурой,  $I_0$  — максимальная



облученность поверхности культуры,  $I_{\text{ном}}$  — облученность клеток, соответствующая компенсационному пункту.

Рис. 2 иллюстрирует связь величин  $P$ ,  $\beta$ ,  $\mu$  с облученностью для относительно «жидкой» культуры ( $D = 0,3$ ). Из кривых рис. 2 следует, что скорость роста до облученностей  $I_0 \approx 80$   $\text{вт} \cdot \text{м}^{-2}$  ф.а.р. примерно линейно возрастает, достигая при  $I_0 =$

$= 100$   $\text{вт} \cdot \text{м}^{-2}$  максимального значения  $\mu = 8$   $\text{сутки}^{-1}$ . Фотосинтетический аппарат хлореллы обладает значительной лабильностью, он перестраивается в соответствии с радиационным режимом. При высоких облученностях концентрации хлорофилла может уменьшаться в 2—2,5 и более раз, при этом средний размер клеток увеличивается, и заметные изменения претерпевает атомо-морфологическая структура водорослей, в частности снижается степень агрегации белково-липидно-пигментного комплекса, приводящая к уменьшению аномальной дисперсии в области полос поглощения. Происходит снижение концентрации белков и соответственно увеличение углеводов и липидов в биомассе клеток. Несмотря на такие глубокие изменения в пигментной системе, морфологии и биохимическом составе, фотосинтетическая активность клеток остается высокой, достигая максимальных значений.

Опыт показывает, что к.п.д. фотосинтеза хлореллы при стационарном режиме ее культивирования обычно повышается в случае соответствия фотосинтетического аппарата (концентрация и состав пигментов и др.) условиям облучения клеток. Если это соответствие не достигается, то меньшему значению  $\beta$  соответствует большая эффективность фотосинтеза (<sup>2</sup>) (см. рис. 3). В период перехода с высоких облученностей на низкие к.п.д. фотосинтеза значительно выше, чем к.п.д. в стационарном установившемся режиме культивирования (положительный эффект светоадаптации), и может приближаться к теоретическим возможным значениям к.п.д. фотосинтеза — до 23—25% и более. При переходе с низких облученностей на высокие ( $I_0 > I_{\text{нас}}$ ) наблюдается обратное явление (отрицательный эффект светоадаптации). Процесс светоадаптации при измененных уровнях облученности длится до 8—12 час. и более.

В плотных культурах облученность клеток периодически меняется, причем к.п.д. фотосинтеза отдельных клеток также осциллирует с частотой модуляции потока ф.а.р. (<sup>2</sup>). В этих культурах радиационный режим не является оптимальным. Фотосинтетический аппарат значительную часть времени не соответствует оптимальным условиям облучения клеток, и культура фотосинтезирует в общем с более низким к.п.д., чем это достигается в условиях равномерного облучения клеток.

Однако в специальных экспериментальных установках представляется возможным создать рациональный радиационный режим и реализовать возможности повышения к.п.д. фотосинтеза, используя положительные эффекты при светоадаптации в переходные периоды. Такой экспериментальной установкой может быть многослойный культиватор, состоящий из автономно работающих в турбидостатном режиме реакторов. Даже в простейшем варианте — двухслойном культиваторе, облучаемом с одной стороны, удается значительно повысить продуктивность и эффективность фотосинтеза водорослей.

Процесс культивирования в двухслойном культиваторе ведется так, что урожай из первого слоя с высокой облученностью, где клетки обладают

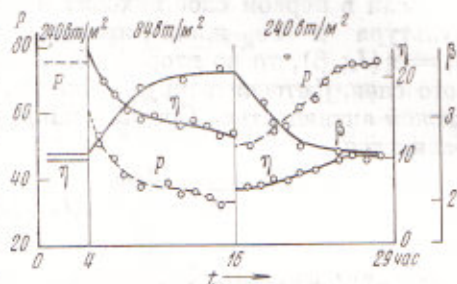


Рис. 3. Продуктивность  $P$  ( $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ ), к.п.д. фотосинтеза хлореллы  $\eta$  (%) и относительное содержание хлорофилла  $\beta$  (%) в переходные периоды при ступенчатом изменении облученности



более высокой фотосинтетической активностью, перекачиваются во второй слой с более низкой облученностью; из последнего слоя отбирается и общий урожай. Интегральная оптическая плотность первого слоя культуры  $D \leq 0,5-0,6$ , а суммарная оптическая плотность двух слоев культуры примерно соответствует величине  $D$ , определяемой равенством (2).

Если в первом слое находится сравнительно однородная асинхронная культура и ее к.п.д. является функцией облученности  $I_0$ , т. е.  $\eta_1 = \eta(I_0; \beta)$ , то во втором слое, вследствие поступления клеток из первого слоя, фотосинтезируют клетки, обладающие различной фотосинтетической активностью. Средний к.п.д. фотосинтеза культуры во втором слое равняется

$$\bar{\eta}_2 = \int_{\beta_0}^{\beta_{\min}} \eta(I_0; \beta) f(\beta) d\beta / \int_{\beta_0}^{\beta_{\min}} f(\beta) d\beta, \quad (3)$$

где  $f(\beta)$  — функция распределения клеток по фотосинтетической активности.

В двухслойном культиваторе эффективность утилизации лучистой энергии заметно повышается. Например, при облученностях 240 и 480  $\text{вт} \cdot \text{м}^{-2}$  ф.а.р. эта эффективность фотосинтеза по сравнению с однослойным возрастает на 25 и 40% соответственно. Заметим, что величина  $\eta_2$  при  $I_0 = 408 \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2}$  ф.а.р. достигает 19%, что примерно в 1,5 раза выше к.п.д. фотосинтеза хлореллы, выращиваемой в однослойном культиваторе при оптимальных облученностях  $I_0 \approx 80-100 \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2}$  ф.а.р.

Проведенные эксперименты показывают, что одним из путей, позволяющих заметно повысить эффективность фотосинтеза водоросли хлореллы, выращиваемой при высоких ( $I_0 > I_{\text{нас}}$ ) облученностях, является создание оптимального радиационного режима в культуре с использованием положительных эффектов светоадаптации переходных процессов.

Из приведенных выше результатов следует, что одним из важнейших и перспективных путей, обеспечивающих получение весьма высоких продуктивностей и эффективностей фотосинтеза микроводорослей, является создание рационального радиационного режима в них. Закономерности, установленные для этой водоросли, видимо, в известной мере, присущи большинству фототрофов как одноклеточных, так и высших растений.

Институт физики им. Л. В. Киренского  
Сибирского отделения Академии наук СССР  
Красноярск

Поступило  
15 II 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Б. Г. Ковров, Е. С. Мельников и др., Сборн. Непрерывное управляемое культивирование микроорганизмов, «Наука», 1967, стр. 14. <sup>2</sup> Ф. Я. Сидько, В. Н. Белянин и др., Сборн. Актинометрия и атмосферная оптика, Таллин, 1968, стр. 326.