

**РАСЧЕТ КПД ФОТОБИОСИНТЕЗА У НИЗШИХ ФОТОТРОФОВ.****1. НЕПРЕРЫВНАЯ КУЛЬТУРА.**

Разработан алгоритм расчета КПД фотобиосинтеза у низших фототрофов в условиях непрерывных культур. Пример расчета продемонстрирован на культуре *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. Отмечено, что использование фотобиореактора плоскопараллельного типа, либо в форме прямого цилиндра с освещением любого из оснований, предпочтительней из-за минимального объема вычислений и возможности расчета с минимальной погрешностью.

Низшие фототрофы широко используются в биотехнологической практике. Научный и практический интерес представляют: получение из биомассы микроводорослей и фотосинтезирующих бактерий целого ряда ценных, биологически активных веществ; использование некоторых видов водорослей в качестве стартовых кормов при разведении моллюсков; использование микроводорослей в очистке сточных вод и пр. Развитие данных направлений привело к разработке различного рода методов и приемов культивирования низших фототрофов в управляемых условиях с использованием солнечного или искусственного света. Известно, что организация производства биомассы или ее составляющих требует знания двух важнейших кинетических характеристик: продуктивности и удельной скорости роста [8]. При культивировании фототрофов, в особенности с использованием искусственных источников освещения, кроме указанных характеристик важным также является эффективность использования клетками световой энергии – КПД фотобиосинтеза. Несмотря на то, что это важнейшее понятие введено еще в 1984 г [1], его крайне редко используют в биологической литературе. Возможно, такая ситуация сложилась в связи с тем, что расчет КПД фотобиосинтеза требует достаточно большого числа рутинных вычислений, что препятствует его широкому распространению. Однако, с появлением высокопроизводительной компьютерной техники стало возможным исключить подобные недочеты и значительно повысить скорость и качество расчета данной величины.

**Цель данной работы** – разработать алгоритм расчета КПД фотобиосинтеза у низших фототрофов в условиях непрерывных культур (стационарного динамического равновесия).

**Постановка задачи.** Пусть имеется культиватор плоскопараллельного типа с зеркальным дном, крышкой и боковыми стенками, т.е. зеркальными являются плоскости перпендикулярные рабочей поверхности (рис. 1). Пусть по всему объему культуральной среды равномерно распределены фотосинтезирующие клетки, которые перемешиваются и не образуют скоплений. Пусть, также мы имеем дело с непрерывной культурой, находящейся в стационарном динамическом равновесии, т.е. рост не лимитирован, все удельные скорости равны, кроме того, неизменными остаются спектральные характеристики клеток. Зная величину продуктивности, калорийность единицы биомассы, спектр культуры, интенсивность падающей на рабочую поверхность радиации и геометрические параметры культиватора, требуется рассчитать величину КПД фотобиосинтеза.

По определению КПД фотобиосинтеза есть отношение двух величин: запасенной ( $E_x$ ) и поглощенной энергии ( $E_p$ )

$$\text{КПД} = \frac{E_x}{E_p} \cdot 100\% \quad (1)$$

Величина  $E_x$  определяется произведением прироста биомассы  $X$  и ее калорийностью  $R$ , т. е.

$$E_x = R \cdot X = R \cdot P \cdot V = R \cdot \omega \cdot B \cdot V, \quad (2)$$

где  $P$  – продуктивность или абсолютная скорость роста, г/(л · сут);

$V$  – рабочий объем культуры, л;

$\omega$  – удельная скорость протока питательной среды, л/сут;

$B$  – текущая плотность биомассы, г/л.

Заметим, что в условиях стационарного динамического равновесия продуктивность непрерывной культуры равна произведению удельной скорости протока на плотность биомассы в культиваторе [8].

Для определения количества поглощенной световой энергии используется закон Бугера-Ламберта-Бера, который представляется как:

$$I = I_0 \cdot 10^{-D} \quad \text{или} \quad -\lg(I/I_0) = D, \quad I/I_0 = T, \quad (3)$$

где  $I_0$  – интенсивность пучка монохроматического света, падающего на поверхность культиватора, Вт/м<sup>2</sup>;

$I$  – интенсивность света, прошедшего сквозь культиватор, Вт/м<sup>2</sup>;

$D$  – оптическая плотность, ед. опт. плотности;

$T$  – пропускание, %.

Разница между входящим и выходящим световым потоком и будет поглощенной частью при данной длине волны:

$$I_{\Pi} = I_0 - I \quad (4)$$

Разделив обе части равенства на  $I_0$ , запишем коэффициент поглощения  $\alpha_{sp}$  для соответствующей световой волны:

$$\alpha_{sp} = (I_0 - I) / I_0 = 1 - T \quad (5)$$

Тогда,

$$I_{\Pi} = \alpha_{sp} \cdot I_0 \quad (6)$$

Для разных длин волн светового потока величина  $\alpha_{sp}$  зависит от спектра культуры. Поэтому, чтобы найти суммарную величину необходимо просуммировать значения  $\alpha_{sp}$  для каждой длины волны из области ФАР<sup>1</sup>:

$$\alpha = \int_{400}^{700} \alpha_{sp}(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Поглощенную энергию получим, перемножая величину интенсивности поверхностной радиации и коэффициент поглощения:

$$E_{\Pi} = E_0 \cdot \alpha \quad (8)$$

Необходимо отметить, что использование закона Бугера-Ламберта-Бера для биологических объектов, как правило, дает некоторую погрешность из-за целого ряда причин: биологические объекты обладают чрезвычайной гетерогенностью, что приводит к рассеянию света, заметное влияние может оказывать культуральная среда, неучтенным остается отраженный свет и т. п. [7]. Соответственно, эти погрешности снижают точность расчетов величины КПД фотобиосинтеза, однако, в большинстве своем в биологи-

<sup>1</sup> В отечественной литературе наиболее распространено мнение, что область ФАР лежит в пределах 380 – 710 нм, в зарубежной – 400 – 700 нм. С энергетической точки зрения для большего числа источников света это различие незначительно [7].

ческих экспериментах использование величин с такими погрешностями вполне допустимо.

Подставляя формулы (2) и (8) в (1), получим искомую величину КПД фотобиосинтеза.

**Пример расчета КПД фотобиосинтеза.** Приведем пример расчета КПД фотобиосинтеза для стационарного динамического равновесия на примере *Spirulina platensis*, хотя все изложенное применимо к любым видам низших фототрофов.

По определению культура, находясь в стационарном динамическом равновесии, характеризуется постоянством таких величин как продуктивность, калорийность, спектральный состав [9], что в значительной степени упрощает математические выкладки. Проведем расчеты КПД фотобиосинтеза, используя нижеследующие данные о *S. platensis*.

**Калорийность биомассы.** Определение калорийности биомассы *S. platensis* возможно двумя способами: непосредственное сжигание в калориметрической бомбе, либо расчет калорийности в соответствии с химическим составом биомассы. Для примера используем данные, приведенные в табл. 1, из которой следует, что калорийность одного грамма сухой биомассы *S. platensis* составляет 4,982 ккал. Умножив эту величину на 4,1868 [10], получим 20,859 кДж.

Таблица 1. Калорийность биомассы *S. platensis*

Table 1. Calorie content of biomass *S. platensis*

| Компонент                              | Содержание в биомассе, % | Калорийность 1 г компонента, ккал | Калорийность 100 г биомассы, ккал |
|----------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Жиры                                   | 6                        | 9,3                               | $6 \cdot 9,3 = 55,8$              |
| Белки                                  | 64                       | 5,6                               | $64 \cdot 5,6 = 358,4$            |
| Углеводы                               | 20                       | 4,2                               | $20 \cdot 4,2 = 84,0$             |
| Зола                                   | 10                       | 0                                 | $10 \cdot 0 = 0$                  |
| Суммарная калорийность 100 г биомассы: |                          |                                   | $\Sigma = 498,2$                  |

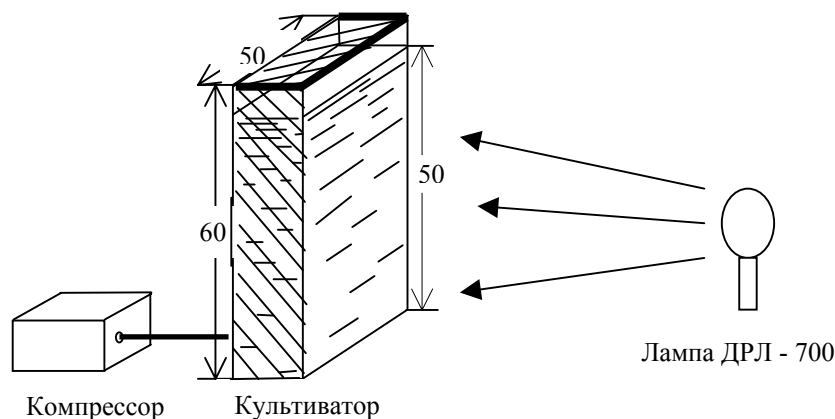


Рисунок 1. Схема культиватора.

Figure 1 Chart of cultivator.

**Условия эксперимента.** Для выращивания *S. platensis* использовали культиватор плоскопараллельного типа из органического стекла размером 50 × 60 × 2 см с рабочей толщиной слоя суспензии (длина светового пути) 2 см., в условиях круглосуточного освещения лампой ДРЛ-700. Интенсивность поверхностной радиации в области ФАР в среднем составляла 28 Вт/м<sup>2</sup>. Равномерное перемешивание суспензии водорослей в

культиваторе осуществлялось посредством барботирования воздуха с помощью компрессорной установки. Объем культуры  $V = 5$  л, площадь рабочей (освещаемой) поверхности  $S = 0,25 \text{ м}^2$ . Схема культиватора представлена на рис. 1.

Прирост биомассы. В нашем эксперименте плотность биомассы  $B$  составляла  $1,27 \text{ г.с.б./л}$ , а удельная скорость протока  $\omega = 0,3$ . Учитывая рабочий объем культуры  $V = 5$  л, величина прироста биомассы равна:

$$X = V \cdot \omega \cdot B = 5 \cdot 0,3 \cdot 1,27 = 1,905 \text{ г.с.б./сут.} \quad (9)$$

Продуктивность  $P = \omega \cdot B = 0,3 \cdot 1,27 = 0,381 \text{ г.с.б./л} \cdot \text{сут.}$

Спектр культуры  $D(\lambda)$  получен посредством регистрирующего спектрофотометра с кюветой в  $1 \text{ см}$  (рис. 2). Заметим, поскольку спектр культуры прописан с кюветой в  $1 \text{ см}$ , а оптический путь в эксперименте равен  $2 \text{ см}$ , необходимо величину оптической плотности удвоить:

$$D_L(\lambda) = L \cdot D(\lambda) = 2 \cdot D(\lambda),$$

где  $D_L(\lambda)$  – спектр культуры при длине оптического пути  $L = 2 \text{ см}$ .

Далее находим величину пропускания  $T_L(\lambda)$  и коэффициент поглощения  $\alpha_L(\lambda)$  для каждой длины волны  $\lambda$ :

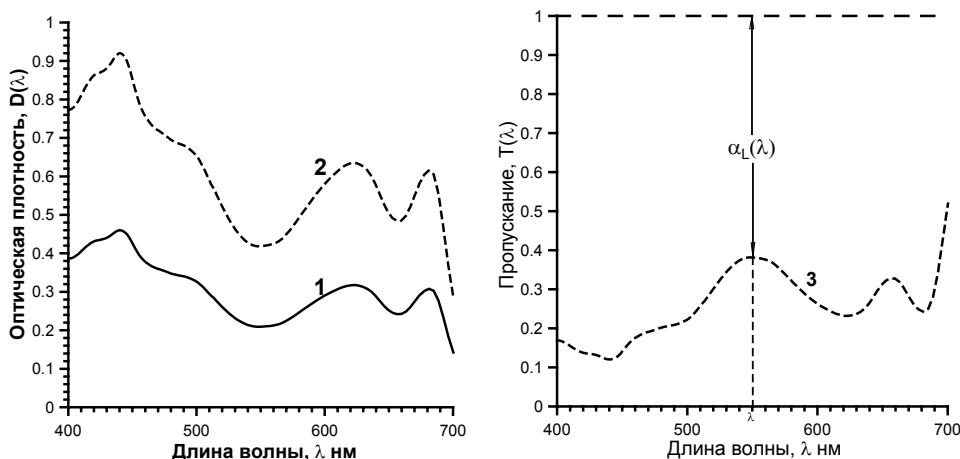


Рисунок 2. Спектры культуры *S. platensis*: 1 - поглощения слоем  $1 \text{ см}$ ; 2 - поглощения слоем  $2 \text{ см}$ ; 3 – пропускания слоем  $2 \text{ см}$ .

Figure 2. Spectrums of culture *S. platensis*: 1 - absorption by a layer  $1 \text{ cm}$ ; 2 - absorption by a layer  $2 \text{ cm}$ ; 3 -- transmission through a layer  $2 \text{ cm}$

$$-\lg(T_L(\lambda)) = D_L(\lambda), \quad \alpha_L(\lambda) = 1 - T_L(\lambda) \quad (10)$$

Энергетический спектр источника света. Энергетический спектр источника света (лампа ДРЛ 700 в нашем случае) можно найти в соответствующей литературе [6] (рис.3). Принимая площадь под кривой  $\varphi(\lambda)$  в области ФАР за  $100 \%$ , рассчитаем долю энергии, приходящуюся на каждую длину волны:

$$\delta(\lambda) = \frac{\varphi(\lambda)}{\int_{400}^{700} \varphi(\lambda) d\lambda} \quad (11)$$

Коэффициент поглощения. Зная величину  $\alpha_L(\lambda)$  и энергетический спектр источника света  $\delta(\lambda)$ , можно легко рассчитать долю поглощения световой энергии 2 см культуры *S. platensis* для каждой длины волны  $\lambda$ :

$$\alpha_{sp}(\lambda) = \delta(\lambda) \cdot \alpha_L(\lambda)$$

Используя (7), найдем коэффициент поглощения  $\alpha$  в области ФАР.

Коэффициент поглощения иногда удобнее рассчитывать непосредственно по спектру лампы, проходящего через рабочий слой культуры (рис. 3):

$$\alpha = 1 - \int_{400}^{700} \delta(\lambda) T_L(\lambda) d\lambda$$

Коэффициент поглощения в наших расчетах составил  $\alpha = 0,781$ .

Расчет КПД фотобиосинтеза. Все необходимые величины найдены. Подсчитаем величину запасенной энергии,  $E_x$ :

$$E_x = R \cdot X = 20,859 \cdot 1,905 = 39,74 \text{ кДж} \quad (12)$$

Чтобы найти поглощенную энергию необходимо, с учетом площади рабочей поверхности  $S=0,5 \cdot 0,5=0,25\text{ м}^2$ , перемножить величины интенсивности поверхностной радиации  $E_0$ , коэффициент поглощения  $\alpha$  и количество секунд в сутках  $t = 86400$ , т. е.

$$E_{\pi} = E_0 \cdot S \cdot \alpha \cdot t = 28 \cdot 0,25 \cdot 0,781 \cdot 86400 = 472,05 \text{ кДж} \quad (13)$$

Подставляя результаты расчетов (12) и (13) в (1), имеем:

$$\text{КПД} = \frac{39,74}{472,05} \cdot 100 \% = 8,42 \%$$

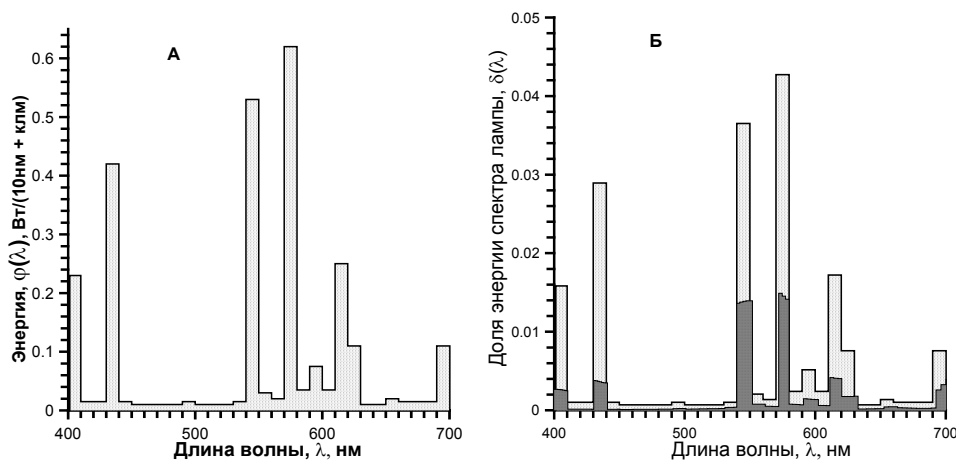


Рисунок 3. Энергетический спектр  $\phi(\lambda)$  лампы ДРЛ 700: А – данные по [6], Б – нормированный спектр  $\delta(\lambda)$  по (11). Серым цветом показан спектр лампы после прохождения сквозь слой культуры в 2 см.

Figure 3. Power spectrum  $\phi(\lambda)$  of lamps DRL 700: А – information on [6], В – rationed spectrum  $\delta(\lambda)$  on (11). The spectrum of lamp is pictured grey after passing through the layer of culture in 2 cm.

**Закключение.** Традиционно, большинство исследователей в качестве культиватора используют химическую посуду: конические и круглые колбы, пробирки и т.п., что в значительной мере усложняет, либо делает практически невозможным расчет КПД

фотобиосинтеза. При расчете фотоэнергетических характеристик особое внимание следует обращать на форму освещаемой поверхности фотобиореактора. Следует отметить, что использование фотобиореактора плоскопараллельного типа [2], либо в форме прямого цилиндра с освещением любого из оснований потребует минимального объема вычислений, кроме того, использование фотобиореактора с зеркальными боковыми стенками исключает погрешности связанные с рассеиванием света.

В своей практике биологи для измерения светового потока чаще используют *фотометрические* величины (обычно клк), которые непригодны для расчетов КПД фотобиосинтеза. В такой ситуации следует от фотометрических величин перейти к *единицам энергетического количества освещения*. Метод пересчета клк в Вт/м<sup>2</sup> для любого источника освещения описан в [3, 7]. Для многих искусственных и естественных источников света коэффициенты перевода уже рассчитаны в [3, 4, 5, 7].

1. *Белянин В. Н.* Светозависимый рост низших фототрофов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 96 с.
2. *Геворгиз Р. Г., Шахматов А. П.* Установка для культивирования морских микроводорослей // *Экология моря*. – Вып. 67. – С.44-47.
3. *Клешнин А. Ф.* Растения и свет. – М., АН СССР. -- 1954. -- 456 с.
4. *Леман В. М.* Культура растений при электрическом свете. М.: Колос, 1971. – 320 с.
5. *Ничипорович А. А.* Рабочее совещание по вопросам измерения оптического излучения для целей агрометеорологии, физиологии и экологии растений // *Физиол. Раст.* - 1969. - Т. 7, Вып. 6. – С. 332 - 350
6. *Справочная книга по светотехнике* / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.
7. *Томинг Х. Г., Гуляев Б. И.* Методика измерения фотосинтетически активной радиации. М.: Наука. – 1967. – 144 с.
8. *Тренкениу Р. П.* Простейшие модели роста микроводорослей 1.Периодические культуры // *Экология моря*. – Вып. 67. – С. 89 - 97.
9. *Тренкениу Р. П.* Простейшие модели роста микроводорослей 2.Квазинепрерывная культура // *Экология моря*. – Вып. 67. – С. 98 - 110.
10. *Чертов А. Г.* Международная система единиц измерения. – М., 1963. – 168 с.

Институт биологии южных морей НАН Украины,  
г. Севастополь

Получено 17.11.2005

R. G. GEVORGIZ, M. G. SHMATOK, A. S. LELEKOV

#### CALCULATION COEFFICIENT OF EFFICIENCY PHOTOBIO SYNTHESIS AT LOWER PHOTOTROPHS. 1. CONTINUOUS CULTURE.

##### Summary

The algorithm of calculation coefficient of efficiency photobiosynthesis was developed at lower phototrophs for terms of continuous cultures. The example of calculation is shown on the culture *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. It is marked that the use of photobioreactor parallel-sided type, or in the form of direct cylinder with illumination any of grounds of preferable from the minimum volume of calculations and possibility of calculation with a minimum error.